



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,
И. В. Кривцун, С. И. Кучук-Яценко,
Ю. Н. Ланкин,
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, 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)
Д. фон Хофе (Германия)
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)
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, А. И. Сулима,
И. Р. Наумова, И. В. Петушков

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

Ющенко К. А., Савченко В. С., Старушенко Т. М. Роль сегрегации кислорода при сварке сплавов типа инвар	3
Сидорец В. Н., Жерносеков А. М. Численное моделирование системы источник питания-дуга с плавящимся электродом	10
Чирич Р., Чантрак С., Раич К. Анализ механизма соединения и появления вязкого слоя в процессе ротационной сварки трением	17
Письменный А. С., Новикова Д. П., Прокофьев А. С., Полухин В. В. Свойства металла шва при индукционной сваркопайке стали 20	27

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Полетика И. М., Тютев А. В., Никонова И. В., Кирилова Н. В., Севастьянов С. П. Улучшение структуры и свойств сварных соединений нефте-, газопроводных труб большого диаметра	34
Карасев М. В., Вышемирский Е. М., Беспалов В. И., Работинский Д. Н., Захаров И. М., Беляев А. Е., Павленко Г. В., Соляник В. В. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах	38
Постолатий Н. И. Приближенный расчет индуктивности дросселя сварочной цепи постоянного тока	42
Жадкевич А. М. Источники газопламенного нагрева для пайки	46
Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус»	55

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Кальянов В. Н., Петренко А. Н. Износостойкость наплавленного металла с повышенной долей карбидов титана	59
По зарубежным журналам	61
Новые книги	64

ХРОНИКА

На Кавказе появился Пик Патона	65
Weldex/Россварка — 2004	65

ИНФОРМАЦИЯ

«Фрониус-Факел» сегодня	68
Учебные программы	70
Указатель статей за 2004 г.	73
Указатель авторов	77

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Каховский завод электросварочного оборудования

СП «ТМ ВЕЛДТЕК»

Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона

Ново-Краматорский машиностроительный завод

Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 12 (620)
December 2004

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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,
I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko, Yu. N. Lankin,
V. K. Lebedev (vice-chief ed.),
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
V. I. Makhnenko, 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)
D. von Hofe (Germany)
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)
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 galaxy:
I. S. Batasheva, A. I. Sulima,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Yushchenko K. A., Savchenko V. S., Starushchenko T. M. Role of oxygen segregation in welding alloys of Invar type	3
Sidorets V. N., Zhernosekov A. M. Numerical modeling of power source-arc with a consumable electrode system	10
Ćirić R., Čantrak S., Raić K. Analysis of mechanism of joining and appearance of a tough layer in the process of stir friction welding	17
Pismennyi A. S., Novikova D. P., Prokofiev A. S., Polukhin V. V. Properties of weld metal in induction braze welding of steel 20	27

INDUSTRIAL

Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Poletika I. M., Tyutev A. V., Nikonova I. V., Kirilova N. V., Sevastianov S. P. Im- provement of structure and properties of welded joints of large- diameter oil and gas pipelines	34
Karasev M. V., Vyshemirsky E. M., Besspalov V. I., Rabotin- sky D. N., Zakharov I. M., Belyaev A. E., Pavlenko G. V., Solyanik V. V. Peculiarities of modern machines for consumable electrode shielded-gas mechanized welding	38
Postolatiy N. I. Approximate calculation of inductance of choke of DC welding circuit	42
Zhadkevich A. M. Flame heating sources for brazing	46
Arc welding with a pulsed feeding of electrode wire (CMT proc- ess, offered by company «Fronius»)	55

BRIEF INFORMATION

Kaljanov V. N., Petrenko A. N. Wear resistance of deposited metal with an increased share of titanium carbides	59
Review of foreign journals	61
New books	64

NEWS

Paton peak in the Caucasus	65
Weldex / Russian Welding — 2004	65

INFORMATION

«Fronius-Fakel» today	68
Educational programs Information	70
Index of articles for 2004	73
Index of authors	77

*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.*



УДК 621.791.011.052:539.4.669.787

РОЛЬ СЕГРЕГАЦИИ КИСЛОРОДА ПРИ СВАРКЕ СПЛАВОВ ТИПА ИНВАР

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Т. М. СТАРУЩЕНКО**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено, что трещины при сварке сплава Fe-36 % Ni возникают преимущественно при температурах, значительно ниже температуры солидуса, в температурном интервале «провала» пластичности. При сварке в сварном соединении создаются условия для обогащения металла шва кислородом. При последующем охлаждении происходит обогащение им большеугловых границ зерен за счет термодиффузионных процессов в металле, что ведет к снижению пластичности и охрупчиванию. С использованием Varestraint test показана количественная зависимость влияния кислорода на провал пластичности металла шва.

Ключевые слова: сплав типа инвар, пластичность, сегрегация, обогащение кислородом, хрупкое разрушение, солидус, горячие трещины, границы зерен, сварное соединение, Оже-спектроскопия

Особые теплофизические свойства железоникелевых сплавов типа инвар (Fe-36 % Ni) в сочетании с высокой пластичностью и вязкостью, в том числе

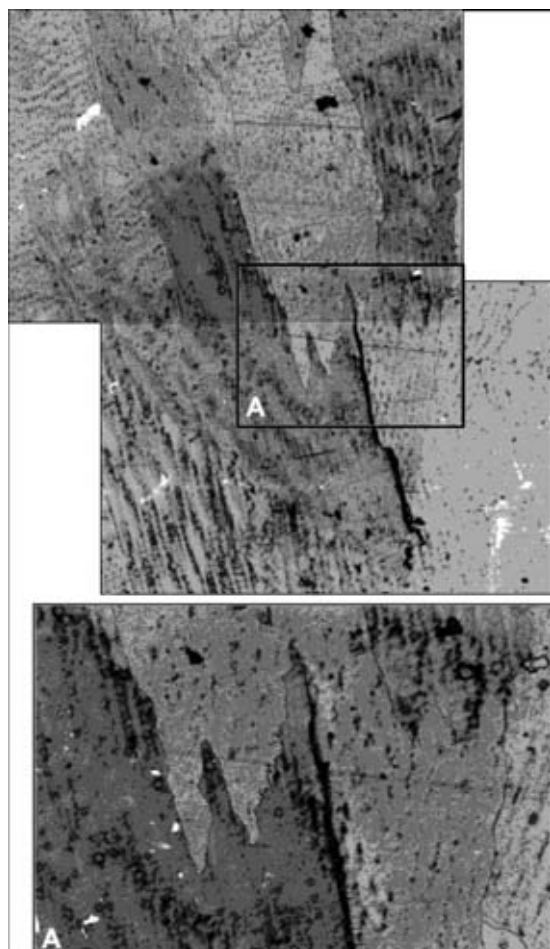


Рис. 1. Микроструктура металла шва с подваликовой горячей трещиной при многослойной сварке сплава 36NiX, $\times 200$ (A — $\times 400$)

при низких температурах, обусловили их широкое использование в машино- и приборостроении.

Сплав типа инвар имеет следующий химический состав, мас. %: 0,05 C; 0,10 Si; 0,35 Mn; 35,6 Ni; 0,45 Cr; 0,004 S; 0,006 P; 0,002 [O]; 0,00015 [N].

Исследования показали, что сварные швы сплава весьма чувствительны к образованию горячих трещин. В работе [1] установлено, что трещины возникают в двух температурных интервалах, в том числе при температурах ниже 1100°C (т. е. ниже температуры солидуса T_S), располагаются по границам зерен и формируются в процессе охлаждения металла шва (рис. 1). Низкое содержание серы и фосфора не предотвращает образование горячих трещин при сварке сплавов типа инвар. Исследования показали [1, 2], что кислород может инициировать возникновение горячих трещин указанного выше вида.

При изучении высокотемпературной пластичности сплава и швов типа инвар определено (рис. 2), что в случае скорости пластической деформации ($0,043\text{ с}^{-1}$) в температурном интервале $600\ldots 1100^\circ\text{C}$ происходит потеря («провал») пластичности (DTR) металла тем больше, чем выше содержание кислорода в исследуемом материале.

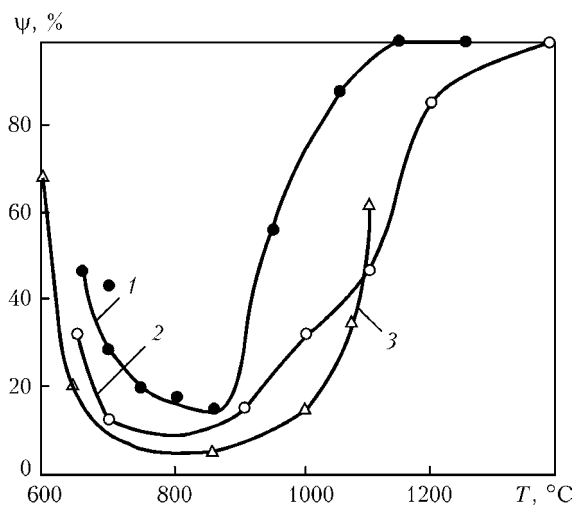


Рис. 2. Зависимость пластичности ψ основного металла (1) и металла швов (2, 3) от температуры: 1–3 — содержание кислорода соответственно 0,002; 0,028 и 0,052 мас. %

© К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Т. М. Старущенко, 2004

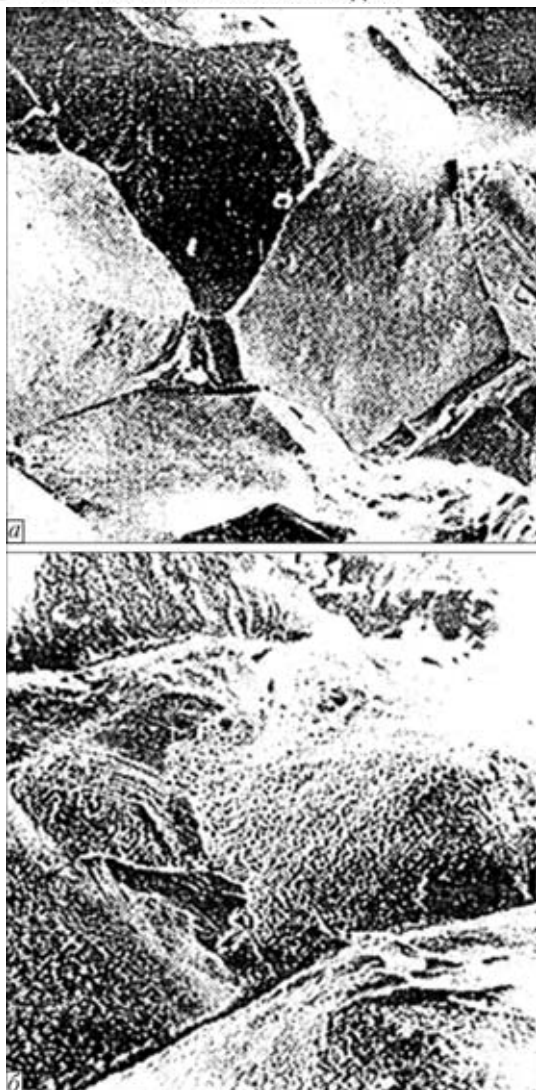


Рис. 3. Фрактограммы поверхности разрушения образцов из сплава 36НХ при температуре 725 °С: а — $\times 150$; б — $\times 450$

Фрактограммы поверхности разрушения образцов из сплава 36НХ при температуре 725 °С (рис. 3) показали наличие преимущественно хрупкого межзеренного разрушения со следами микропластической деформации. В связи с этим высказано предположение, что вероятной причиной

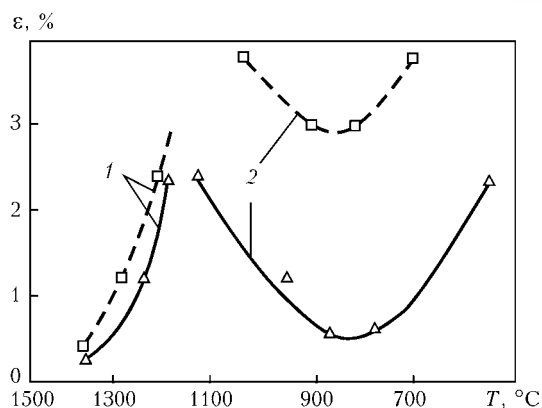


Рис. 4. Влияние кислорода на температурный интервал хрупкости сплава Fe-36 % Ni: 1 — BTR; 2 — DTR; сплошные кривые — содержание кислорода 0,0470 мас. %; штриховые — 0,0016 мас. % (ϵ — пластическая деформация)

образования горячих трещин в температурном интервале «провала» пластичности (DTR) является неравновесная диффузия атомов примесных элементов (например, кислорода), находящихся в твердом растворе на границе зерен. При этом решающим фактором, определяющим скорость диффузии, является пластическая высокотемпературная деформация, постоянно имеющая место в металле шва и зоне температурного влияния при сварке. Количественную оценку чувствительности металла шва к образованию трещин при сварке выполняли путем динамического деформирования на установке типа Varestraint test [3] пластины образцов размером 4×150×150 мм. Сварку осуществляли способом ТИГ на выбранном режиме ($I_{св} = 120$ А, $U_d = 12$ В, $v_{св} = 10$ м/ч) при постоянном значении деформации поверхностных слоев пластины 1,25 %.

Методы испытаний, инициирующие образование трещин, предусматривали выполнение одно- и двухпроходного швов: первый — по основному металлу для оценки трещиностойкости металла однопроходного шва, второй — два прохода по основному металлу. Причем выполнение второго прохода обеспечивало перекрытие первого прохода примерно на 60 % площади первого прохода (для моделирования свойств многослойной наплавки). Результаты испытаний серии образцов с разным

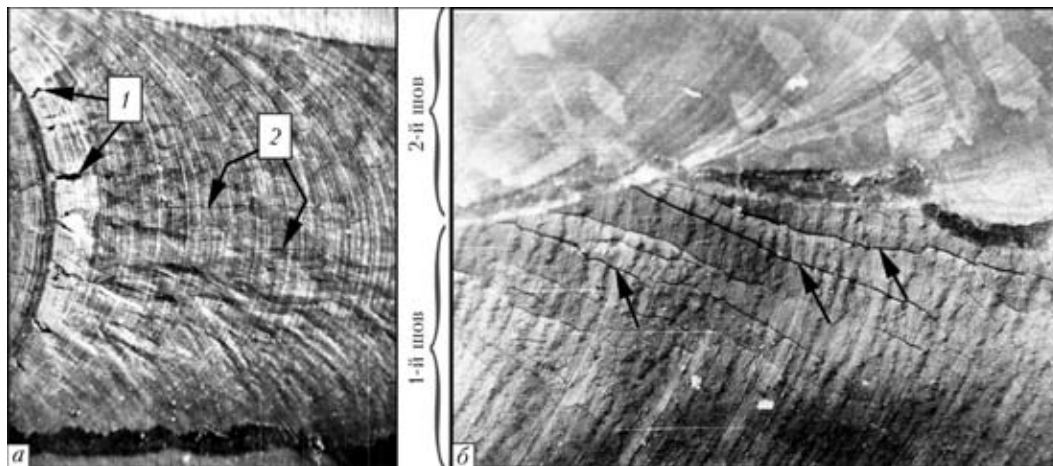


Рис. 5. Внешний вид сварного одно- (а) и двухпроходного (б) швов на сплаве 36НХ после испытаний: 1, 2 — трещины соответственно в области BTR и DTR (трещины в первом шве образовались под действием деформации при выполнении второго)

содержанием кислорода представлены на рис. 4, внешний вид сварных швов после испытаний — на рис. 5. Анализ полученных результатов показал, что в металле швов с системой легирования по типу сплава инвар существуют два типа «провала» пластичности — DTR и высокотемпературный интервал «провала» пластичности BTR (рис. 4), причем кислород оказывает влияние на характеристики пластичности преимущественно в температурном интервале DTR. Кроме того, следует отметить, что чувствительность к образованию трещин подваликового типа выше, чем в шве, выполненном в процессе испытания (рис. 5, б). По-видимому, в этом случае сказывается суммарное влияние кислорода на склонность к охрупчиванию первого шва, как в процессе его выполнения вне установки Vareststraint test, так и в случае повторного нагрева и одновременного принудительного динамического деформирования при испытании на указанной установке.

Фрактограммы поверхности трещин DTR, представленные на рис. 6, и характер распространения трещин (см. рис. 5, б) свидетельствуют о том, что имеет место хрупкое межзеренное разрушение со следами микропластической деформации. Характеристики поверхности трещины можно оценить как тип R [4]. Элементный состав поверхности трещины DTR и поверхности неповрежденного литого металла в качестве эталона исследовали на установке трехмерного анализа модели LAS-2000 методом электронной Оже-спектроскопии. Для изучения распределения элементов по глубине металла (от поверхности разрушения) применяли послойное травление ионами аргона. Рабочий вакуум в процессе измерений составлял $1,6 \cdot 10^{-8}$ Па,

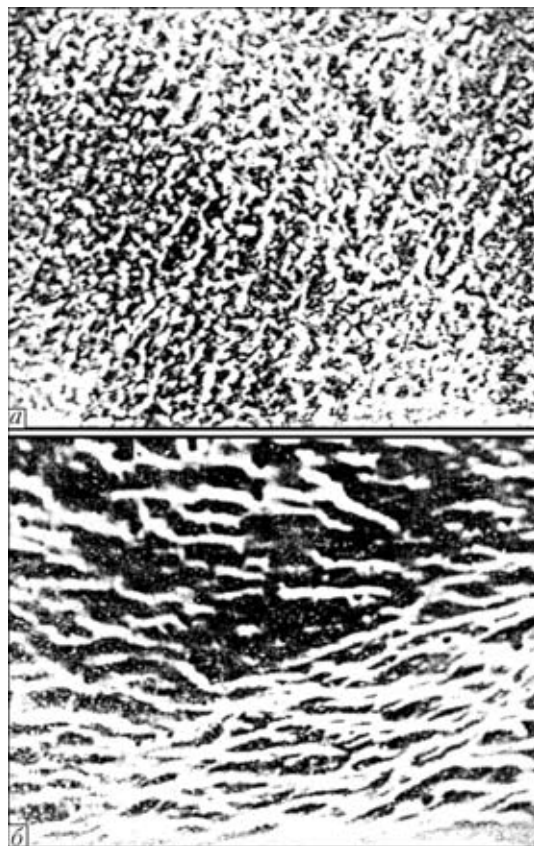


Рис. 6. Фрактограммы поверхности трещины в области DTR: а — $\times 1100$; б — $\times 3650$

что позволило после удаления с поверхности образца адсорбатов и загрязнений (при травлении до 1 мин) сохранять чистую поверхность в течение 16 ч. Профилограммы распределения и изменения

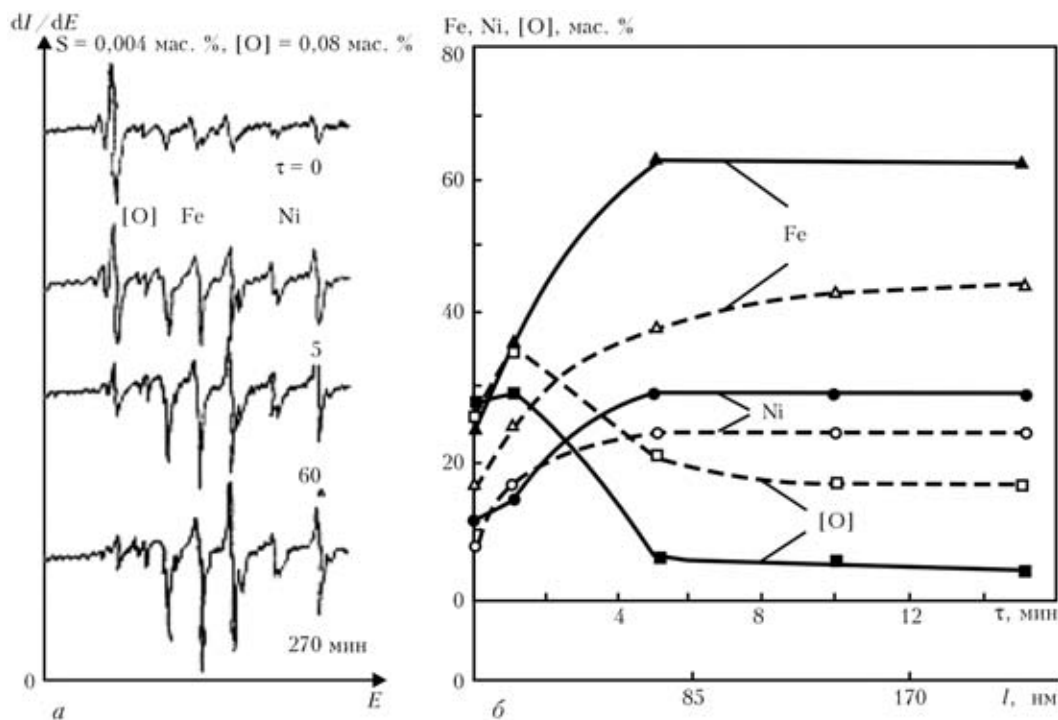


Рис. 7. Изменение интенсивности линий железа, никеля, кислорода на поверхности разрушения образца (а) и содержания этих элементов в поверхностном слое (б) в зависимости от времени τ травления: сплошные кривые — неповрежденный металл шва; штриховые — поверхность трещины (I — интенсивность вторичного характеристического измерения; E — кинетическая энергия; l — расстояние от границы зерен)

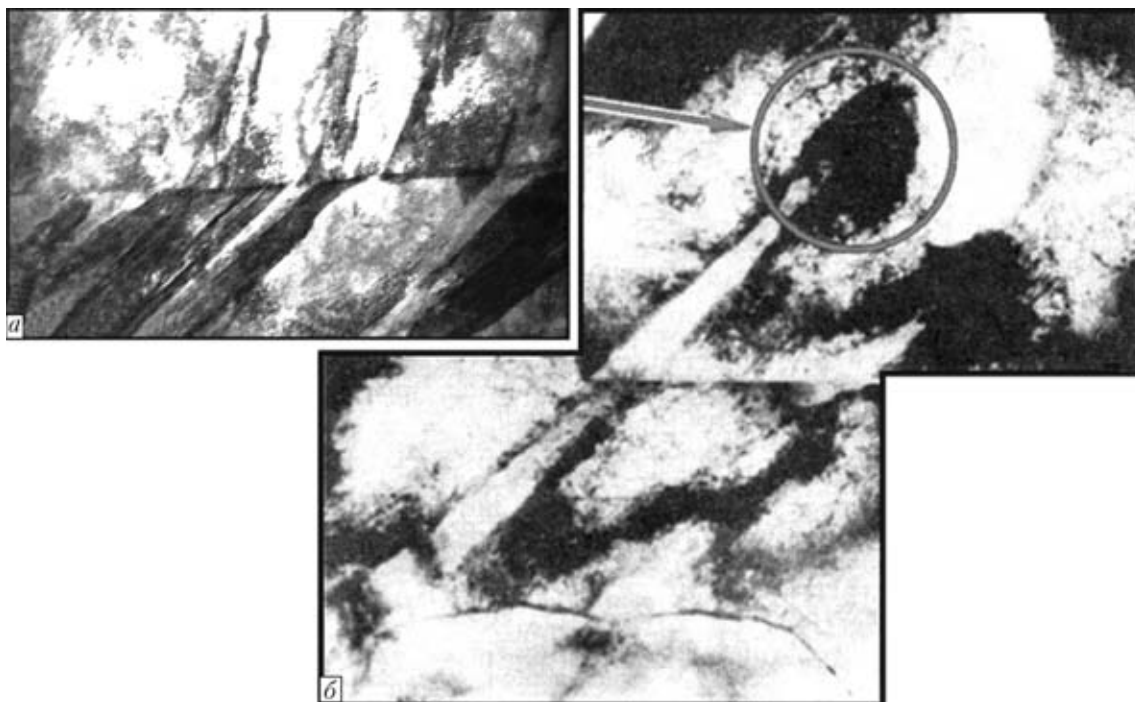


Рис. 8. Тонкая структура металла шва I системы легирования после принудительного деформирования при 700 °С (×1000): *а* — внутризеренная; *б* — приграничная зона (стрелкой обозначена область зарождения полосовых образований)

содержания основных и примесных элементов в процессе травления представлены на рис. 7. Из приведенных данных следует, что химический состав металла вблизи поверхности разрушения сохраняется неизменным в течение 4...5 мин травления (рис. 7, *а*). Химический состав матрицы металла шва обнаруживается через 5 мин травления (рис. 7, *б*), тогда как у поверхности разрушения он не выявляется даже через 230 мин непрерывного травления.

Следует отметить, что большая часть углерода как примеси внедрения удаляется с поверхности после травления в течение 30 с. В более глубоких слоях металла его содержание становится ниже предела чувствительности Оже-спектроскопии. Подобная картина наблюдается и при травлении поверхности горячей трещины. Сера удаляется с поверхности в течение 15 с травления. Азот в спектре не обнаружен. Водород методом Оже-спектроскопии также не выявляется, однако известно, что при повышенных (более 400 °С) температурах его подвижность настолько велика, что он не оказывает влияния на образование и рост горячих трещин в металле шва, хотя содержание водорода в нем несколько выше, чем в основном металле. Пик кислорода в обоих случаях наблюдается значительно дольше: в основном металле — в течение 90 мин травления, на поверхности разрушения — более 230 мин. Следовательно, можно полагать, что на поверхности основного металла имеется оксидная пленка толщиной около 1,30 мкм, а на поверхности горячей трещины — толщиной более 3,45 мкм.

Для выяснения возможности осуществления массопереноса кислорода из глубины шва к его поверхности разрушения сравнивали интенсивности пиков отдельных элементов на поверхности тре-

щин в образцах в состоянии после сварки и выдержки в течение 1,8 и 20 сут в сверхвысоком ($1 \cdot 10^{-8}$ Па) вакууме. При этом исходили из того, что оседание адсорбатов происходит равномерно и с одинаковой интенсивностью как на поверхности разрушения, так и на поверхности неповрежденного шва.

Эксперименты показали, что наиболее активно сорбция кислорода протекает в первые часы и сутки после травления поверхности металла. Затем скорости адсорбции и десорбции кислорода становятся примерно одинаковыми. На поверхности остается хемосорбированный слой, а интенсивность массопереноса этой примеси из глубины к поверхности основного металла остается практически неизменной в течение 20 сут. Таким образом, несмотря на то, что реакционная способность кислорода велика, а коэффициент его диффузии в металле при комнатной температуре очень мал (приблизительно $1 \cdot 10^{-16}$ см²/с), наблюдается повышенное содержание кислорода в поверхностном слое трещины, обусловленное его переносом из глубины металла.

Результаты экспериментов позволяют утверждать, что в исследуемом металле имеет место перераспределение кислорода. В результате увеличивается сегрегация этой примеси и происходит обогащение границ и обеднение тела зерна кислородом.

Следует ожидать, что именно особенности механизма внутризеренной деформации в сплаве Fe–36 % Ni могут сыграть решающую роль в повышении его сопротивляемости образованию подважиковых трещин.

Согласно общепринятому представлению, процесс реализации внутризеренной деформации в зависимости от внешних факторов и типа деформируемого металла происходит с участием либо



Химический состав и чувствительность к подваликовым трещинам металла швов

Система легирования	Материал	Массовая доля элементов, %							Чувствительность к подваликовым трещинам
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Другие	
I	36НХ	0,05	0,35	0,10	0,45	35,6	—	0,004 S, 0,006 P, 0,002 [O], 0,0015 [H]	Высокая
II	03Х18Н19Г10АМЗ (Fe-Cr-Ni-Mn-N)	0,03	11,2	0,50	0,50	13,5	2,6	0,004 S	Низкая

дислокационного (трансляционного) [5], либо поворотного (ротационного) механизма. Причем характерные закономерности последнего чаще всего проявляются в сложных термомеханических условиях. Можно предположить, что различия между указанными механизмами существенно влияют на сопротивляемость пластической деформации и, как следствие, на образование подваликовых трещин.

В связи с изложенным выше целесообразно уточнить особенности деформации (в том числе внутризеренной) металла сварных швов, обладающего различной чувствительностью к образованию подваликовых трещин.

На примере металла швов двух систем легирования (таблица) с высокой и низкой чувствительностью к трещинам нами оценивалась тонкая структура, определяющая особенности изменения дислокационного строения металла в процессе пластической деформации и сопротивляемость высокотемпературной деформации.

Сравнительную оценку изменений тонкой структуры выполняли на образцах с диаметром рабочей части 4 мм из металла верхнего валика многопроходных швов в состоянии после сварки, а также после дополнительного деформирования (до 10 %) при температуре 700 °С со скоростью $5,66 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, что соответствует поведению металла в температурном интервале DTR.

В металле швов I системы легирования (таблица) увеличение степени деформации на 10 % способствует формированию во внутренних объемах мощных полосовых структур (деформационных полос): механических двойников и полос, связанных с коллективными формами движения дефектов кристаллической решетки, распространяющихся вдоль всего объема зерна (рис. 8, а). Малоугловые границы зерен при перемещении деформационных полос не оказывают тормозящего влияния, в то время как большеугловые границы зерен блокируют дальнейшее перемещение полос скольжения в соседние зерна (рис. 8, б).

Зарождение полосовых структур происходит в определенных участках в хаотическом дислокационном ансамбле, отличающемся высокой плотностью дефектов решетки ($\rho \approx 1 \cdot 10^{11} \dots 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

Наличие в рассматриваемой структуре металла швов I системы легирования единичных дислокаций вдоль кристаллографических систем скольжения по телу зерна в случае отсутствия принудительной деформации и появление протяженных полосовых образований в зернах по мере нарастания внешнего нагружения свидетельствует о том, что пластическая внутризеренная деформация происходит за счет классических дислокационных

(трансляционных) механизмов [5]. Причем «мощность» (протяженность) сдвигов (трансляций) и значительная степень подвижности дефектов решетки в поле напряжений во многом обусловлены, с одной стороны, высокими значениями энергии дефектов упаковки металла системы легирования Fe-Ni, а с другой, как известно, незначительным препятствием для перемещения деформации. Следует подчеркнуть, что мощные коллективные перемещения дефектов решетки во внутреннем объеме зерен, направленные к границам, сопровождаются «транспортной» примесных элементов и их скоплением в области межзеренных границ, что наблюдалось на темпольных структурных и микродифракционных изображениях. По-видимому, специфика перемещения дефектов решетки в процессе пластической деформации обуславливает наличие сегрегационных скоплений и новых фаз вдоль межзеренных границ и отсутствие их во внутренних объемах зерен.

Таким образом, детальный анализ структурных элементов, распределения фаз и особенностей механизма пластической деформации свидетельствует о том, что в металле шва с системой легирования Fe-Ni вследствие реализации трансляционного механизма пластической деформации формируется весьма неоднородная структура, имеющая значительный градиент между телом зерна и большеугловыми границами по плотности дислокаций, наличию фазовых выделений и сегрегаций.

Структура металла швов с системой легирования Fe-Cr-Ni-Mn-N и высокой сопротивляемостью образованию трещин характеризуется прежде всего наличием в металле фазовых выделений высокой степени дисперсности ($d_{ф.в} \approx 0,04 \dots 0,21 \text{ мкм}$) и однородностью их распределения по всему объему металла шва (межчастичное расстояние $l_{ч} \approx 0,25 \dots 0,30 \text{ мкм}$).

По мере увеличения степени деформации равномерно по всему объему зерна возрастают плотность дислокаций и заторможенность сдвигов в кристаллографических плоскостях скольжения; нередко образуются расщепленные дислокации, что свидетельствует об общем уменьшении энергии дефектов упаковки $\gamma_{д.у}$ металла при переходе от I к II системе легирования.

Заторможенность трансляций индивидуальных дислокаций в пределах систем скольжения, по-видимому, является следствием общего снижения $\gamma_{д.у}$ в результате легирования. Это, естественно, затрудняет пластическую деформацию по классическому дислокационному механизму, для которого характерно поперечное скольжение дислокаций.

В таком случае для металла с низким значением $\gamma_{л.в}$ переход дислокации на другую плоскость сколь-

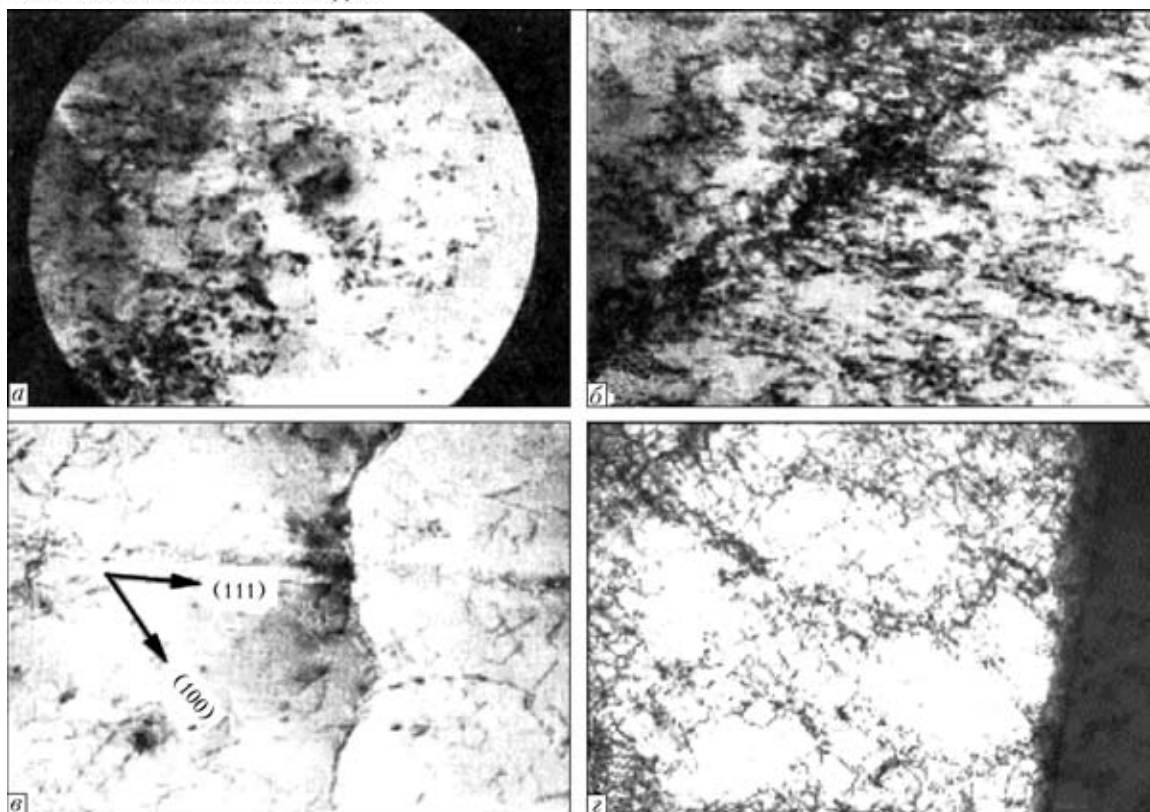


Рис. 9. Тонкая структура металла шва II системы легирования ($\times 20000$): *a* — дисперсионные выделения избыточных фаз по телу зерен; *b* — дислокационное строение приграничной зоны; *v* — расщепленные дислокации в структуре швов; *z* — фрагментация структуры металла после принудительного деформирования при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

жения возможен при условии объединения (преобразование частичной дислокации в полную). Этот процесс тем более энергоемкий, чем шире дефект упаковки (т. е. чем ниже значения $\gamma_{д.у}$),

что характерно для металла швов II системы легирования.

Считается, что сложные дислокационные перестройки подобного типа и взаимодействия дис-

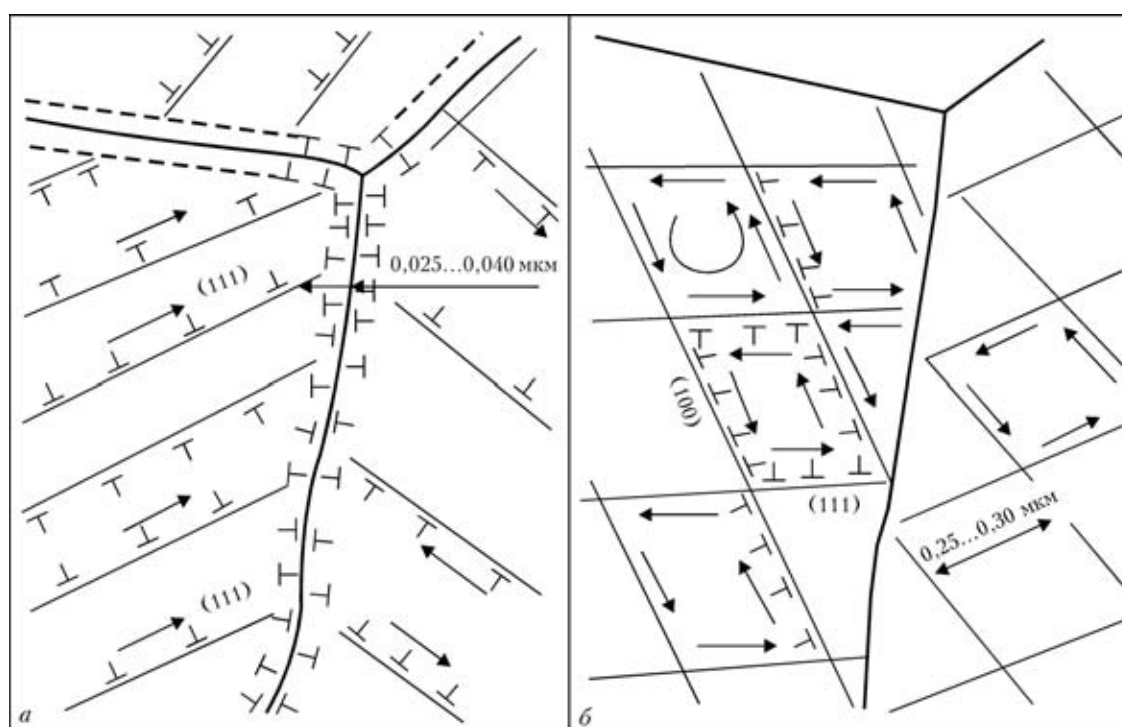


Рис. 10. Схема формирования структур в деформируемом металле I (*a*) и II (*b*) системы легирования: стрелки — направления ротации фрагментов металла швов



локации различных систем скольжения приводят к образованию сетчатой структуры [5] (рис. 9).

Следствием изменения механизма деформации является формирование на базе сетчатой структуры дисперсных фрагментов размером приблизительно 0,25...0,30 мкм, окаймленных зонами с высокой плотностью дислокаций (рис. 9, з). Из-за этого смежные микрообъемы разворачиваются на конечные углы; в подобных случаях релаксация внутренних напряжений осуществляется посредством пластических поворотов (ротаций).

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в сходных термомеханических условиях в металле швов различных систем легирования формируются структуры, существенным образом отличающиеся наличием и распределением примесей, морфологией фазовых выделений, размерами зерна и субструктурных элементов, характером движения дефектов кристаллической решетки в поле действующих напряжений. Последнее свидетельствует о том, что механизм пластической деформации в определенных микрообъемах металла шва при различных системах легирования также неодинаков: при I системе легирования преимущественно реализуется дислокационный механизм пластической деформации, при II системе — ротационный механизм (рис. 8, 9).

Можно предположить, что смена механизма пластической деформации оказывает решающее влияние на процессы массопереноса примесных элементов, вызывающих охрупчивание по границам зерен. В первом случае при реализации трансляционного механизма (рис. 8, а) мощное внутризеренное скольжение на расстояния, сопоставимые с размером зерна (когда дислокации движутся по телу зерна к границам), способствует дислокационному переносу этих элементов на межзеренные границы. Во втором случае (рис. 10) при подключении ротационного механизма несмотря на

равнозначное деформирование металла отсутствует явно выраженная тенденция к ориентированному к границам зерен перемещению дислокаций; направленная макродеформация образца на микроуровне происходит преимущественно посредством вращательного движения элементов внутризеренного строения. Применительно к сплаву инвар отмеченная специфика механизма пластической внутризеренной деформации в итоге способствует обогащению межзеренных границ кислородом, что вызывает образование подваликовых трещин в многослойных швах.

Выводы

1. Горячие подваликовые трещины в многослойных швах с легированием по типу сплава инвар образуются по границам зерен.
2. На поверхности подваликовых трещин в многослойных швах с легированием по типу сплава инвар наблюдается повышенное содержание примесных элементов, прежде всего, кислорода.
3. Обогащение границ зерен в процессе сварки, приводящее к образованию горячих трещин в швах, контролируется дислокационным (трансляционным) механизмом пластической деформации.

1. Ющенко К. А., Старушенко Т. М., Савченко В. С. Механизм образования горячих трещин, вызываемых кислородом, при сварке Инвара // Автомат. сварка. — 1983. — № 8. — С. 5–7.
2. Ющенко К. А., Старушенко Т. М. Роль кислорода в образовании трещин при сварке инвара // Там же. — 1981. — № 8. — С. 21–24.
3. Savage W. F., Lundin G. D. The Vareststraint test // Welding J. — 1977. — 44, № 10. — P. 433–442.
4. Fractographic investigation on solidification crack in the Vareststraint test of fully austenitic stainless steel-studies on fractography of welded zone (III) / F. Matsuda, H. Nakagawa, S. Ogata, S. Katayama // Trans. JWRI. — 1978. — 7, № 1. — P. 59–70.
5. Хирт Дж., Ломе И. Теория дислокаций. — М.: Атомиздат, 1972. — 599 с.

It has been found that cracks in welding of Fe-36 % Ni alloy are formed primarily at temperatures that are much lower than the solidus temperature, i.e. within the ductility-dip temperature range. Conditions causing enrichment of weld metal with oxygen are formed in the joint during the welding process. Subsequent cooling leads to oxygen enrichment of high-angle grain boundaries due to thermal-deformation processes occurring in metal, which leads to decrease in ductility and to embrittlement. Vareststraint tests have shown existence of quantitative relationships between the effect of oxygen and ductility dip of weld metal.

Поступила в редакцию 25.04.2004



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ–ДУГА С ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В. Н. СИДОРЕЦ, канд. техн. наук, А. М. ЖЕРНОСЕКОВ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложено математическое описание системы источник питания–дуга с плавящимся электродом. Исследованы условия статического существования системы с учетом теплофизических характеристик параметров и изменения вылета электрода.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, численное моделирование процесса, стационарная длина дуги, объект регулирования, статические вольт-амперные характеристики

Создание нового сварочного оборудования для дуговой сварки — источников питания, автоматов и полуавтоматов, а также систем автоматического регулирования и стабилизации процесса — требует всестороннего анализа системы источник питания–дуга с плавящимся электродом.

В этом аспекте остается актуальным математическое описание изменения длины дуги во времени как объекта регулирования, особенно в связи с появлением нового программного обеспечения, например MATLAB Simulink, позволяющего проводить моделирование различного рода электро-технических систем. Важным является математическое описание статической вольт-амперной характеристики устойчивого течения процесса сварки, которая зависит от различных физических свойств материала электрода.

Существующие подходы не совсем четко определяют оптимальные критерии системы источник питания–дуга с плавящимся электродом, поскольку отличаются различными условиями проведения экспериментов [1, 2] и не учитывают особенностей вольт-амперных характеристик устойчивого течения процесса дуговой сварки [3, 4].

В настоящей работе получены дифференциальные уравнения, с помощью которых описана система источник питания–дуга с плавящимся электродом и исследованы условия статического существования этой системы с учетом теплофизических характеристик параметров и изменения вылета электрода.

Динамика плавления электродной проволоки.

Тепловые процессы в плавящемся электроде будем рассматривать при следующих допущениях: этапы нагрева вылета электрода и его плавления достаточно обособлены и взаимодействуют между собой таким образом, что конечные условия нагрева являются начальными условиями плавления; излучением с поверхности электрода на этапе нагрева вылета электрода можно пренебречь; длина зоны плавления по сравнению с вылетом мала; перенос металла мелкокапельный (струйный).

Таким образом, нагрев вылета происходит в результате протекания в нем тока. Поступлением энергии путем теплопередачи с зоны плавления при достаточно высоких скоростях подачи проволоки можно пренебречь.

Тогда согласно закону сохранения энергии, вся мощность, выделяемая от проходящего в вылете тока, идет на увеличение внутренней энергии, т. е. на нагрев:

$$mcdT = Ri^2dt, \quad (1)$$

где m , R — соответственно масса и электрическое сопротивление элементарного участка электрода; c — удельная теплоемкость металла электрода; i — мгновенное значение сварочного тока; dT , dt — приращение соответственно температуры и времени.

Выразим переменные, входящие в выражение (1), через удельные характеристики

$$\gamma x S c dT = \rho \frac{x}{S} i^2 dt,$$

где γ — плотность металла электрода; x — длина элементарного участка электрода; S — площадь поперечного сечения электрода; ρ — удельное электрическое сопротивление металла электрода.

В результате получаем дифференциальное уравнение для температуры нагрева вылета

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho i^2}{\gamma c S^2}. \quad (2)$$

С учетом того, что при выходе из мундштука проволока имеет температуру T_0 , уравнение (2) можно проинтегрировать. В результате

$$T = T_0 + \frac{\rho i^2 (l_w - l)}{\gamma c S^2 v},$$

где l_w — расстояние между мундштуком и изделием; l — длина дуги; v — скорость подачи проволоки.

В зоне плавления электрода имеет место другой баланс энергии. Энергия поступает из приэлектродной области и расходуется только на плавление металла:



$$U_a i = \gamma S v_{\text{пл}} \left[c(T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda - \frac{\rho i^2 (l_w - l)}{\gamma S^2 v_{\text{пл}}} \right], \quad (3)$$

где U_a — прианодное (или прикатодное в зависимости от полярности тока сварки) падение напряжения с учетом потенциала выхода электронов из металла; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления металла; λ — удельная теплота плавления металла; $v_{\text{пл}}$ — скорость плавления.

Из уравнения (3) можно найти стационарную скорость плавления электродной проволоки:

$$v_{\text{пл}} = \frac{S U_a i + \rho (l_w - l) i^2}{\gamma S^2 [c(T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda]}.$$

Для нестационарного случая изменение длины дуги описывается дифференциальным уравнением, правая часть которого и есть разность между скоростями плавления $v_{\text{пл}}$ и подачи v проволоки:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{S U_a i + \rho (l_w - l) i^2}{\gamma S^2 [c(T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda]} - v.$$

Динамика электрической цепи с дугой плавящегося электрода. Электрическую цепь, содержащую дугу с плавящимся электродом, можно изобразить с помощью схемы, показанной на рис. 1.

Согласно закону Кирхгофа, напряжение холостого хода источника питания $U_{x.x}$ равно сумме падений напряжений на элементах цепи — активном сопротивлении источника питания и подводящих кабелей R_s , индуктивности источника питания и подводящих кабелей L , активном сопротивлении участка электродной проволоки от мунштука до дуги — и падения напряжения в дуговом промежутке

$$U_{x.x} = R_s i + L \frac{di}{dt} + \rho \frac{l_w - l}{S} i + El + U_{a-k},$$

где E — напряженность электрического поля в столбе дуги, не зависящая от тока; U_{a-k} — сумма приэлектродных падений напряжения на аноде и катоде (в дальнейшем для упрощения записи уравнений под напряжением холостого хода источника питания $U_{x.x}$ будем понимать разность $U_{x.x} - U_{a-k}$).

С учетом приведенного выше система дифференциальных уравнений, с помощью которых описывают динамическую систему источник питания — дуга с плавящимся электродом, имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \frac{S U_a i + \rho (l_w - l) i^2}{\gamma S^2 q} - v, \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U_{x.x} - R_s i - \rho \frac{l_w - l}{S} i - El), \end{cases} \quad (4)$$

где $q = c(T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda$ — константа, определяющая теплофизические свойства металла электродной проволоки.

Эта система дифференциальных уравнений будет в дальнейшем объектом исследования. Очевидно, что главным ее свойство — нелинейность. Поэтому последовательно применим все этапы ис-

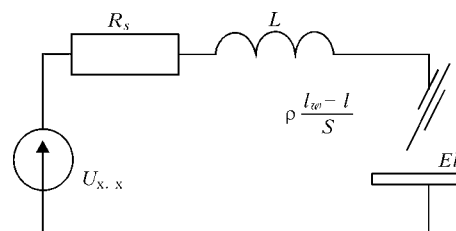


Рис. 1. Электрическая цепь, моделирующая процесс сварки плавящимся электродом

следования подобных систем, первым из которых является исследование особых точек (или точек равновесия).

Статическое состояние системы источник питания — дуга с плавящимся электродом и условия его существования. Для исследования особых точек приравняем правые части уравнений (4) нулю и получим нелинейную систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{S U_a I_0 + \rho (l_w - l_0) I_0^2}{\gamma S^2 q} - v = 0, \\ U_{x.x} - R_s I_0 - \rho \frac{l_w - l_0}{S} I_0 - E l_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

относительно координат особой точки I_0 и l_0 .

Из первого уравнения системы (5) можно найти зависимость l_0 от I_0 :

$$l_0 = \frac{\rho l_w I_0^2 + S U_a I_0 - q v \gamma S}{\rho I_0^2}. \quad (6)$$

Подставив эту формулу во второе уравнение системы (5), можно найти выражения, которые определяют зависимость I_0 и l_0 от параметров сварочного процесса и электрической цепи:

$$\rho R_s I_0^3 - (U_{x.x} + U_a - E l_w) I_0^2 + S(E U_a + q v \gamma \rho) I_0 - q v \gamma E S^2 = 0, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \rho E^2 l_0^3 + \rho (q v \gamma \rho - E(2 U_{x.x} + U_a + E l_w)) l_0^2 + \dots \\ & \dots + [\rho U_{x.x} (U_{x.x} + U_a + 2 E l_w) + \\ & + (R_s S + \rho l_w) (E U_a - 2 q v \gamma \rho)] l_0 + \dots \\ & \dots + q v \gamma (R_s S + \rho l_w)^2 - U_{x.x} U_a (R_s S + \rho l_w) - \\ & - \rho U_{x.x} l_w = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Оба эти уравнения являются кубическими и можно показать, что в (7) один положительный корень, а выражение (8) может иметь как положительные, так и отрицательные корни. Исследуем этот вопрос.

С физической точки зрения стационарная длина дуги имеет следующие ограничения: длина дуги должна быть положительна и не может быть больше расстояния между мунштуком и изделием:

$$0 < l < l_w. \quad (9)$$

Выражение (9) можно назвать условием существования процесса сварки плавящимся электродом. Подставляя граничные значения длины дуги из (9) в (7), (8), получаем ограничения на параметры, которые соответствуют данному условию существования



$$qv\gamma(SR_s + \rho l_w)^2 - U_{x,x}U_a(SR_s + \rho l_w) - \rho U_{x,x}^2 l_w = 0,$$

$$qv\gamma SR_s - U_{x,x}U_a + U_a E l_w = 0.$$

Условия существования для скорости подачи электродной проволоки следующие:

$$U_{x,x} \frac{SR_s U_a + \rho l_w (U_{x,x} + U_a)}{qv\gamma SR_s} > v > U_a \frac{U_{x,x} - E l_w}{qv\gamma SR_s}. \quad (10)$$

Если максимальная скорость подачи (левая часть выражения), при которой проволока упирается в изделие, достижима всегда, то минимальная скорость подачи (правая часть выражения), при которой электрод плавится до мундштука, возможна либо при достаточно высоких значениях напряжения холостого хода источника питания $U_{x,x} > E l_w$ либо при достаточно малых расстояниях от мундштука до изделия $l_w < U_{x,x}/E$.

Направление неравенств в (10) и далее представляется таким образом, чтобы обеспечить соответствие с (9). Здесь и далее численные примеры и рисунки выполнены для электродной проволоки типа Св-08Г2С диаметром 1,6 мм.

На рис. 2, а показаны ограничения по скорости подачи электродной проволоки, выраженные неравенствами (10).

Для параметра сварочного процесса расстояние от мундштука до изделия l_w и условия существования можно представить в виде

$$l_{w \max} > l_w > \frac{U_{x,x}U_a - qv\gamma SR_s}{EU_a}, \quad (11)$$

где $l_{w \max}$ — максимальное удаление мундштука до изделия, при котором возможен сварочный процесс. Это значение можно определить, решив квадратное уравнение

$$qv\gamma^2 l_w^2 - \rho[U_{x,x}(U_{x,x} + U_a) - 2qv\gamma SR_s]l_w + SR_s(qv\gamma SR_s - U_{x,x}U_a) = 0. \quad (12)$$

Физический смысл такого ограничения понятен. При больших вылетах электрода ограничивается ток сварки, что препятствует плавлению. Максимальное расстояние от мундштука до изделия будет

иметь место либо при достаточно большом значении напряжения холостого хода

$$U_{x,x} > \frac{qv\gamma SR_s}{U_a} \quad (13)$$

либо при достаточно малой скорости подачи электродной проволоки

$$v < \frac{U_{x,x}U_a}{qv\gamma SR_s}.$$

При невыполнении условия (13) ограничение, которое накладывается правой частью условия (11), не правомерно. В этом случае действует ограничение, накладываемое левой частью этого выражения, принимающей вид $l_{w \min} < l_w < l_{w \max}$, где $l_{w \min}$ и $l_{w \max}$ — значения, которые являются корнями квадратного уравнения (12).

Очевидно также и то, что при достаточно малых напряжениях холостого хода

$$U_{x,x} < 2\sqrt{qv\gamma SR_s} - U_a$$

процесс сварки не возможен.

Проанализируем влияние сопротивления R_s , определяющего наклон внешней характеристики источника питания. Ограничения на сопротивление имеют вид

$$R_{s \max} > R_s > U_a \frac{U_{x,x} - E l_w}{qv\gamma S},$$

где $R_{s \max}$ — значение, которое можно вычислить как корень уравнения

$$qv\gamma S^2 R_s^2 + S(2qv\gamma l_w - U_{x,x}U_a)R_s + \rho l_w(qv\gamma l_w - U_{x,x}(U_{x,x} - U_a)) = 0.$$

На рис. 2, б показаны ограничения, накладываемые на сопротивление R_s . Они состоят в том, что при достаточно больших значениях напряжения холостого хода источника питания ($U_{x,x} > E l_w$) необходимо обеспечить некоторый наклон внешней характеристики источника за счет введения минимального R_s . При иных условиях процесс неосуществим. В случае очень «жестких» вольт-амперных характеристик источника питания

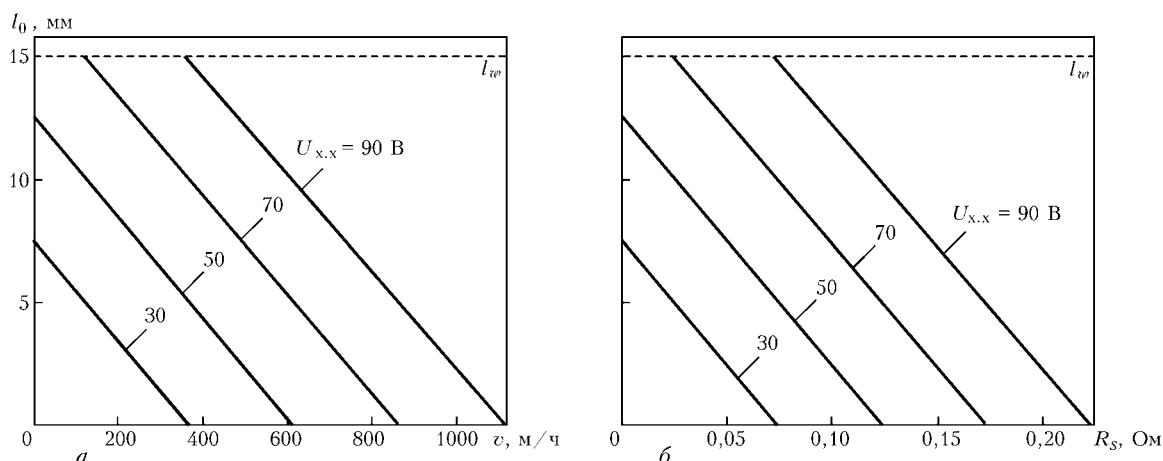


Рис. 2. Зависимость стационарной длины дуги l_0 от скорости v подачи электродной проволоки (а) и сопротивления R_s (б)

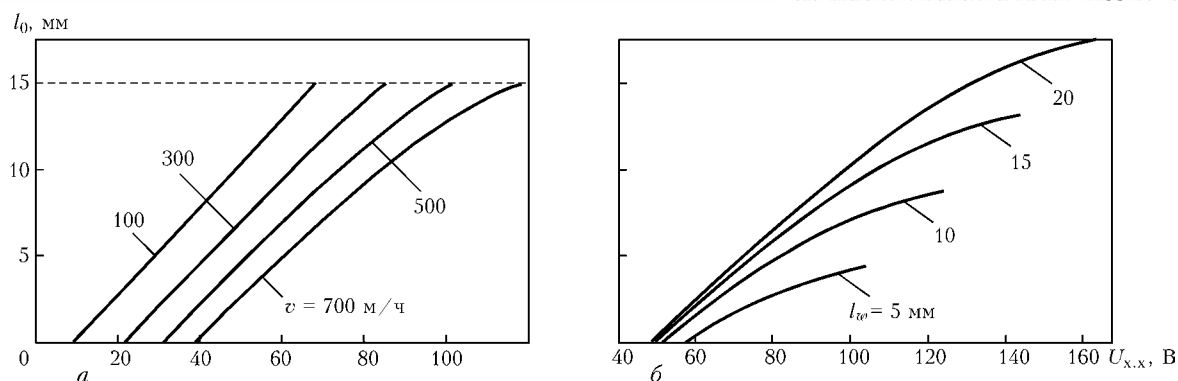


Рис. 3. Зависимость стационарной длины дуги l_0 от напряжения холостого хода $U_{x.x}$ источника при различных скорости v подачи электродной проволоки (а) и расстоянии l_w между мундштуком и изделием (б)

электродная проволока будет плавиться до мундштука.

Напряжение холостого хода является еще одним параметром, характеризующим источник питания. Ограничения, накладываемые на него, имеют вид

$$U_{x.x \min} < U_{x.x} < \frac{qv\gamma SR_s + U_a El_w}{U_a},$$

где $U_{x.x \min}$ — минимальное значение напряжения холостого хода, определяемое из уравнения

$$\rho l_w U_{x.x}^2 + U_a (SR_s + \rho l_w) U_{x.x} - qv\gamma (SR_s + \rho l_w)^2 = 0.$$

На рис. 3 представлены ограничения, которые накладываются на напряжение холостого хода источника при различных технологических параметрах сварочного процесса. Из рис. 3, б видно, что ограничения становятся более «жесткими» при уменьшении расстояния между мундштуком и изделием.

Статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом. Стационарное значение длины дуги, исследованное выше, важно при определении статической вольт-амперной характеристики дуги. Это объясняется тем, что эту характеристику, т. е. зависимость напряжения от тока, легче измерить экспериментально. При наших допущениях напряжение на столбе дуги связано с ее длиной соотношением $U_0 = El_0$.

С учетом стационарной длины дуги, определенной формулой (6), выражение для статической вольт-амперной характеристики принимает вид

$$U_0 = E \frac{\rho l_w I_0^2 + S U_a I_0 - qv\gamma S}{\rho I_0^2}. \quad (14)$$

Как видно из (14), статическая вольт-амперная характеристика определяется параметрами дуги (E , U_a), электродной проволоки (S , ρ , γ , q) и технологическими параметрами сварочного процесса (v , l_w), но не определяется параметрами электрической цепи ($U_{x.x}$, R_s , L).

Для того чтобы анализ был всесторонним, подробнее остановимся на исследовании общих свойств функции (14).

При выборе масштабов напряжения El_w и тока $S\sqrt{(qv\gamma)/(\rho l_w)}$ выражение (14) можно представить в виде однопараметрической функции

$$u' = 1 + \frac{n}{i'} - \frac{1}{i'^2},$$

где u' и i' — масштабированные значения соответственно напряжения и тока; $n = U_a/\sqrt{qv\gamma\rho l_w}$ — единственный параметр, который объединяет параметры дуги, электродной проволоки и технологические параметры сварочного процесса.

Отметим, что вид этой функции качественно не зависит от параметра n . Максимум лежит всегда выше и правее от пересечения функцией уровня единицы, т. е. не входит в область существования, которая на рис. 4 показана жирной линией, при любых значениях параметров.

Таким образом, статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом всегда имеет возрастающий характер без экстремумов и существует только в определенном диапазоне токов.

На рис. 5 представлено семейство вольт-амперных характеристик. Из рисунка видно, что условия существования (9), накладываемые на длину дуги, отражаются и на токе статического состояния рассматриваемой системы.

Для дуги плавящегося электрода он может изменяться в пределах:

$$I_{0 \min} < I_0 < \frac{qv\gamma S}{U_a}, \quad (15)$$

где $I_{0 \min}$ — минимальный ток дуги плавящегося электрода, значение которого можно определить, решив квадратное уравнение

$$\rho l_w I_0^2 + S U_a I_0 - qv\gamma S^2 = 0. \quad (16)$$

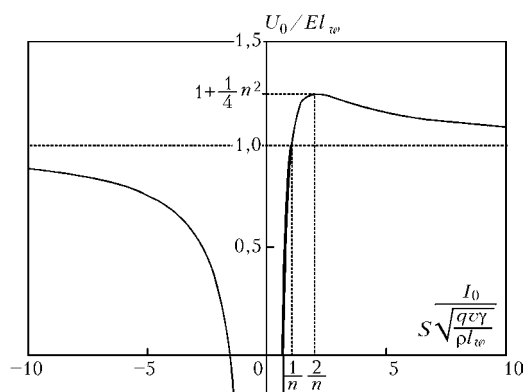


Рис. 4. Общий вид функции u'

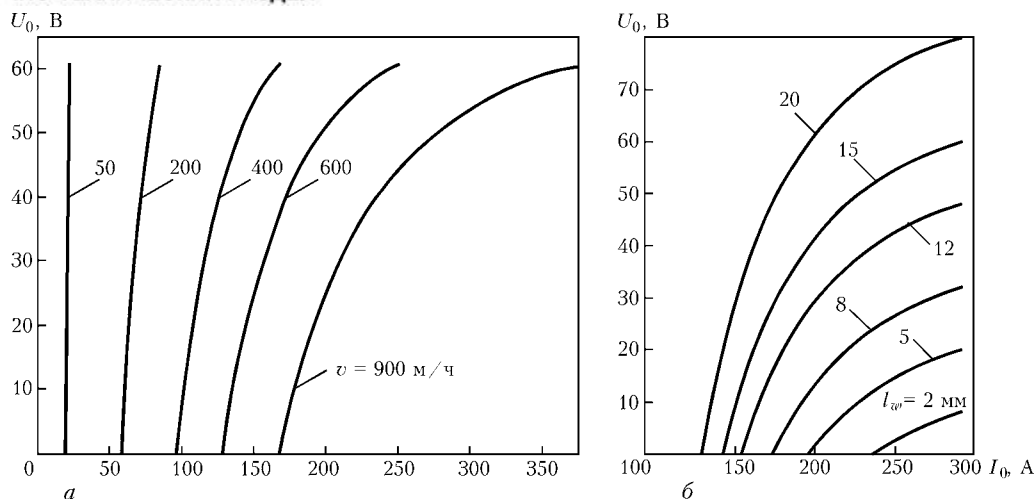


Рис. 5. Статическая вольт-амперная характеристика U_0 дуги с плавящимся электродом при различных скорости v подачи электродной проволоки (а) и расстоянии l_w между мундштуком и изделием (б)

Очевидно, что выражения (15) и (16) могут быть использованы при выборе сварочного тока по параметрам электродной проволоки и технологическим параметрам процесса сварки.

На рис. 6 показано влияние наклона внешней характеристики источника питания на параметры устойчивого процесса сварки. Чем выше напряжение холостого хода, тем больше значение минимального балластного резистора для выполнения условий существования (9). При малых напряжениях холостого хода для обеспечения полного диапазона изменения тока дуги (15) необходимы специальные источники питания с возрастающими внешними характеристиками [1].

В случае применения традиционных источников питания уменьшается диапазон изменения тока дуги: $I_{0 \min} < I_0 < I_{0 \max}$, где $I_{0 \max}$ — максимальный ток дуги плавящегося электрода, значение которого можно определить, решив квадратное уравнение

$$\rho(U_{x.x} + U_a - El_w)I_0^2 - S(qv\gamma\rho + EU_a)I_0 + qv\gamma ES^2 = 0.$$

Этот случай на рис. 6 соответствует точечным кривым. Максимальную длину дуги, которая соответствует максимальному току, можно определить, решив уравнение

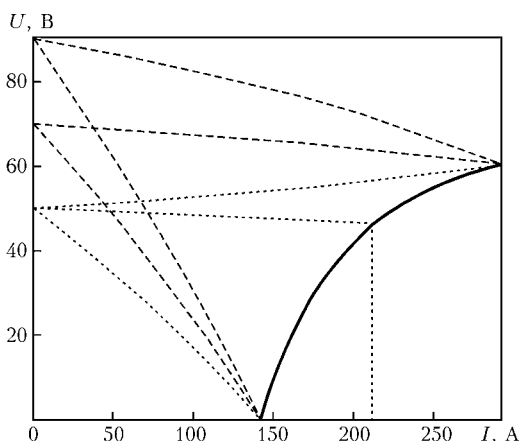


Рис. 6. Статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом (сплошные линии) и внешние характеристики источников питания (штриховые и точечные)

$$E^2 l_w^2 + [qv\gamma\rho - E(2U_{x.x} + U_a)]I_0 + U_{x.x}(U_{x.x} + U_a) - qv\gamma\rho l_w = 0.$$

В работах [1, 2] приводится достаточно много экспериментальных статических вольт-амперных характеристик дуги с плавящимся электродом. Они имеют разнообразный вид и плохо поддаются объяснению и обобщению (скорее всего из-за различных условий проведения экспериментов). Проиллюстрируем это несколькими примерами. Можно снимать вольт-амперную зависимость, изменяя ток посредством изменения скорости подачи электродной проволоки. Такой способ наиболее применим у технологов. При этом статические вольт-амперные зависимости будут иметь вид, представленный на рис. 7, а. Их можно описать с помощью следующего выражения:

$$U_0 = E \frac{U_{x.x}S - (R_sS + \rho l_w)I_0}{ES - \rho I_0}.$$

Однако это не является статической вольт-амперной характеристикой дуги с плавящимся электродом. По сути, это внешняя характеристика источника питания с учетом падения напряжения на электродной проволоке. Почти все кривые однотипны, кроме случая малых скоростей подачи электродной проволоки.

На рис. 7, б представлены вольт-амперные характеристики, которые можно получить, изменив ток дуги посредством изменения расстояния между мундштуком и изделием. Формула, описывающая эти кривые, имеет следующий вид:

$$U_0 = U_{x.x} + U_a - R_s I_0 - \frac{qv\gamma S}{I_0}.$$

При больших расстояниях от мундштука до изделия характеристика может проявиться полностью; при малых — только частично, согласно условиям существования. Нередко при эксперименте определяется лишь часть характеристики. Этим, вероятно, и объясняется разброс в экспериментальных данных [1, 2].

Передаточная функция дуги с плавящимся электродом. Предложенная модель позволяет по-



лучить передаточную функцию дуги с плавящимся электродом. Поскольку дуга как элемент электрической цепи является двухполюсником, то передаточная функция может быть представлена сопротивлением

$$W(p) = \frac{\Delta u(p)}{\Delta i(p)},$$

где $\Delta u(p)$ и $\Delta i(p)$ — отображения Лапласа для приростов напряжения и тока дуги. С учетом $U_0 = E l_0$ прирост напряжения пропорционален приросту длины дуги. Для нахождения последнего воспользуемся первым уравнением системы (4). В результате

$$W(p) = E \frac{S U_a + 2\rho(l_w - l_0)I_0}{\rho I_0^2} \frac{1}{\frac{q\gamma S^2}{\rho I_0^2} p + 1} = \frac{1}{\tau p + 1}.$$

Из этой формулы видно, что дуга плавящегося электрода в случае мелкокапельного переноса представляет собой апериодическое звено первого порядка, у которого коэффициент усиления составляет

$$k = E \frac{S U_a + 2\rho(l_w - l_0)I_0}{\rho I_0^2},$$

а характерное время

$$\tau = \frac{q\gamma S^2}{\rho I_0^2}.$$

При различных соотношениях параметров характерное время τ может изменяться от десятков миллисекунд до единиц секунд.

Устойчивость системы источник питания—дуга с плавящимся электродом. Исследования устойчивости этой системы можно разделить на два этапа: изучение ее статического состояния (изложено выше) и ее динамического поведения при малых отклонениях от статического состояния.

Для этого найдем матрицу Якоби для исследуемой системы (4)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial i} \frac{di}{dt} & \frac{\partial}{\partial l} \frac{di}{dt} \\ \frac{\partial}{\partial i} \frac{dl}{dt} & \frac{\partial}{\partial l} \frac{dl}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} (R_s + \rho \frac{l_w - l_0}{S}) & \frac{1}{L} (\frac{\rho}{S} I_0 - E) \\ \frac{S U_a + 2\rho(l_w - l_0)I_0}{q\gamma S^2} & -\frac{\rho I_0^2}{q\gamma S^2} \end{bmatrix}.$$

в окрестности статического состояния. Тогда характеристическое уравнение находится из условия $\det(J - \eta I) = 0$ и имеет вид (I — единичная матрица)

$$\begin{aligned} & q\gamma L S^3 \eta^2 + S[\rho L I_0^2 + q\gamma R_s S^2 + q\gamma \rho S(l_w - l_0)]\eta + \dots \\ & \dots + E U_a S^2 + \rho S I_0 [R_s J_0 - U_a - 2E(l_w - l_0)] - \\ & - \rho^2 I_0^2 (l_w - l_0) = 0, \end{aligned}$$

где η — собственные значения исследуемой системы.

Исходя из значений корней характеристического уравнения, можно определить характер локальной устойчивости динамической системы. Граничное условие, когда действительная часть собственных значений равна нулю, аналогично условию, когда коэффициент при η равен нулю, в нашем случае:

$$\rho L I_0^2 + q\gamma S^2 R_s + q\gamma \rho S(l_w - l_0) = 0. \quad (17)$$

Поскольку все слагаемые в формуле (17) имеют положительные значения, равенство не выполняется. Таким образом, система локально устойчива при всех сочетаниях параметров и ограничения остаются только для условий существования (9).

Численное моделирование и обсуждение результатов. Для того чтобы изучить динамику и устойчивость системы источник питания—дуга с плавящимся электродом, не ограничиваясь усло-

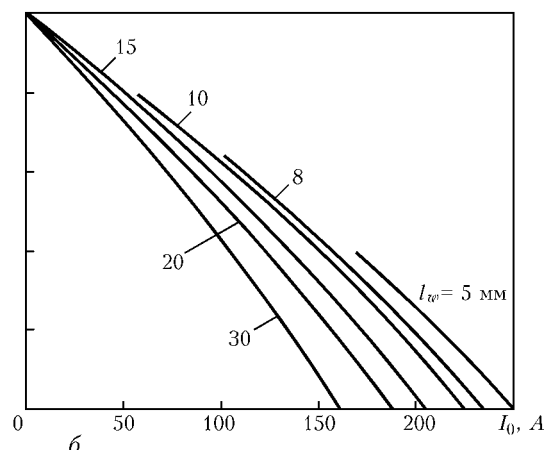
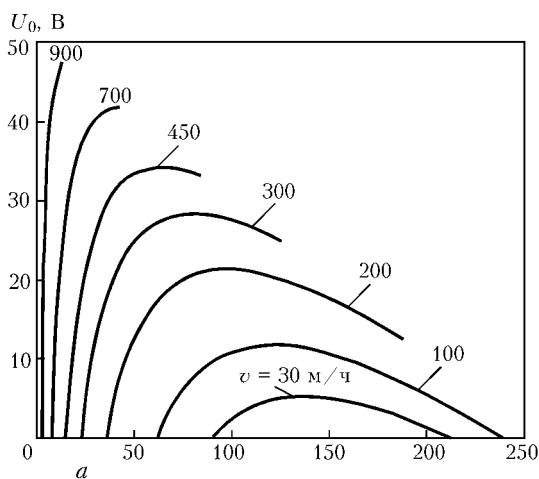


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики, полученные при изменении скорости v подачи электродной проволоки (а) и расстояния l_w между мунштуком и изделием (б)

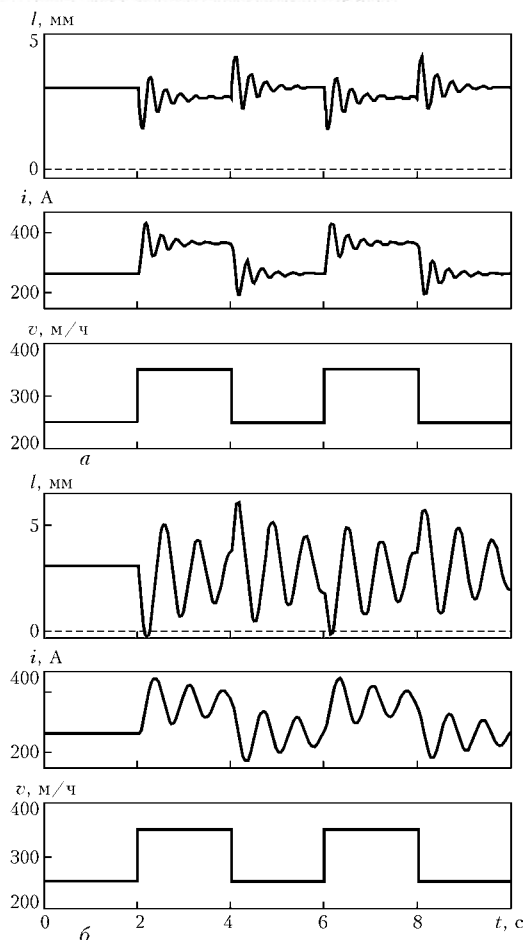


Рис. 8. Осциллограмма отработки возмущений по скорости подачи электродной проволоки системой источник питания–дуга с плавящимся электродом при $U_{x.x} = 55$ В, $R_s = 0,05$ Ом, $L = 1 \cdot 10^{-2}$ (а) и $5 \cdot 10^{-2}$ Гн (б)

виями локальности, предложенная модель (4) перенесена в программную математическую среду MATLAB Simulink. Были получены временные зависимости для переходных процессов. В качестве тестового рассмотрен случай возмущения системы по скорости подачи электродной проволоки. Исследования подтвердили правомерность сделанных выше выводов о локальной устойчивости системы. Хотя дуга плавящегося электрода является аperiodическим звеном, в составе электрической цепи она может иметь колебательный характер, особенно при больших значениях индуктивности L дросселя сварочной цепи и малых значениях балластного резистора R_s .

На рис. 8 показано, как система источник питания–дуга с плавящимся электродом обрабатывает

возмущение по скорости подачи электродной проволоки. Необходимо отметить, что при стационарной длине дуги колебательный процесс может привести к невыполнению условия существования дуги (9) в динамике (см. рис. 8, б), а это в свою очередь — к закорачиванию дугового промежутка и нарушению сварочного процесса.

Период (до 1 с) и амплитуда (десятки ампер) колебаний тока дуги при переходном процессе достаточно велики и могут стать причиной ухудшения качества сварного шва. Повлиять на эту ситуацию трудно. Индуктивность дросселя должна быть достаточно большой, чтобы сгладить выпрямленный ток. Увеличение сопротивления приводит к ухудшению энергетических характеристик процесса сварки, а также массогабаритных характеристик источника питания.

Один из выходов в данной ситуации — это применение обратных связей по напряжению и току дуги и замена процесса сварки на постоянном токе импульсно-дуговой сваркой.

Выводы

1. Предложенная модель системы источник питания–дуга с плавящимся электродом позволяет определить параметры процесса сварки и длину дуги, при которых процесс сварки осуществим.

2. Статическая вольт-амперная характеристика дуги с плавящимся электродом имеет возрастающий характер и существует в определенном диапазоне токов.

3. Полученная передаточная функция дуги показывает, что сварочную дугу с плавящимся электродом в случае мелкокапельного переноса можно рассматривать как аperiodическое звено первого порядка.

4. Локальная устойчивость не гарантирует нормальной отработки возмущений, возникающих в системе источник питания–дуга с плавящимся электродом. Возможно нарушение условий существования в динамике, т. е. при переходном процессе.

1. *Сварка в углекислом газе* / И. И. Заруба, Б. С. Касаткин, Н. И. Каховский, А. Г. Потапьевский. — Киев: Техника, 1966. — 291 с.
2. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
3. *Варуха Е. Н., Докторский Р. Я.* Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке // Свароч. пр-во. — 1991. — № 6. — С. 33–35.
4. *Цыбульский Г. А.* К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.

A mathematical description of the power source — consumable-electrode arc system is proposed. Conditions of static existence of the system are studied, allowing for the thermophysical characteristics of the parameters and variation of electrode stick-out

Поступила в редакцию 20.05.2004,
в окончательном варианте 05.07.2004



АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА СОЕДИНЕНИЯ И ПОЯВЛЕНИЯ ВЯЗКОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Р. ЧИРИЧ, канд. техн. наук (Высшая техн. школа, г. Чачак, Сербия и Черногория),
С. ЧАНТРАК, К. РАИЧ, доктора техн. наук (Белград. ун-т, г. Белград, Сербия и Черногория)

Рассмотрены явления, развивающиеся в процессе ротационной сварки трением с непрерывным приводом быстрорежущей стали Р6М5 с углеродистой сталью 60. Предложено и экспериментально проверено математическое выражение для расчета радиальных перемещений металла непосредственно до поверхности трения. Исследованы структура, фазовый и химический составы в вязком слое, плоскости трения и близлежащих зонах.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, быстрорежущая, углеродистая сталь, пластическая деформация, расчет перемещений, вязкий слой, механизм соединения, микроструктура, фазовый состав

Процесс ротационной сварки трением (СТ) с непрерывным приводом состоит из пяти фаз [1, 2]: начальное трение (I), нестабильное (II), стабильное (III), так называемая квазистационарная фаза, торможение (IV) и уплотнение-проковка (V). Установлено, что III фаза начинается тогда, когда слой, характеризующийся большой пластичностью и низкой прочностью, расширяется вдоль всей плоскости трения [2–8]. Считается, что в этой фазе устанавливается динамическое тепловое равновесие между количеством выделяемого тепла и тепла, переданного основному металлу (ОМ). В этой фазе, вследствие большой пластической деформации тонких контактных слоев ОМ, в плоскости трения достигаются максимальные температуры, самые низкие коэффициенты трения, ускоряются начатые диффузионные процессы и создаются условия для формирования слоя металла в вязком состоянии.

В отличие от однородных металлов при СТ материалов с разными теплофизическими особенностями наибольшая степень деформации наблюдается не на торцевых поверхностях ОМ, а внутри одного из них [9–11]. Эта особенность особенно выражена при СТ высоколегированных быстрорежущих сталей (полифазные материалы с более чем 20 % карбидной фазы) с двухфазными (перлитно-ферритными) углеродистыми сталями.

В последнее время предприняты попытки описания некоторых явлений, имеющих место в вязком слое в фазе так называемого динамического рав-

новесия при СТ однородных материалов [9, 12]. В то же время ни качественно, ни количественно не описан механизм течения вязкой жидкости с большей частью твердой фазы при СТ разнородных материалов быстрорежущих сталей с углеродистыми сталями.

Целью настоящей работы является количественное измерение параметров пластической деформации непосредственно вблизи плоскости трения, описание механизма соединения быстрорежущих сталей с углеродистыми сталями в фазе трения (прежде всего в III фазе), а также изучение физики процесса в вязком слое и близлежащих зонах.

Материал и методика эксперимента. Для сварки использованы образцы диаметром 10 мм из быстрорежущей стали Р6М5 и стали марки 60 (табл. 1). Химический состав этих сталей приведен в табл. 2. Материалы сваривали между собой ротационной СТ с непрерывным приводом (рис. 1). Параметры процесса СТ следующие: давление трения $P_t = 80$ МПа; время трения V_t , с (разное); частота вращения ω (в эксперименте $\omega = \text{const} = 2850 \text{ мин}^{-1}$). Параметры в фазе проковки: давление P_p , МПа; время V_s , с. В эксперименте вращался образец из стали Р6М5.

На экспериментальных образцах выполнен количественный и качественный анализ испытания слоев в области плоскости трения, зоны непосредственно возле плоскости трения (зона высокой

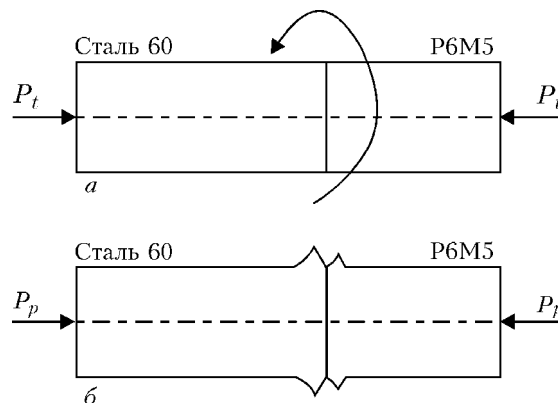


Рис. 1. Схема процесса ротационной СТ с непрерывным приводом в фазе трения (а) и уплотнения-проковки (б)

Таблица 1. Сравнительные обозначения используемых сталей

Марка стали	EN	DIN	W.Nr	AISI/AE
Р6М5*	HS 6-5-2	S 6-5-2	1.3343	611.M2
60	C-60	C-60	1.0601	—

* Производителем используемой быстрорежущей стали под маркой М-2 является «Comentrien», Франция.

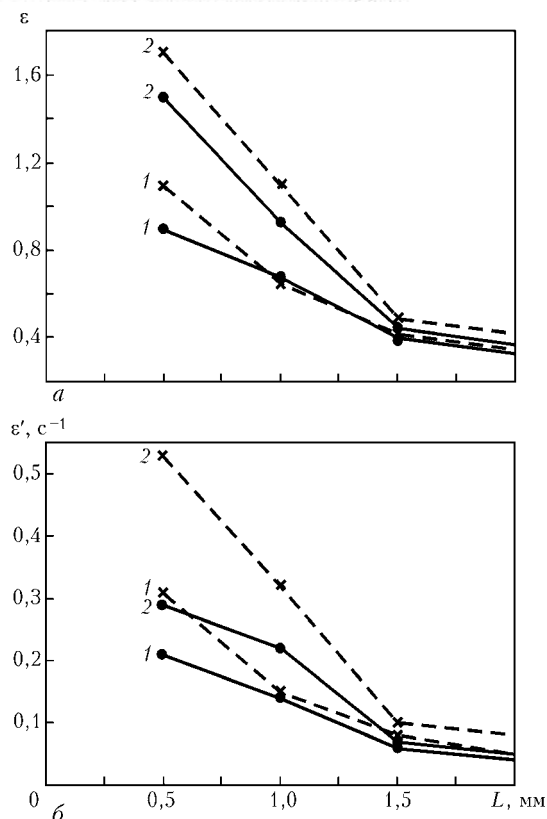


Рис. 2. Степень (а) и скорость (б) деформации в стали Р6М5 на различном удалении L от поверхности трения в точках, первоначально удаленных от оси вращения на 2,5 (кривые 1) и 4 мм (кривые 2), при $V_t = 10$ с (сплошная) и 12,5 с (штриховая)

пластичности) и вязкого слоя. С целью определения характера и степени пластической деформации непосредственно возле плоскости трения выполнены измерения и расчет сдвига частиц основных материалов в фазе трения, а также расчет параметров пластической деформации. На базе детального металлографического анализа и общих исследований описан механизм соединения стали Р6М5 и стали 60 в фазе трения, прежде всего в III фазе процесса.

В рамках экспериментальных исследований с помощью метода оптической и количественной оптической микроскопии, электронной микроскопии, энергодисперсионного (ЭДС) анализа изучены процессы, протекающие в вязком слое и соседних зонах.

Влияние параметров СТ стали Р6М5 и стали 60 на характер пластической деформации слоев непосредственно возле плоскости трения. Основной целью эксперимента является измерение степени пластической деформации стали Р6М5 в области плоскости трения в фазе трения при различных параметрах СТ. У образцов диаметром

10 мм в продольно просверленные отверстия диаметром 0,7 мм на различном расстоянии от оси вращения вставлены медные проводники того же диаметра. В процессе сварки вместе с основным материалом перемещались и вставленные проводники. После сварки с двух основных материалов снимали тонкие слои металла, затем измеряли радиальные и тангенциальные перемещения отверстий (проводников) в сравнении с положением до сварки. По этой методике определены сдвиги на расстоянии 0,5 мм и более от линии соединения. Измерение сдвигов в зонах, находящихся возле линии соединения, было невозможным из-за большой деформации приконтактных слоев металла.

Поворот проводника между соседними плоскостями (поперечными разрезами образца), удаленными между собой на расстояние 0,5 мм, определен в радиальном направлении с помощью прироста диаметра Δr , а в тангенциальном — изменением длины дуги $\Delta s = r\Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ — прирост угла поворота проводника на длине $\Delta l = 0,5$ мм.

Общий относительный поворот (сдвиг) определен отношением

$$\gamma = \operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta s)^2}}{\Delta l}. \quad (1)$$

Относительное удлинение ϵ и скорость деформации ϵ' определены выражениями [13]

$$\epsilon = (\gamma + \sqrt{1 + \gamma^2})^{1/(1-k)}, \quad (2)$$

$$\epsilon' = \frac{\Delta\epsilon}{V}, \quad (3)$$

где k — коэффициент деформации сдвига ($k = -1$); $\Delta\epsilon$ — прирост относительной деформации по длине; V — время укорачивания образцов на величину Δl , равное $\Delta l/i$; i — скорость укорачивания испытуемого образца в фазе трения при сварке, мм/с.

На рис. 2 на базе экспериментальных результатов с помощью уравнений (1)...(3) приведены значения степени деформации (относительных удлинений), а также скорости деформации стали Р6М5 в фазе трения. На основании результатов измерений отмечено, что радиальные и тангенциальные сдвиги металла в измеряемых точках возрастают по мере приближения к линии соединения с увеличением начального удаления отверстия (проводника) от оси поворота, а также с возрастанием P_t и V_t .

Радиальные сдвиги измеряемых точек при используемых режимах СТ больше, чем тангенциальные, причем отношение $\Delta r/\Delta s$ возрастает с увеличением расстояния от оси ротации. Возрастание

Таблица 2. Химический состав и твердость основных материалов

Сталь	Массовая доля элементов, %									Твердость HВ
	С	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	S	P	
Р6М5*	0,86	Не опр.	Не опр.	4,07	6,03	4,75	1,82	0,0036	0,0137	260...272
60	0,63	0,194	0,82	0,0036	0,00273	—	—	Не опр.	Не опр.	Не опр.

* В состоянии после отжига.

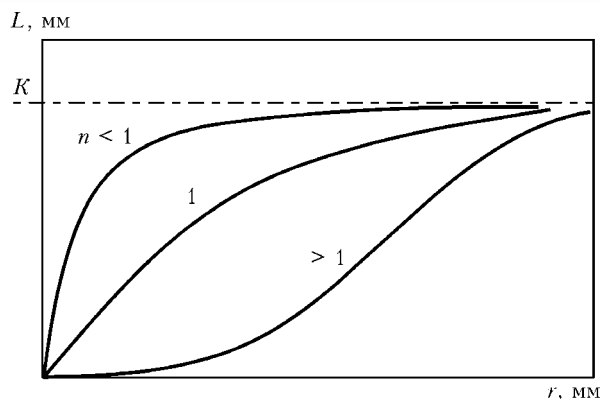


Рис. 3. Графики функции (4) при разных значениях n

значения радиальных перемещений по сравнению с тангенциальными объясняются последствиями СТ с большой частотой вращения, в результате чего уменьшается «закручивание» металла по глубине, при этом деформация осуществляется в более тонком слое металла. Вместе с тем из-за небольшого диаметра основного материала (10 мм) текучесть металла в радиальном направлении облегчена.

Степень и скорость деформации возрастают как с увеличением V_t и начального удаления измеряемой точки от оси поворота, так и с приближением к линии соединения. На расстоянии 0,5...1 мм от соединения обеспечивается относительно высокая степень пластической деформации стали Р6М5 ($\epsilon = 0,45...1,51$).

Таким образом, при постоянном давлении и скорости трения с увеличением времени трения в основном возрастают параметры пластической деформации (Δr , Δs , γ , ϵ , ϵ'). При $V > 13,5$ с процесс входит в так называемую квазистационарную фазу трения, в которой температурно-деформационные условия существенно не изменяются.

Измерение и расчет перемещений непосредственно возле плоскости трения в стали Р6М5. В ходе работы определяли выражение для расчета перемещений вследствие тепловой деформации в III фазе процесса СТ непосредственно возле плоскости трения в стали Р6М5. Измерение перемещения выполнено в области, удаленной от плоскости трения на 0,4 мм. Последняя удалена на 0,1 мм от линии соединения стали Р6М5 со сталью 60 и находится в стали Р6М5. В то же время точное измерение перемещения в области, удаленной менее чем на 0,2 мм от соединения (т. е. на 0,1 мм от плоскости трения), невозможно из-за влияния других факторов, таких, как положение подвижной ротационной плоскости; наличие вязкого слоя; наваренного слоя; зоны смешивания; растворения карбидной фазы; высокой легированности аустенитной фазы и др.

На базе детального экспериментального анализа принято следующее общее уравнение типа ЖМАК [14–21], описывающее течение материала, т. е. перемещение карбидной фазы в фазе трения (рис. 3):

$$L = L(r, r_0, k, n) = K \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{r - r_0}{k(r_0)} \right)^n \right] \right), \quad (4)$$

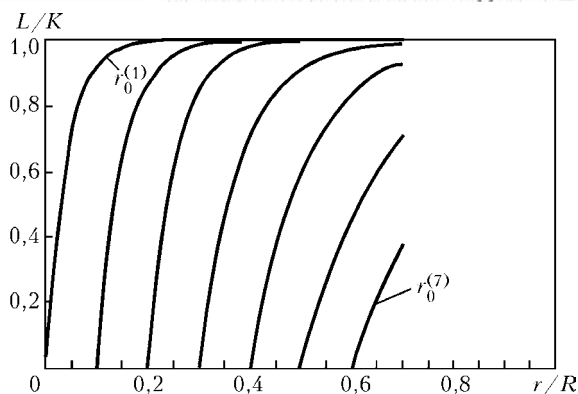


Рис. 4. Радиальные перемещения карбидных полос в стали Р6М5 на различном удалении от плоскости трения и начального удаления от оси вращения

где L — удаленность от начального положения плоскости, мм; r_0 — начальное удаление карбидной линии от оси вращения при $L = 0$; $k(r_0)$ — константа, определяющая наклон кривой (горизонтальная проекция тангенты при пересечении оси r с асимптотой (плоскостью трения)); K — начальное удаление измеряемой плоскости от плоскости трения ($K = 0,4$ мм); n — Аврами экспонента [14–22]; $n \in Q$, $n \in R$, $n > 0$.

В выражении (4) не рассматриваются перемещения в тангенциальном направлении, которые в соответствии с результатами собственных измерений значительно меньше, чем радиальные [12].

В соответствии с работами [19–27] на базе многочисленных экспериментальных значений зависимости $\log R = f(\log \epsilon')$ для быстрорежущих сталей [28] (где R — прочность) и на основании собственных результатов показано, что при экспоненте $n \approx 1$ выражение (4) имеет вид

$$L = L(r, r_0, k) = K \left(1 - \exp \left[- \frac{r - r_0}{k(r_0)} \right] \right). \quad (5)$$

Точность выражения (5) проверена экспериментально на базе анализа поворота карбидных полос у образцов, выполненных на разных режимах СТ. Определена прямая зависимость наклона кривых от начального радиального удаления карбидной полосы от оси вращения, т. е. от $k(r_0)$. Полученные результаты можно представить как семейство кривых с различными значениями $k(r_0)$ (рис. 4).

На основе анализа экспериментальных и расчетных данных, а также их сравнения, можно сделать предварительные выводы:

полученное выражение (5) дает возможность расчета семейства кривых зависимости радиальных перемещений от удаления от плоскости трения и начального радиального удаления от оси вращения (рис. 5);

в соосной области образца радиальные перемещения Δr возрастают по мере приближения плоскости трения, а также с увеличением начального расстояния от оси вращения r_0 и асимптотически приближаются к конечному значению. В этой области действительно выражение (5);

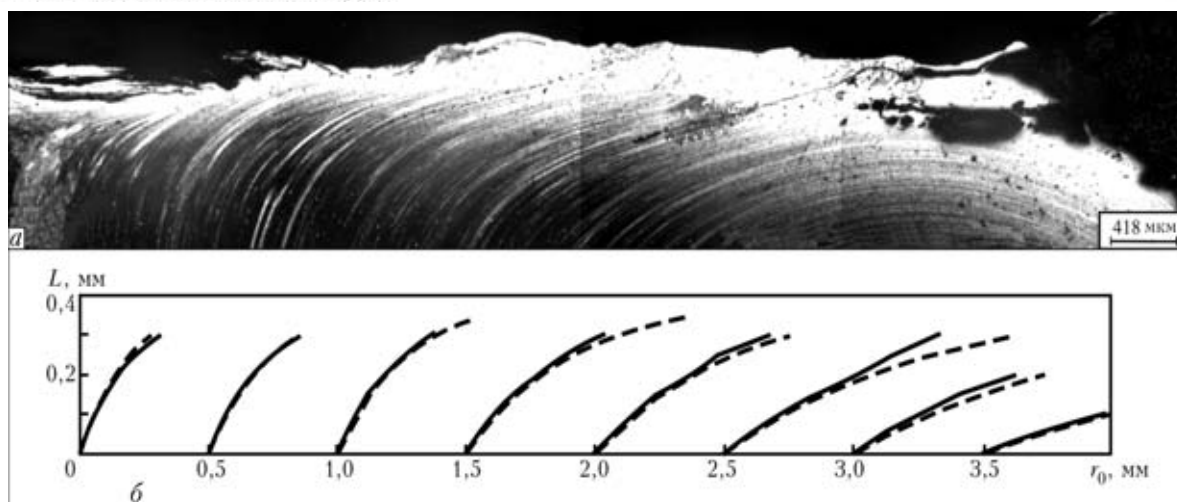


Рис. 5. Микроструктура стали Р6М5 в области плоскости трения (а); радиальные перемещения ($\Delta r = r - r_0$) на различном удалении от плоскости трения L и различном удалении от оси вращения r_0 (б) (режим СТ: $V_t = 10$ с, без проковки): сплошная кривая — экспериментальные данные; штриховая — расчетные

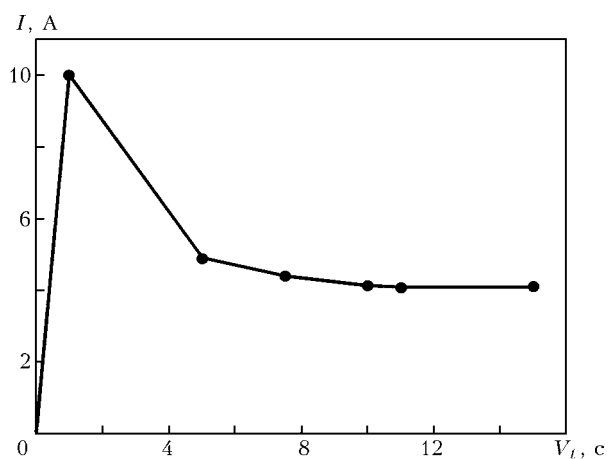


Рис. 6. Зависимость силы тока мотора (момента трения) от времени трения V_t при СТ стали Р6М5 со сталью 60

в областях, близких к внешней (цилиндрической) поверхности образца, существует граница «перевала». При этом непосредственно до точки «перевала» действует выражение (5). За ней продолжается перемещение карбидных полос в радиальном направлении, где они уже удаляются от плоскости трения;

закономерности перемещения материала в основной области после асимптотического приближения к плоскости трения не анализированы математически. Считается, что в этой области твердые частицы (карбиды, неметаллические включения и др.) попадают в зону вязкого слоя. Их дальнейшее перемещение развивается по закономерности движения твердых частиц в вязком материале. Считается, что неметаллические включения после попадания в зону вязкого слоя очень быстро перемещаются в тангенциальном направлении, частично захватываются микрообъемами металла, так что их вытеснение из зоны трения (асимптотическая плоскость) или их задержание в ней зависит от многих факторов. Изучение процесса перемещения и вытеснения вне плоскости трения нежелательных фазовых составляющих (например, неметалличес-

ких включений) имеет большое практическое значение.

Механизм соединения стали Р6М5 со сталью 60 в фазе трения. Физическая модель рассматриваемого процесса ротационной СТ с непрерывным приводом в фазе трения основывается на трении торцевых поверхностей двух цилиндров, один из которых (из стали Р6М5) вращается с большой скоростью под большим аксиальным давлением и в условиях возможного свободного вытекания материала в радиальном направлении. Процесс характеризуется быстрым повышением температуры и деформации в радиальном, тангенциальном и аксиальном направлениях в зависимости от назначаемых параметров процесса и особенностей ОМ [11, 29].

В начале I фазы ротационной СТ с непрерывным приводом наблюдается формирование первых соединений между сталью Р6М5 и сталью 60, их разрыв и перенос частиц стали Р6М5 на сталь 60 [3, 7, 30]. Из-за относительно большой скорости трения и относительно большого давления в аксиальном направлении, т. е. меньшей объемной скорости и деформации по большей глубине в центральной части образца, со стали Р6М5 на сталь 60 переносятся более крупные частицы. В дальнейшем процесс соединения в плоскости трения развивается между перенесенными крупными частицами стали Р6М5 и оставшейся их частью, доходит до их деформации со сложной траекторией движения частиц и параллельно до их вытеснения вне плоскости трения [3, 7]. Вследствие быстрого увеличения контактной поверхности момент трения уже в начале I фазы достигает максимального значения (рис. 6), что приводит к повышенному выделению тепла и увеличению температуры в плоскости трения.

Во II фазе процесса трения металл в контактной зоне в условиях высоких температур, повышенной глубины зоны, нагретой до высокой температуры, и уменьшенного сопротивления к пластической деформации деформируется с высокой степенью. С изменением термомодеформационных условий меняется и характер течения металла в высокопластич-

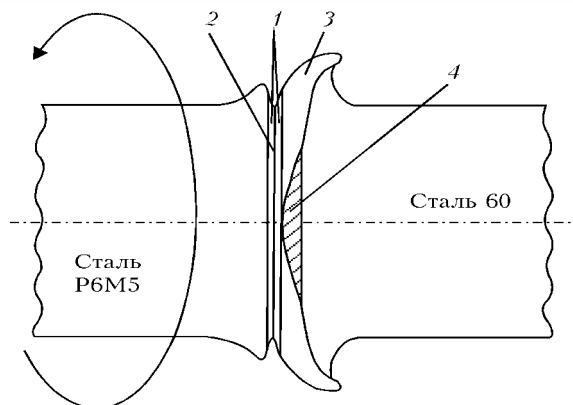


Рис. 7. Схема характерных зон в области плоскости трения (III фаза) процесса СТ стали Р6М5 со сталью 60: 1 — вязкий; 2 — карбидный слой ($d = 0,001...0,006$ мм), сформированный возле плоскости трения; 3 — слой стали Р6М5, наваренный на сталь 60; 4 — зона смешивания

тичных зонах. При этом в области, непосредственно прилегающей к плоскости трения, высокопластичный металл перемещается по механизму не только вращательного, но и вихревого (ламинарного и турбулентного) течения. И если вращательное течение обусловлено природой физической модели процесса, то турбулентное большей частью является следствием особенностей ОМ. Сталь Р6М5 является материалом, содержащим примерно 20 % карбидной фазы, с карбидными выделениями разного вида и размера. Перемещения высокопластичных частиц стали Р6М5 в слое, наваренном на сталь 60, и в оставшейся части стали Р6М5 вызывают и перемещения твердых частиц карбидной фазы. С удлинением фазы трения доля карбидной фазы уменьшается из-за растворения в твердом растворе и задержки на вращающейся стороне плоскости трения [9–11]. Другая важная причина появления турбулентного течения — существование в высокопластичной зоне смешанных частиц обоих ОМ с различными механическими и теплофизическими особенностями. С увеличением времени трения уменьшается влияние двух приведенных факторов, а влияние природы самого процесса на вид турбулентного течения возрастает. III фаза начинается, когда слой стали Р6М5 высокой пластичности и низкого сопротивления к тепловой пластической деформации расширится по всей плоскости трения. Пластическая деформация в этой фазе в основном развивается в тонких приконтактных слоях стали Р6М5, а между количеством развитого тепла и тепла, переданного ОМ, устанавливается равновесие [9]. Из-за высокой степени деформации, так называемого полирования тонких контактных слоев стали Р6М5, в них достигаются максимальные температуры и состояние высокой пластичности [2, 4], вследствие которых коэффициент трения и момент трения снижаются до нижнего постоянного уровня. В этой фазе процесса СТ стали Р6М5 со сталью 60 начавшиеся диффузионные процессы ускоряются и ограничивают условия для смешивания частиц ОМ, а в плоскости трения формируется слой металла в вязком состоянии [9, 30]. В начальной фазе формирования в вязком слое находится более 10 %

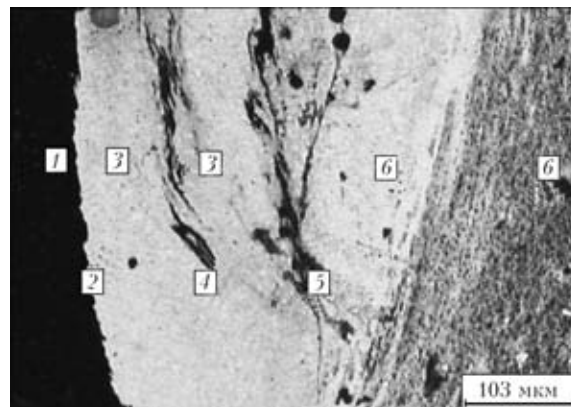


Рис. 8. Микроструктура в характерных зонах в области плоскости трения стали Р6М5 со сталью 60 (без проковки; $V_t = 12$ с): 1 — сталь 60; 2 — линия соединения стали Р6М5 со сталью 60; 3 — слой из стали Р6М5, наваренный на сталь 60; 4 — частицы стали 60, оставшиеся в слое из стали Р6М5, наваренном на сталь 60; 5 — плоскость трения; 6 — сталь Р6М5

частиц твердой карбидной фазы. В то же время с удлинением процесса доля нерастворенных карбидов уменьшается вследствие растворения в твердом растворе, задержания на границе вязкого слоя на вращающейся стороне [9] и вытеснения вне плоскости трения. При этом карбиды, задержанные на торцевой поверхности вращающегося образца из стали Р6М5, формируют довольно ровный фронт карбидов на плоскости трения. Схема характерных зон в области плоскости трения в III фазе процесса СТ стали Р6М5 со сталью 60 приведена на рис. 7.

В соответствии с описанным выше механизмом соединения испытываемых сталей можно сделать вывод, что в стали Р6М5 формируется зона смешивания (рис. 7, зона 4) толщиной 50...150 мкм, в которой начинается смешивание частиц обоих ОМ, а также наблюдается деформация высокого уровня. Эта зона после охлаждения на воздухе имеет мартенситно-аустенитно-карбидную структуру высокой прочности (рис. 8). Указанная зона наблюдается в слое из стали Р6М5, наваренном на сталь 60 (рис. 7, слой 3), и находится в контакте со слоем стали Р6М5 с другой стороны вращающейся плоскости трения (рис. 8). Последняя может иметь и волнистый вид, что свидетельствует о том, что в процессе фазы трения соединяемый материал в определенной мере перемещался турбулентно (рис. 9). Более подробные объяснения

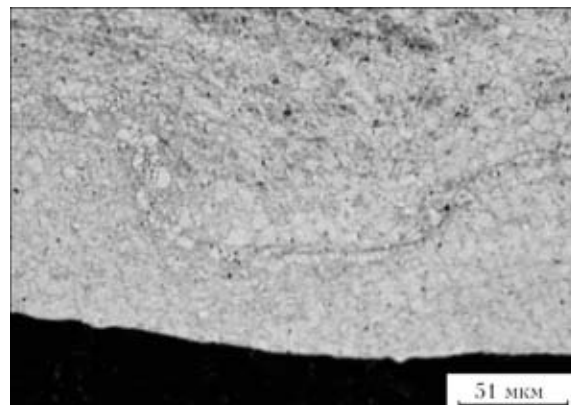


Рис. 9. Микроструктура стали Р6М5 в области плоскости трения

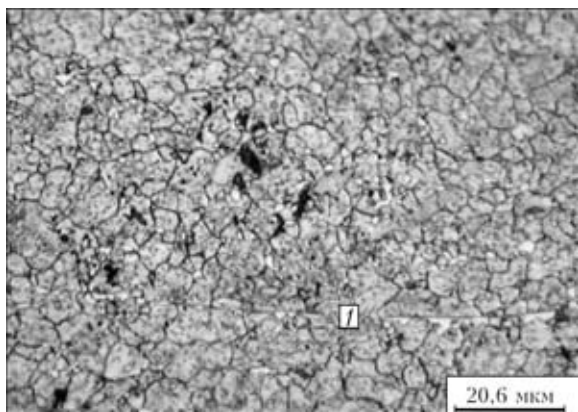


Рис. 10. Микроструктура металла соединений в области плоскости трения со сформированной карбидной плоскостью (1) (СТ без проковки, $V_t = 18$ с)

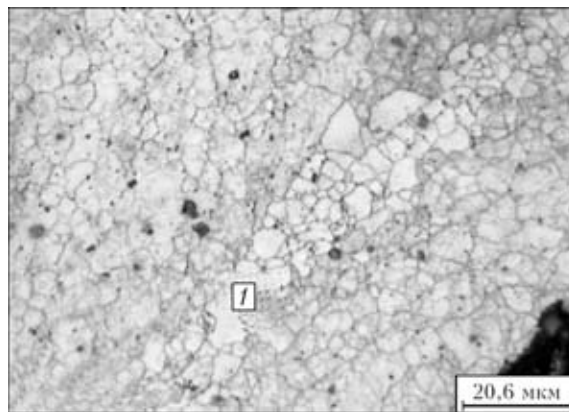


Рис. 11. Микроструктура вязкого слоя (1) (СТ без проковки, охлаждение на воздухе)

возникновения наваренного слоя даны в работе [12].

Часто в области плоскости трения на торцевой поверхности вращающегося образца из стали Р6М5 в процессе СТ формируется карбидный слой с ровным фронтом в плоскости трения, в то же время с обратной стороны карбиды втиснуты в образец из стали Р6М5 (рис. 10). Со стороны слоя из стали Р6М5, наваренном на образец из стали 60, который не вращался, существование сплошной или непрерывной карбидной плоскости не наблюдается.

С обеих сторон плоскости трения установлено наличие узкого слоя с низкой частью карбидной фазы и более крупным кристаллическим зерном по сравнению с соседними зонами (рис. 11). В соответствии с результатами, приведенными в работах [9, 30], указанный слой появился в процессе охлаждения вязкого, сформированного в III фазе СТ.

Исследование процессов, протекающих в вязком слое и соседних зонах. С помощью метода оптической и количественной оптической микроскопии, электронной микроскопии и ЭДС анализа выполнено детальное исследование микроструктуры, а также анализ химического и фазового составов в области сварного соединения, особенно в области вязкого слоя и плоскости трения. Анализ в основном охватывает явления в III фазе трения процесса СТ.

Микроструктура вязкого слоя. В соответствии с данными, изложенными в работах [9, 30] и собственными результатами, в III фазе процесса СТ в области плоскости трения формируется слой металла в вязком состоянии (рис. 12). Эта зона представляет собой граничный слой, и процессы, возникающие в нем, могут рассматриваться как течение непрерывной среды в граничном слое.

После III фазы трения и охлаждения на воздухе (затверждение и трансформация в твердом состоянии) вязкий слой представляет собой узкий слой с обеих сторон плоскости трения с более низким содержанием карбидной фазы по сравнению с соседними слоями. Вязкий слой, особенно в центральной области образца, разделен четко выраженной плоскостью трения (вращающейся плоскостью) на две части. Непосредственно возле вращающейся плоскости трения со стороны стали

Р6М5 часто формируется карбидный слой, так называемая карбидная плоскость.

В условиях СТ вязкий слой в центральной части образца формируется в большинстве случаев параллельно или почти параллельно оси вращения (рис. 12, а–в), в то время как в удаленных частях образцов он формируется под определенным углом (радиусом) по отношению к оси вращения (рис. 12, г, д). Это указывает на то, что в фазе трения вместе с вращательным и ламинарным течением в вязком слое происходит течение массы вязкого металла и по другому механизму.

Испытания на электронном микроскопе («JSM-5300», производство «JEOL», Япония) показали, что с обеих сторон плоскости трения формируется вязкий слой определенной ширины, в котором вязкая масса металла и твердые карбидные частицы движутся по сложной траектории. Замечено, что после затверждения (рис. 13) металл находился в твердожидком (вязком состоянии) с относительно низкой вязкостью. Такое состояние металла приводит к задержанию твердых карбидных и других частиц в вязкой сети двухфазного твердожидкого металла (рис. 14).

Таким образом, непосредственно возле плоскости трения, в зоне, подвергнутой большой пластической деформации, наблюдали частичный или полный отрыв отдельных карбидных и других частиц из своего начального положения и их поворот на определенный угол параллельно плоскости трения. На рис. 15 видны углубления около частично вырванного карбида, которые могут быть сформированы в сложном процессе пластической деформации высокой степени или зоны, из которой предварительно вырвана карбидная или какая-либо другая твердая частица.

Исследования, выполненные в непосредственной близости и в самой плоскости трения, указывают на присутствие отдельных некарбидных частиц.

Результаты ЭДС анализа. Параллельно с анализом микроструктуры методом ЭДС (прибор «Link — DX 2000», производитель «Oxford institut», Англия) выполнен анализ состава металла в области, удаленной на 1 мм от оси образца (оси вращения), в области плоскости трения и в зоне смешивания обоих ОМ, а также анализ отдельных

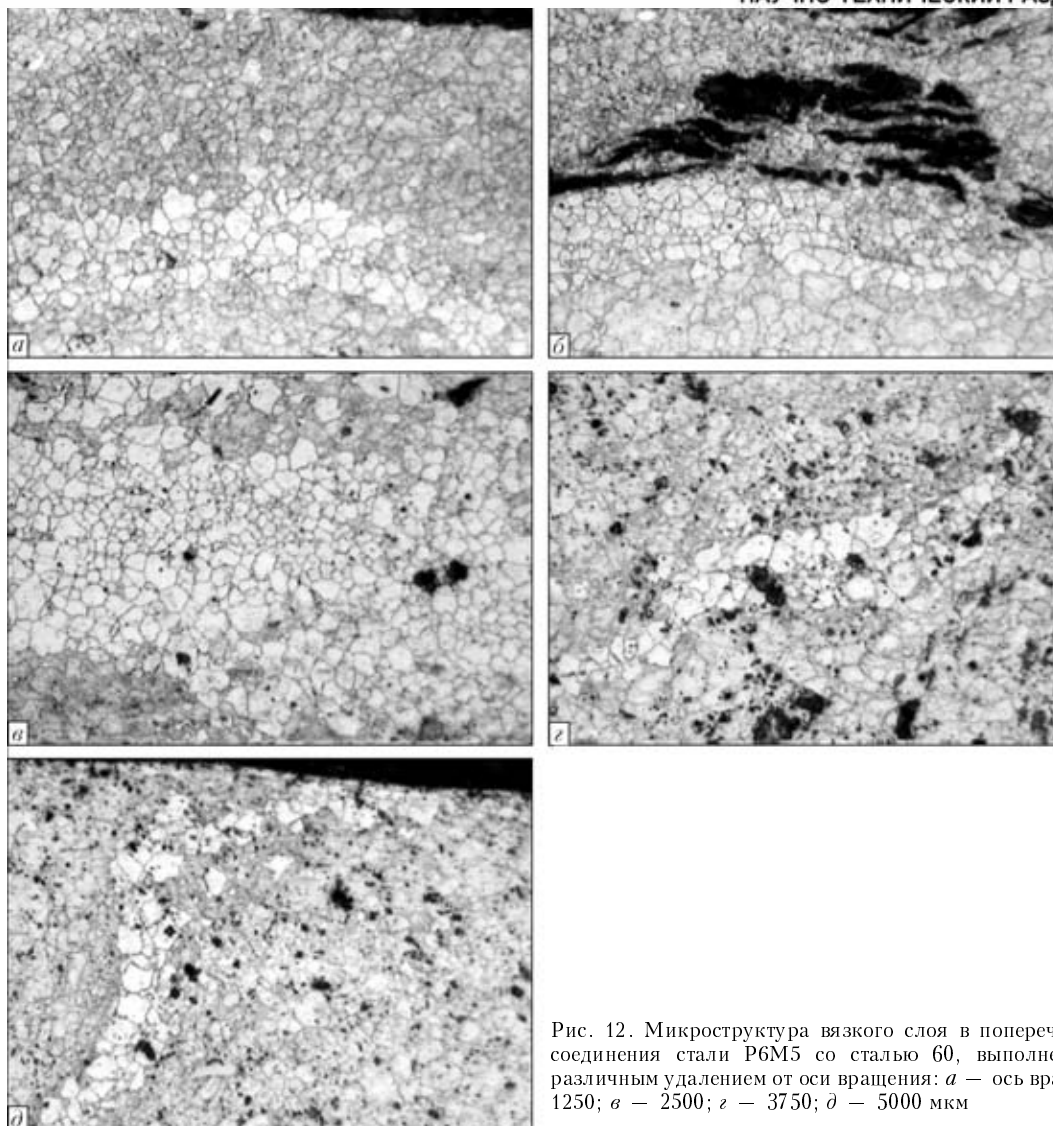


Рис. 12. Микроструктура вязкого слоя в поперечном сечении соединения стали Р6М5 со сталью 60, выполненного СТ с различным удалением от оси вращения: *а* — ось вращения; *б* — 1250; *в* — 2500; *г* — 3750; *д* — 5000 мкм

частиц в непосредственной близости и в самом вязком слое. Режим СТ: $V_t = 15$ с, без проковки, охлаждение на воздухе.

Результаты ЭДС показывают, что вязкий слой непосредственно возле плоскости трения содержит те же легирующие элементы, что и легированный ОМ (сталь Р6М5), в то время как химический состав зоны смешивания может отличаться в нап-

равлении от одной до другой мерных точек, и в отдельных точках указывает на значительную часть стали 60 в металлической основе зоны. ЭДС спектры отдельных частиц в области плоскости трения в стали Р6М5 показывают, что они легированы ванадием (возможно карбиды VC [11]). Подтверждено присутствие включений, легированных алюминием и кремнием.



Рис. 13. Микроструктура металла соединения в области плоскости трения, $\times 5000$

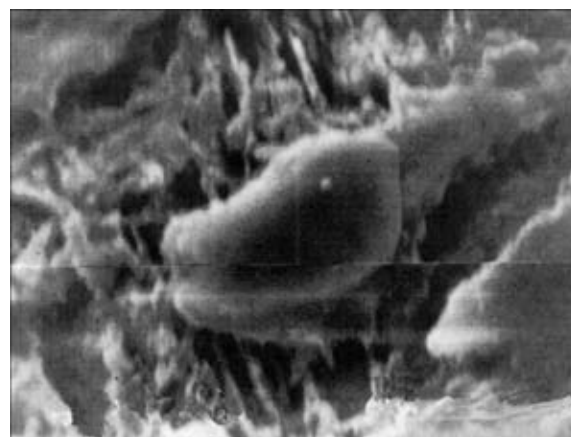


Рис. 14. Карбидная частица, задержанная в вязком слое, $\times 7500$



Рис. 15. Иллюстрация отрыва карбидной частицы из твердого раствора в процессе СТ, $\times 7500$

Таблица 3. Объемная доля и средний размер карбидных частиц в соединении стали Р6М5 и стали 60, выполненном СТ

Зона	Объемная доля нерастворенных карбидов, %	Средний размер карбидных частиц, мкм
Плоскость трения	24,05	0,93829
Вязкий слой (вне плоскости трения)	5,70	0,63780
Зона смешивания обоих ОМ	9,38	0,97125
ЗТВ в стали Р6М5	10,43	0,91381
ОМ в стали Р6М5	26,90	0,63597

Таблица 4. Средний размер аустенитного зерна в выбранных зонах

Зона	Средний размер аустенитного зерна, мкм
Вязкий слой	2,96131
Зона смешивания стали Р6М5 и стали 60	3,46284
Металл ЗТВ в стали Р6М5	2,66309

Доля и размеры карбидной фазы и аустенитного зерна. Целью испытаний являлось измерение доли и размеров карбидной фазы и аустенитного зерна в вязком слое и соседних зонах. Испытание образцов, полученных в процессе СТ стали Р6М5 со сталью 60 ($V_t = 15$ с, без проковки, охлаждение на воздухе), выполнено на приборе для анализа изображений типа «Quantimet 500 MC» фирмы «Leica» с помощью оптического микроскопа.

Доля, размер и расположение карбидных частиц влияют на характер процесса в характерных зонах, и наоборот. Так, нерастворенные карбиды как твердые частицы в твердожидком металле (вязком слое) и в высокопластичных зонах (вне его) могут иметь значительное влияние на характер движения металла. В то же время термодинамические условия значительно влияют на явления растворения и возможные механические разрушения карбидной фазы и др.

Объемная часть нерастворенных карбидных частиц после СТ без проковки измерена на удаленности 1 мм от оси вращения в вязком слое, плоскости трения, зоне смешивания обоих ОМ, металле ЗТВ стали Р6М5 и стали Р6М5 вне металла ЗТВ. Средняя измеренная доля карбидной фазы и средний размер карбидных частиц в характерных зонах приведены в табл. 3, плотность вероятности распределения карбидных частиц по размеру — на рис. 16.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наибольшая объемная доля карбидной фазы наблюдается в стали Р6М5 вне металла ЗТВ (26,90 %). В последней непосредственно возле вязкого слоя термодинамические условия в процессе СТ вызывают растворение большей части карбидной фазы (остается 10,43 %), что значительно меньше по сравнению с содержанием в

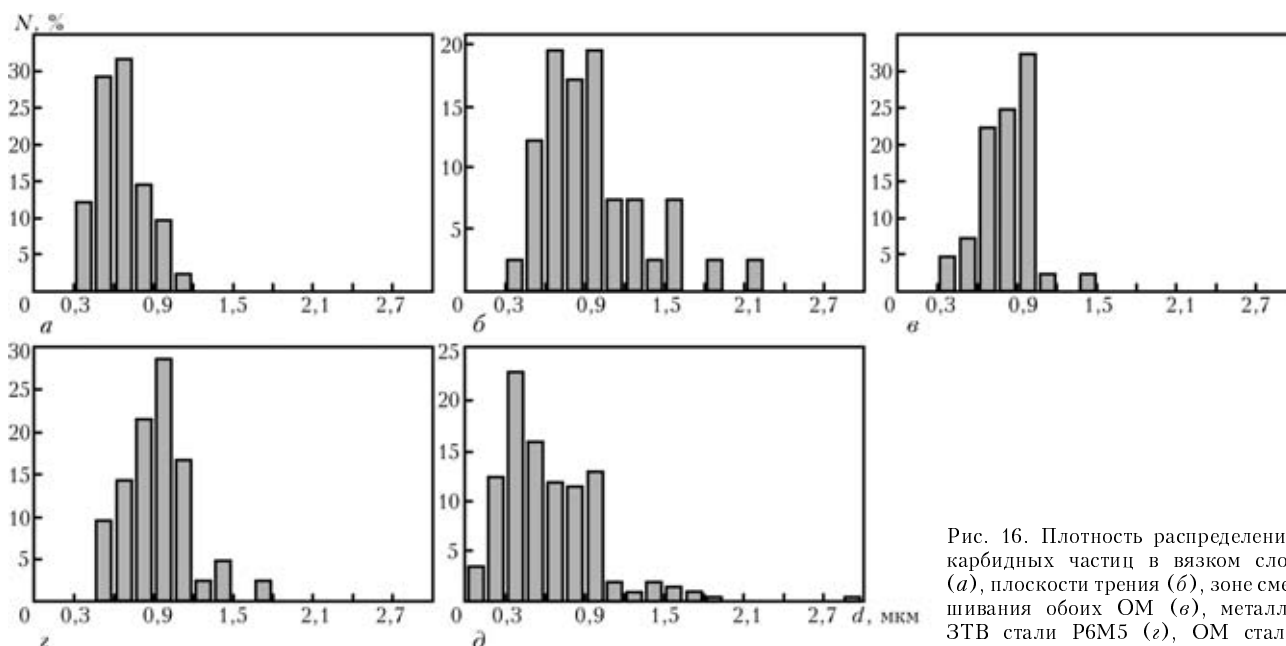


Рис. 16. Плотность распределения карбидных частиц в вязком слое (а), плоскости трения (б), зоне смешивания обоих ОМ (в), металле ЗТВ стали Р6М5 (г), ОМ стали Р6М5 (д)

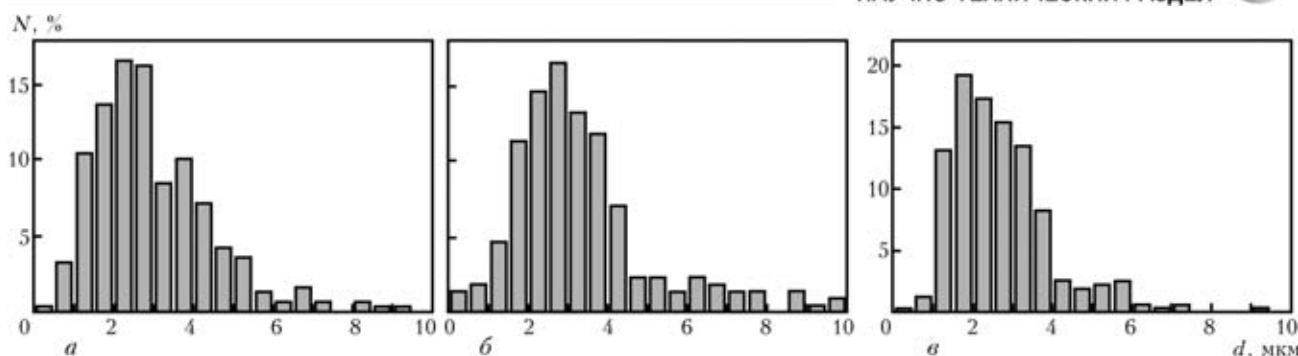


Рис. 17. Плотность распределения от размера аустенитного зерна в металле ЗТВ в вязком слое (а), зоне смешивания стали Р6М5 и стали 60 (б), металле ЗТВ стали Р6М5 (в)

ОМ (сталь Р6М5). Еще меньшая часть карбидной фазы (9,38 %) наблюдается в зоне смешивания обоих ОМ, что является следствием дополнительного смешивания частиц обоих ОМ. Наименьшая доля карбидов содержится в вязком слое (5,70 %), что почти в 5 раз меньше, чем в стали Р6М5. В то же время часть карбидов в плоскости трения в вязком слое составляет 24,05 % (почти на уровне содержания карбидов в стали Р6М5 и значительно ниже, чем в других соседних зонах). Замечено, что карбиды в указанной плоскости большей частью ориентированы параллельно плоскости трения. Полученные результаты указывают на вероятность того, что увеличение карбидной фазы в самой плоскости трения является следствием задержания карбидных частиц в вязком металле возле самой плоскости трения, с одновременным снижением доли карбидной фазы в остальных зонах.

В среднем карбидные частицы в характерных зонах металла ЗТВ в стали Р6М5 и зоне смешивания обоих ОМ крупнее, чем в ОМ. Причиной этого является растворение более мелких карбидов в твердом растворе в процессе СТ. В то же время наличие большей части небольших карбидов в вязком слое может быть следствием задержания большей части более крупных непосредственно возле самой плоскости трения и мелких нерастворенных частиц в вязком слое. Результаты измерения распределения карбидной фазы дают возможность расчета и прогнозирования некоторых процессов, возникающих в фазе трения в процессе СТ.

Измерено средний размер и распределение аустенитного зерна после СТ ($V_t = 15$ с, без проковки, охлаждение на воздухе) на удаленности 1 мм от оси вращения в вязком слое, зоне смешивания и металле ЗТВ в стали Р6М5 (табл. 4, рис. 17).

Из таблицы видно, что среднее зерно аустенита после фазы трения и охлаждения на воздухе (без проковки) самое большое в зоне смешивания стали Р6М5 и стали 60. В этой зоне наблюдается самая низкая степень легирования и самая низкая сопротивляемость росту зерна. Среднее аустенитное зерно в вязком слое немного крупнее по сравнению с аустенитным зерном в наиболее нагретых зонах металла ЗТВ непосредственно возле вязкого слоя. На формирование измеренного зерна аустенита в вязком слое влияла низкая доля нерастворенной карбидной фазы, термодинамические условия, и в значительной мере природа самого вязкого

слоя. В процессе фазы трения вязкий слой состоит из аустенита и карбидов, возможно появление δ -феррита. В соответствии с диаграммой состояния [31] при температуре 1260 °С существуют карбиды типа M_6C и MC , при 1360 °С — вместе с аустенитом и δ -ферритом существует расплав без присутствия нерастворяемых карбидов, а свыше 1430 °С — расплав.

На основании анализа фазового состава вязкого слоя после охлаждения (мартенсит и аустенит с низкой долей карбидной фазы) можно сделать вывод, что температура в вязком слое в течение фазы трения находилась в верхней области (непосредственно возле верхней границы) существования нерастворяемых карбидов в стали Р6М5.

В заключение можно отметить, что на основании результатов перемещения измеряемых точек в стали Р6М5 при использованных режимах СТ радиальные перемещения значительно больше тангенциальных, причем отношение $\Delta r / \Delta s$ возрастает с увеличением расстояния от оси вращения. При постоянном давлении трения с увеличением времени трения в основном повышаются значения параметров пластической деформации (Δr , Δs , γ , ϵ , ϵ').

Предложено выражение (5), обеспечивающее расчет семейства кривых, дающих зависимость радиальных перемещений в функции удаления от плоскости трения и начального радиального расстояния от оси вращения.

Описанный механизм соединения стали Р6М5 со сталью 60 в процессе фазы трения хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

При использованных режимах СТ в фазе трения формируется с обеих сторон плоскости трения вязкий слой определенной ширины. Движение вязкой массы металла и твердых карбидных частиц в нем происходит по сложной траектории. На основании внешнего вида вязкого слоя после затвердения можно утверждать, что в этой фазе происходит задержка значительной части карбидной фазы с участками вязкого металла в области, находящейся непосредственно возле ротационной плоскости.

Анализом подтверждено присутствие в плоскости трения тех же легирующих элементов, что и в начальной стали Р6М5 (хрома, вольфрама, молибдена, ванадия), а также присутствие частиц с высоким содержанием ванадия и отдельных частиц других химических элементов.



Количественный оптической микроскопией большая объемная часть карбида измерена в стали Р6М5 вне металла ЗТВ и в плоскости трения (24,05 %), самая низкая — в вязком слое вне плоскости трения (5,70 %), в то же время в зоне смешивания обоих ОМ и металле ЗТВ в стали Р6М5 содержание карбидов 9,38 % по сравнению с 10,43 %. Предполагается, что причиной низкой доли карбидной фазы в вязком слое является ее растворение в твердом растворе.

Среднее зерно аустенита в вязком слое после СТ и охлаждения на воздухе немного крупнее, чем в самых нагретых зонах металла ЗТВ в стали Р6М5 непосредственно возле вязкого слоя, и мельче, чем в зоне смешивания стали Р6М5 со сталью 60.

Фазовый состав вязкого слоя в стали Р6М5 составляют аустенит, карбиды типа M_6C и MC и δ -феррит, а после охлаждения — мартенсит, карбиды и аустенит.

Полученные результаты характеристик вязкого слоя и области непосредственно возле него дают основание для расчета и прогнозирования процессов, возникающих при СТ.

1. Виль И. В. Сварка металлов трением. — М.: Машиностроение, 1970. — 174 с.
2. Demin G. Optimierung von Einstellwerten fuer das Reibschweißen mit kontinuierlichem Antrieb // Fachinformationen von KUKA. — Augsburg. — 1979. — № 32.
3. Kreje H., Wittkamp J. Gefuegeaenderungen und Bindemechanismus beim Reibschweißen // Fachinformationen von KUKA. — Augsburg. — 1975. — № 19.
4. Structure and properties in friction welded joints produced under superplasticity conditions in R6M5 steel / I. O. Khazanov et al. // Welding Intern. (Abington). — 1997. — № 11. — P. 64–66.
5. Effect of faying surface gradient in friction welding / A. Hasui et al. // Ibid. — 1998. — № 12, Heft 10. — P. 761–768.
6. Fukukasa K. On the characteristics of the rotational contact plane — a fundamental study of friction surfacing // Ibid. — 1996. — № 10, Heft 7. — P. 524–529.
7. Hasegawa M., Ieda T. Effect of welding condition on initial joining phenomena // Quarterly J. JWS. — 1999. — № 17, Heft 1. — P. 24–34 (WI-Abington. — 1999. — № 13, Heft 9. — P. 701–711).
8. Horn H. Untersuchungen zum Bindemechanismus reibgeschweisster Wolframhartmetall-Stahl-Verbindungen // Schweissen & Schneiden. — 1987. — № 10. — S. 513–516.
9. Benzak G. J., North T. H. Modelling of viscosity and fluid dynamics in similar friction joints // Trans. JWRI. — 1996. — 25. — № 2.

10. Ćiric R. Prilog analizi osobina trenjem zavarenog spoja celika C7680 sa C1730, magistarski rad, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1986.
11. Ćiric R., Raić K., Cantrak S. Strukturne promene i mehanizam spajanja kod rotacionog zavarivanja trenjem različitih celika (u pripremi).
12. Попандопуло Н. А., Ткачевская Д. Г. Структура металла блестящих колец непровара при сварке трением быстрорежущих сталей // Металловедение и терм. обработка мет. — 1977. — № 2. — С. 64–65.
13. Селегин А. С. Степень пластической деформации при сварке металлов трением // Свароч. пр-во. — 1976. — № 8.
14. Roberts W. ICSMA / Eds H. J. McQueen et al. — Oxford: Pergamon press, 1986. — P. 1859–1891.
15. Roberts W. In deformation, processing and microstructure / Ed. G. Krauss // ASM, Metals Park, Ohio, USA. — 1983. — P. 111–181.
16. Johnson W. A., Mehl R. F. // Trans. AIME. — 1939. — № 135. — P. 416.
17. Avrami M. // J. Chem. Phys. — 1939. — № 7. — P. 103.
18. Avrami M. // Ibid. — 1941. — № 9. — P. 177.
19. Колмогоров А. Н. // Изв. АН УССР. Сер. Математика. — 1937. — № 1. — С. 335.
20. Burke J. The kinetics of phase transformations in metals. — Oxford: Pergamon press, 1980. — P. 32–38.
21. Radovi N. Deformaciono i rekristalizaciono ponasanje mikrolegiranih selika na visokim temperaturama: Dokt. dis. — Tehnološko-metalurški fakultet Un-ta u Beogradu, Beograd, 2000.
22. Roberts W. et al. Dynamic recrystallization kinetics // Metal Science. — 1979. — № 3/4. — P. 195–203.
23. Fernandez A. I. et al. Static recrystallization mechanisms in a coarse-grained Nb-microalloyed austenite // J. Metallurgical and Materials Trans. — 2002. — 33A, № 10. — S. 3089–3098.
24. Devadas C. et al. // Metallurgical Trans. — 1991. — 22A. — S. 321–333.
25. Baragar D. L. // J. Mech. Working Techn. — 1987. — 14. — P. 295–307.
26. Sankar J. et al. // Metals Techn. — 1979. — 6. — S. 325–330.
27. Sellars C. M., Mc Tegar W. J. // Acta Metallurgica, 1966. — № 14. — P. 1136–1138.
28. Полухин И. П., Гун Я. Г. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. — М.: Металлургия, 1976.
29. Suck-jao Na et al. Temperaturermittlung beim Reibschweißen ungleichartiger Werkstoffe in cilindrische Form-Messung und Berechnung // Schweissen und Schneiden. — 1984. — № 36, Heft 3.
30. Фомичев И. Н., Имшенник П. К. Влияние промежуточного слоя, образующегося при сварке трением быстрорежущих сталей с конструкционными, на прочность соединения // Свароч. пр-во. — 1981. — № 2. — С. 21–22.
31. Rodic J. Razvoj orodnih jekel, @eljezarski zbornik, (1978)4, Ravne.

Phenomena developing in the process of friction stir welding of high-speed R6M5 steel to carbon steel 60 using a continual drive are considered. Mathematical expression to calculate radial displacements of metal directly to the friction surface has been proposed and experimentally verified. Structure, phase composition and chemistry of the tough layer, friction plane and neighbouring zones have been examined.

Поступила в редакцию 25.02.2004



СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ СВАРКОПАЙКЕ СТАЛИ 20

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
А. С. ПРОКОФЬЕВ, инж., В. В. ПОЛУХИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования микротвердости металла шва и околошовной зоны, полученного способом индукционной прессовой сварки (сваркопайки) с применением активирующих веществ. Установлено, что металл шва представляет собой сплав на основе основного металла соединяемых деталей. Определено, что для получения качественных швов необходимый коэффициент деформации $k_d = 0,025 \dots 0,050$. Показано, что при выполнении сваркопайки с траекторией контакта по замкнутой цилиндрической поверхности до 25 % зоны соединения не визуализируется, и соединение заготовок происходит по основному металлу.

Ключевые слова: сваркопайка, трубчатые и фланцевые соединения, индукционный нагрев, деформация, свариваемость, металлография, экспресс-методика

С использованием процесса сваркопайки выполняют стыковые соединения труб нефтяного сортамента диаметром до 325 мм, а также бурильных труб [1–8]. Особенности технологии получения таких соединений уже достаточно хорошо исследованы, известны критерии, при выполнении которых гарантировано высокое качество швов [5, 6].

Процесс сваркопайки обычно осуществляют следующим образом. При необходимости производят предварительную механическую обработку кромок и поверхности соединяемых кромок заготовок изделия. Затем заготовки помещают в зажимы сварочного приспособления, осуществляют индукционный нагрев соединяемых кромок изделия до температуры плавления активирующих веществ, предварительно размещенных в зоне шва. Далее к соединяемым деталям прикладывают давление, при этом осуществляется встречное контролируемое по уровню пластическое деформирование свариваемых кромок (осадка), в ходе которого формируется соединение деталей. Шов образуется в процессе пластической деформации нагретых кромок, сопровождающейся вытеснением легкоплавкой фазы активирующего вещества из шва, вплоть до образования прочного соединения деталей.

В последнее время получила развитие сваркопайка трубчатых соединений концевой и промежуточной трубной арматуры [9, 10]. Процесс образования швов в этих соединениях имеет отличия от такового, протекающего при стыковой сваркопайке труб. Это главным образом связано с более сложным характером перемещения металла нагретых кромок в процессе осадки.

Данная статья посвящена анализу результатов исследования швов, полученных способом сваркопайки на специальных образцах с использованием разработанной экспресс-методики [11], которая позволяет моделировать образование швов, характерных для соединений типа труба–фланец и Т-образных соединений труб [9, 10]. При этом

исследовано влияние уровня пластической деформации зоны швов на их свойства.

На рис. 1 представлены схемы традиционных фланцевых конструкций [12], выполненных посредством сваркопайки с применением осадки по внутреннему диаметру трубы.

Подобные соединения фланцев с тонкостенными трубами малых диаметров (до 70 мм и при отношении диаметра к толщине стенки 12...20 и более) широко используются при производстве велосипедов, мотоциклов, средств реабилитации инвалидов, медицинской техники.

На рис. 1, б дана схема процесса сваркопайки фланцевого соединения с образованием конусной отбортовки трубы по внутренней поверхности фланца, показана возможность формирования уплотнительного выступа или канавки посредством сварочного пуансона. Подобные соединения часто выполняют в трубных досках, где обычно толщина

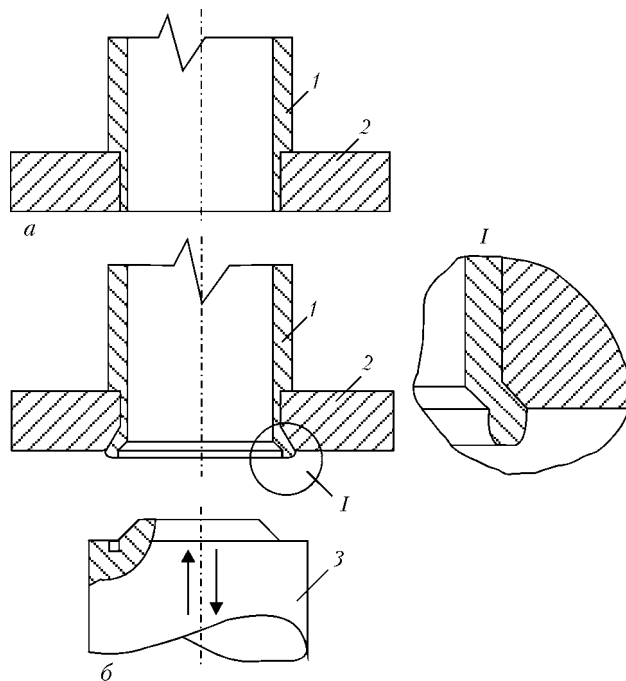


Рис. 1. Схемы жесткого фланцевого соединения (а) и его сваркопайки с отбортовкой трубы по внутренней поверхности фланца (б): 1 — труба; 2 — фланец; 3 — сварочный пуансон

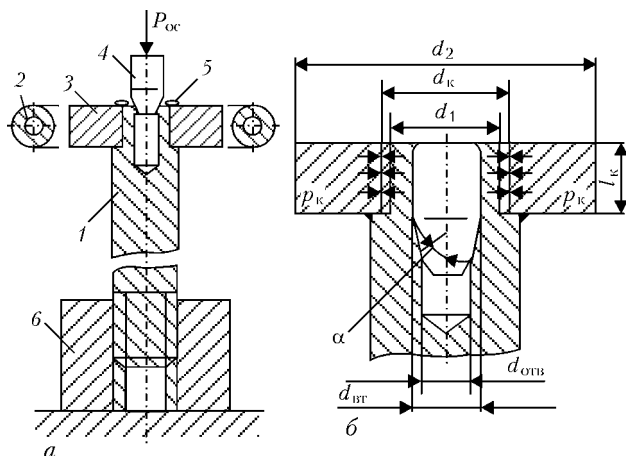


Рис. 2. Схема моделирования процесса (а) сваркопайки на образцах (б): 1 — шпилька; 2 — индуктор; 3 — шайба; 4 — цилиндрическая вставка; 5 — активирующее вещество; 6 — упор

фланца h превышает толщину стенки трубы $S_{тр}$ в 5 и более раз, например, в конструкциях теплообменных аппаратов.

В рамках упомянутой выше методики применяют специальную шпильку 1 и шайбу 3 (рис. 2), изготовленные из определенного материала, конструкция которых позволяет моделировать и исследовать процесс образования соединений между деталями, составляющими образец.

При этом можно исследовать зависимость свойств полученных соединений от заданных уровней пластической деформации соединяемых деталей образца. Для моделирования указанного процесса после прекращения нагрева образца в технологическое отверстие в шпильке запрессовывается цилиндрическая вставка 4 заданного размера с конусовидной заточкой (рис. 2). По мере углубления она вначале деформирует стенку отверстия до уплотнения зазора с размещенным в нем активирующим веществом, а при дальнейшем движении осуществляет совместную пластическую деформацию деталей образца на заданный уровень (рис. 2, б).

Образцы, соединенные сваркопайкой согласно экспресс-методике, готовили к исследованиям следующим образом. Для исследования изменений формы и размеров деталей и полученного шва, произошедших в результате пластической деформации, изготовленные образцы механически обрабатывали по торцу и шлифовали.

Для проведения металлографических исследований швов образцы разрезали по оси (рис. 2, б) и полировали. Травление образцов производили в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты (ниitale) [13].

При необходимости с помощью этой методики можно производить подбор активирующих веществ (припоев, флюсов и связующих материалов) для сваркопайки деталей образца из заданного материала. Оценку служебных свойств сварных швов, образование которых смоделировано согласно экспресс-методике, необходимо производить в зависимости от влияющих на процесс соединения деталей параметров осадки.

Ранее для оценки служебных свойств стыковых соединений труб, полученных способом сварко-

пайки, использовали определенные числовые значения, отражающие влияние процесса и его параметров на качество швов. Так, при определении степени пластической деформации ϵ в плоскости стыка был введен коэффициент деформации $k_d = \delta_y / \delta$, где δ_y — геометрический размер, показывающий утолщение стенки трубы в месте стыка и определяющийся как разность между вновь образованной выпуклостью шва и толщиной стенки трубы δ [5].

Для предложенного типа образцов (рис. 2), моделирующих образование соединения концевой трубной арматуры, таких как соединения фланцев с трубами по замкнутой цилиндрической (контактной) поверхности, параметром, определяющим степень деформации ϵ , является диаметр контактной поверхности d_k , который претерпевает изменения в зависимости от диаметра цилиндрической части конусовидной вставки, при запрессовывании которой обеспечивается совместная пластическая деформация деталей образца на заданный уровень.

Соответствующий этому параметру коэффициент деформации для данного случая можно определить следующим образом:

$$k_d = \frac{d_k - d_1}{d_1}, \quad (1)$$

где d_1 — наружный диаметр шпильки, определяющий первоначальное расположение контактной поверхности.

При этом можно определить зависимость k_d от параметров осадки кромок.

Создающееся при запрессовке конусовидной вставки контактное давление в шве p_k можно определить так [14]:

$$p_k = \frac{E\delta(1 - k_2^2)}{2d_k}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости для данной марки стали (сталь 20 по ГОСТ 8733–87), равный $2 \cdot 10^5$ МПа; δ — образовавшийся в образце натяг (мм), определяемый из выражения $\delta = d_k - d_1$; k_2 — коэффициент разностенности, вычисляемый по формуле $k_2 = d_k / d_2$; d_2 — наружный диаметр шайбы.

Входящее в уравнение (2) выражение δ / d_k можно представить в виде $d_k - d_1 / d_k$ или с учетом того, что согласно (1) $d_k = d_1(k_d + 1)$ его можно представить как

$$\frac{\delta}{d_k} = \frac{d_k - d_1}{d_k} = \frac{d_1(k_d + 1) - d_1}{d_1(k_d + 1)} = \frac{k_d}{k_d + 1}.$$

Подставив это выражение в формулу (2), последнюю можно привести к виду

$$p_k = \frac{Ek_d(1 - k_2^2)}{2(k_d + 1)}. \quad (3)$$



При этом из выражения (3) становится очевидной зависимость контактного давления от степени пластической деформации:

$$p_k = f\left(\frac{k_d}{k_d + 1}\right).$$

На рис. 3 представлена зависимость k_d от заданного p_k .

Для определения усилия, требуемого для контактного смятия и развития пластической деформации в металлах и сплавах, можно воспользоваться результатами четвертой теории прочности, из которой следует, что

$$\sigma_{\max} = 5\sigma_T, \quad (4)$$

где $\sigma_{\max}$ — нормальное к поверхности шва максимальное контактное сжимающее напряжение [15].

Данное сравнение позволяет оценить влияние пластической деформации на формирование шва, его свойства при образовавшемся контактом давлении p_k , а также возможность оптимизации процесса сваркопайки с учетом σ_T соединяемых материалов и используемых активирующих веществ.

Для определения механической мощности привода осадки и усилия осадки $P_{\text{ос}}$ сравнивали контактное давление в шве p_k , вычисляемое из выражения (3), с напряжением $\sigma_{\max}$, которое необходимо развить для пластической деформации и контактного смятия в металлах и сплавах.

Для определения усилия осадки воспользуемся выражением, приведенным в работе [9]:

$$P_{\text{ос}} = \frac{P_n}{\cos \alpha} = \frac{S_k p_k}{\cos \alpha} = \frac{\pi d_{\text{вст}} l_k p_k}{\cos \alpha}, \quad (5)$$

где P_n — нормальное усилие к поверхности смятия; S_k — площадь контактной поверхности; p_k — контактное давление при осадке и температуре проведения процесса, обычно $p_k = 5...50$ МПа; $d_{\text{вст}}$ — диаметр цилиндрической вставки; l_k — осевая длина контактной поверхности; α — угол между осью цилиндрической вставки и нормалью, проведенной к контактной поверхности.

В описанных экспериментах детали образцов изготавливали из углеродистой стали (ГОСТ 8733–87) с нормированием следующего химического состава по группе «Б» (ГОСТ 1050–74), мас. %: 0,16...0,24 углерода; $\leq 0,65$ марганца; 0,15...0,30 кремния; $\leq 0,25$ хрома и до 0,005 фосфора. В качестве активирующего вещества использовали латунную фольгу марки Л-63, а также флюс Na_2BrO_7 (бура).

Результаты измерений размеров шпилек и шайб на общей обработанной торцевой поверхности показали, что в результате сваркопайки произошло их изменение. Например, когда диаметр конусовидной вставки составлял 5,0 мм, диаметр технологического отверстия в шпильке увеличился от 3,5 до 5,0 мм, а средний диаметр поверхности шва (практически совпадающий с наружным диаметром шпильки и внутренним диаметром отвер-

стия в шайбе) изменился с 8,0 (диаметр d_1) до 8,44 мм (диаметр d_k). Наружный диаметр шайбы d_2 не изменился. При этом коэффициент деформации шва составил 0,055 (5,5 %).

В результате деформации толщина стенки между поверхностью технологического отверстия и средней поверхностью шва уменьшилась от 2,25 до 1,72 мм, т. е. на 24 %. Это привело к увеличению площади поверхности шва $\Delta S_{\text{шв}}$ на 5 % по сравнению с первоначальной площадью соединения.

Изменение указанных размеров можно объяснить следующим образом. Исходя из геометрических размеров образцов (рис. 2), определенное расчетным путем из выражения (3) образовавшееся при сваркопайке контактное давление в остывшем шве изменяется в пределах $p_k \cong 2000...4250$ МПа вдоль осевой длины шва.

При сравнении расчетного контактного давления p_k в остывшем шве с определенным из выражения (4) максимальным контактным сжимающим напряжением $\sigma_{\max}$ установлено, что p_k превышает более чем в 2...4 раза $\sigma_{\max}$ и более чем в 7...15 раз σ_T (σ_T — предел текучести для данной марки стали при 20 °С). Напомним, что для стали 20 при температуре окружающей среды $T = 20$ °С $\sigma_T = 200...245$, а $\sigma_{\max} = 1000$ МПа. Эти же соотношения соблюдаются и при температуре протекания процесса сваркопайки, но при более низких абсолютных значениях напряжений. Так, при температуре плавления активирующего вещества ($T_{\text{пл}} = 880...950$ °С) в условиях формирования шва $\sigma_{\max}$ приближается по уровню к σ_T , при этом σ_T находится в пределах 5...50 МПа. Соответственно значения контактного давления p_k будут гораздо меньше.

Достижение температуры плавления активирующего вещества определяет начало проведения процесса соединения, протекающего обычно для содержащих медь активирующих веществ в температурном интервале 1000...1100 °С, при котором происходит процесс осадки кромок в случае соответствующего p_k , а также формирование шва.

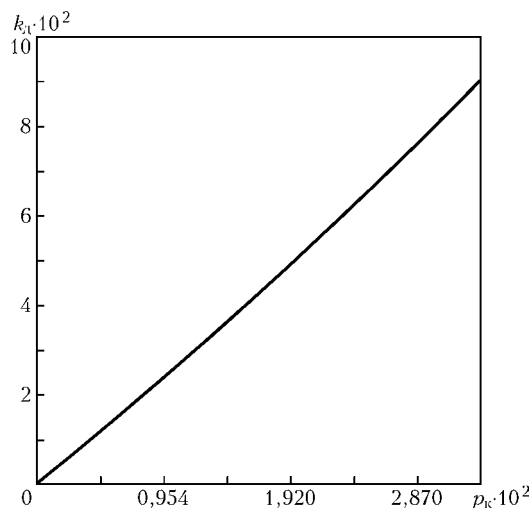


Рис. 3. Зависимость коэффициента деформации k_d от заданного контактного давления p_k

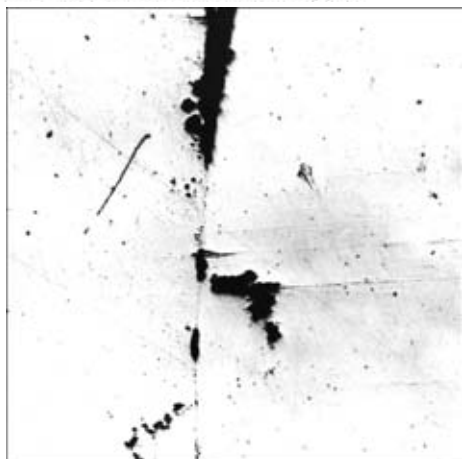


Рис. 4. Обогащение стальных деталей медьсодержащей расплавленной прослойкой в зонах шва, которые прилегают к контактной поверхности соединения, $\times 25$

Эти давления приводят к образованию течений в расплавленной прослойке, направленных вдоль соединяемых контактных поверхностей и способствующих вытеснению легкоплавкой фазы активирующего вещества из шва. Кроме того, эти давления являются причиной изменения диаметра контактной поверхности d_k в сформировавшемся образце и способствуют образованию сварного соединения.

Полученные таким образом данные позволяют определить из выражения (5) усилие осадки $P_{ос}$, равное 5060 Н, что соответствует $p_k = 8$ МПа при температуре ведения процесса. Эти данные использованы в экспериментах.

В соответствии с приведенной выше методикой подготовки образцов проанализировано строение металла шва и околошовной зоны. Обнаружено обогащение медью стальных деталей в зонах шва, прилегающих к контактной поверхности соединения (темные следы на рис. 4).

На рис. 5 показано, что закристаллизовавшаяся прослойка шва имеет прерывистое строение вдоль сопряжения поверхностей соединяемых кромок и не обнаруживается визуально приблизительно на 25 % общей его границы. Здесь соединение кромок деталей, очевидно, происходит в твердой фазе.

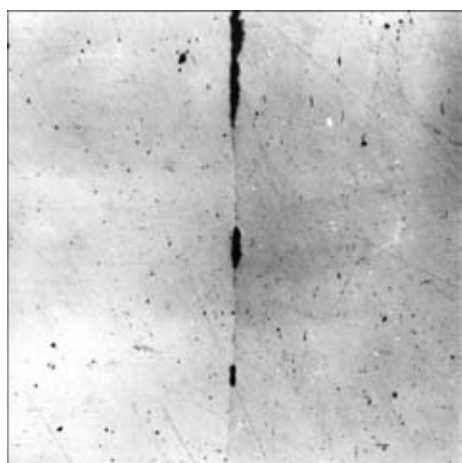


Рис. 5. Прерывистое строение закристаллизовавшейся прослойки в зоне шва, $\times 25$

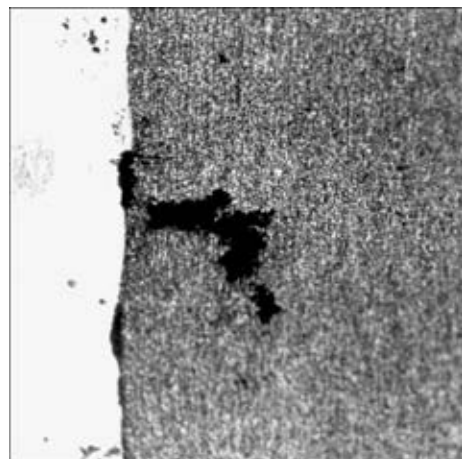


Рис. 6. Заполнение материалом закристаллизовавшейся прослойки микротрещин на глубину до 0,4 мм, $\times 63$

На рис. 6 и 7 заметно, что медьсодержащий материал закристаллизовавшейся прослойки шва в процессе сваркопайки проникает по границам зерен в тело деталей на глубину до 0,4 мм, заполняя несовершенные зоны поверхностей кромок (микротрещины).

При более подробном металлографическом анализе этих же образцов видимых дефектов в шве не обнаружено.

Для определения сравнительных характеристик металла шва и околошовной зоны выполнили анализ микротвердости этих зон в образцах по известной методике [16–21].

Распределение микротвердости в зоне швов исследовали с помощью микротвердомера фирмы «LECO». В тех местах, где не обнаружен видимый шов (соединение в твердой фазе) и выявлены изолированные вкрапления невыдавленной прослойки толщиной до 2,5 мкм (рис. 8, а), на приборе зафиксирована твердость $HV 2540$ МПа, что превышает таковую образцов стали 20 в состоянии поставки на 9,4 % ($HV 2320$ МПа).

Измерена также твердость металла шва, имеющего размер до 18 мкм вблизи его центральной части (рис. 9, а). Зафиксированные на приборе показания составили $HV 2190$ МПа, что меньше, чем у материала образцов на 6 %.

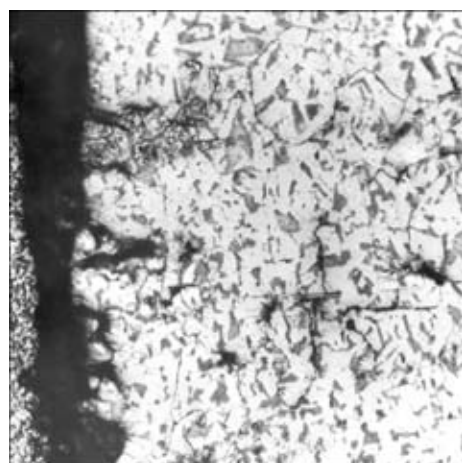


Рис. 7. Проникновение материала прослойки по границам зерен в тело деталей, $\times 100$

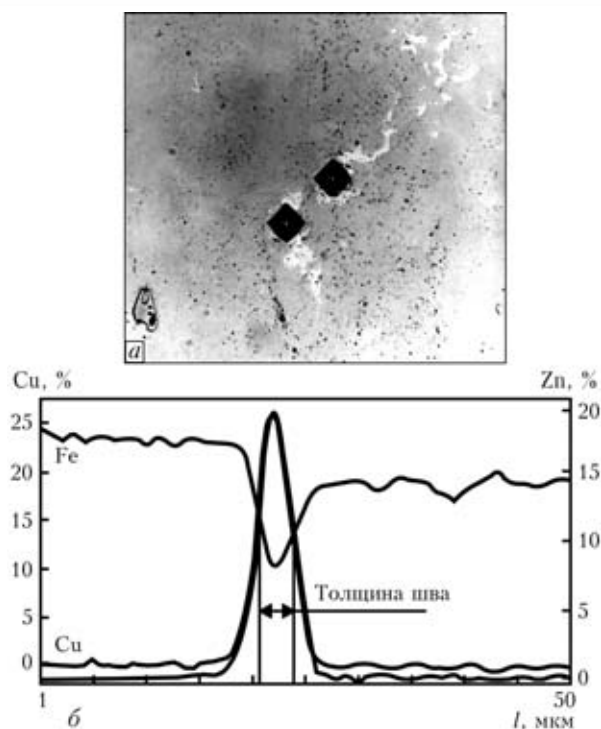


Рис. 8. Микроструктура ($\times 320$) участка соединения с изолированными вкраплениями прослойки (а) и распределение железа, меди и цинка в нем (б)

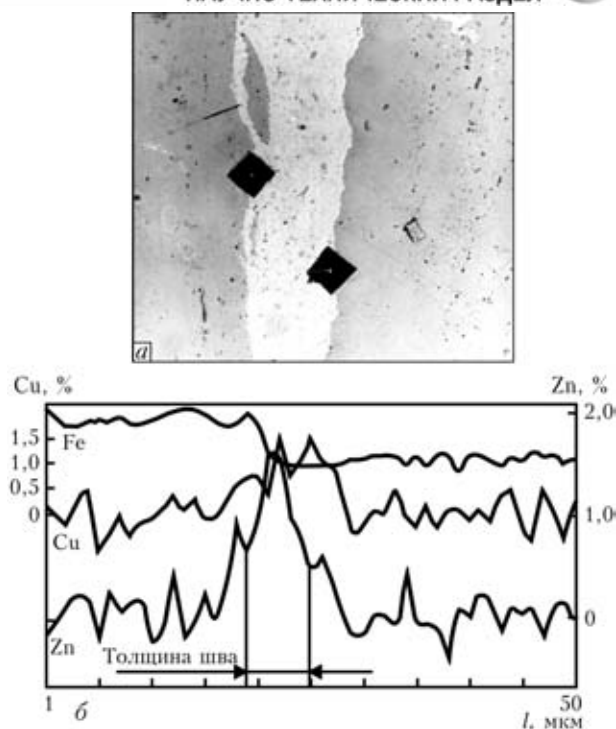


Рис. 9. Микроструктура ($\times 320$) участка соединения с толщиной шва до 18 мкм (а) и распределение железа, меди и цинка в нем (б)

Микроструктура этой же зоны шва при еще большем увеличении изображения данного участка шва (рис. 10) свидетельствует об отсутствии несплавлений, несплошностей, пор и других дефектов.

Полученные при исследовании шва границы прослойки и кромки значения микротвердости составляют $HV\ 2190 \dots 2510$ МПа, при этом их разброс от средней измеренной твердости шва $HV\ 2320$ МПа достигает $+10\ \%$ и не превышает $10\ \%$ твердости основного металла. Эти данные свидетельствуют о схождении прочностных свойств металла шва и основного металла [22].

Для исследования состава шва и распределения основных компонентов активирующего вещества (медь и цинк) в металле шва и околошовной зоны в условиях произошедшей деформации кромок проведен микрорентгеноспектральный анализ зоны соединения на приборе фирмы «Самбах» (модель SX-50). Исследования проводили при перемещении микрозонда на расстояние 50 мкм (шаг 1,02 мкм). Установлено, что содержание растворенных в металле шва элементов активирующего вещества (на примере припоя Л-63 и буры) следующее:

в местах, где не обнаружен видимый шов, но выявлены изолированные вкрапления невыдавленной прослойки (рис. 8, а): Cu — 0,018, Zn — 0,015 мас. % при Fe — 99,967 мас. %; Cu — 0,02, Zn — 0,01 при Fe — 99,97 ат. % (рис. 8, б);

на участках вблизи центральной части шва Cu — 1,510, Zn — 1,698 при Fe — 96,792 мас. %; Cu — 1,33, Zn — 1,46 при Fe — 97,21 ат. % (рис. 9, б);

на периферии шва, где есть участки невытесненной прослойки (рис. 6): Cu — 26,190, Zn — 18,162 мас. % при Fe — 55,648 мас. %; Cu — 24,44, Zn — 16,47 при Fe — 59,08 ат. %.

Установлено, что металл шва представляет собой сплав на основе основного металла — железа. Даже на периферийных участках шва, в месте образования галтельного участка, где степень пластической деформации и контактное давление в 2,5 раз меньше, чем в середине, содержание железа составляет более 50 %. Это свидетельствует о зависимости химического состава металла закристаллизовавшегося шва от степени пластической деформации ϵ и контактного давления p_k , действующего на прослойку в шве в условиях кристаллизации в стесненных условиях.

Таким образом, для получения качественных швов по замкнутой цилиндрической поверхности способом сваркопайки необходимо обеспечить $k_d = 0,025 \dots 0,050$.

Проведены механические испытания на срез образцов (рис. 11), моделирующих выполнение фланцевого соединения с образованием конусовидной отбортовки трубы по внутренней поверхности фланца (см. рис. 1, б). В условиях опытов коэф-

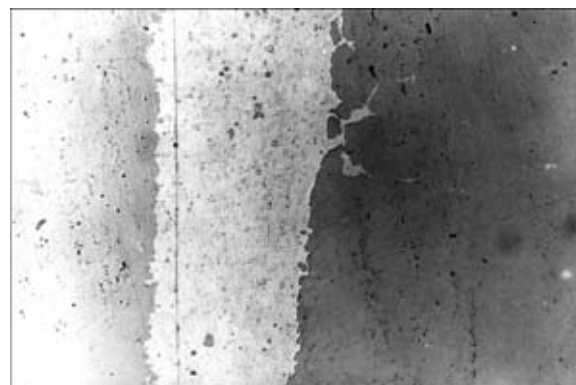


Рис. 10. Микроструктура зоны шва (рис. 9) при большем увеличении, $\times 680$ (увел. в 5 раз)

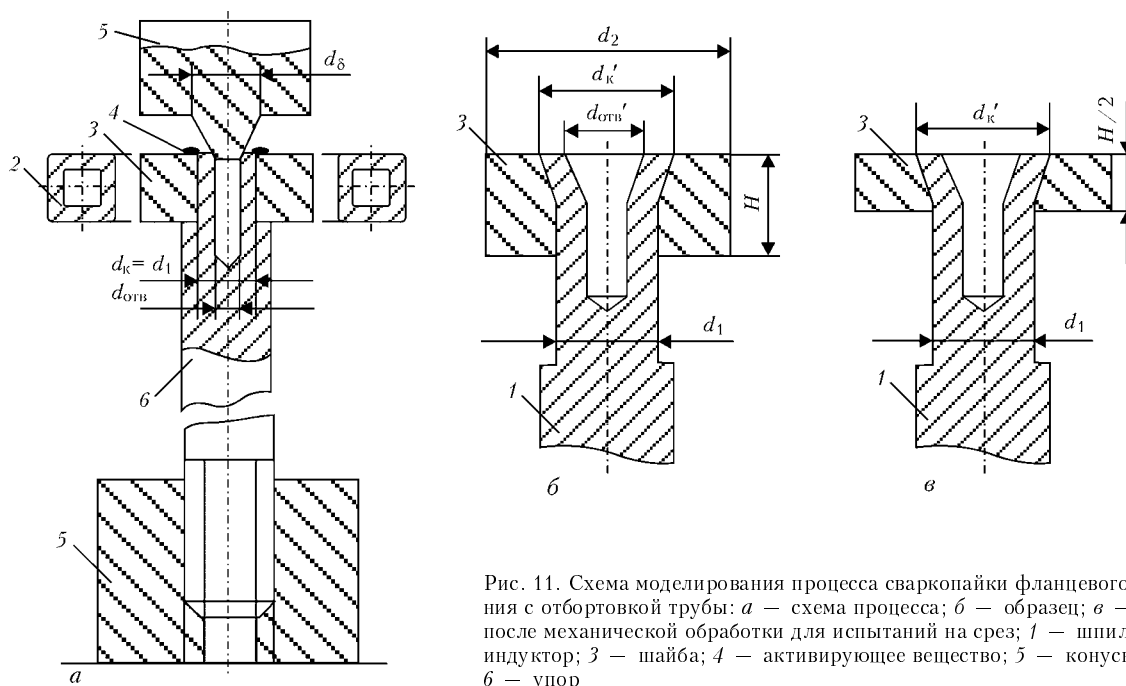


Рис. 11. Схема моделирования процесса сваркопайки фланцевого соединения с отбортовкой трубы: а — схема процесса; б — образец; в — образец после механической обработки для испытаний на срез; 1 — шпилька; 2 — индуктор; 3 — шайба; 4 — активирующее вещество; 5 — конусный боек; 6 — упор

коэффициент деформации кромок k_d составлял от 0,04 до 0,14 в разных сечениях по высоте шва. При этом вместо цилиндрической вставки заданного размера с конусной заточкой (см. рис. 2) использовали конусный боек 5 (рис. 11, а). В дальнейшем образец, полученный по схеме на рис. 11, б, обрабатывали согласно схеме на рис. 11, в. Результаты испытаний образцов приведены в таблице.

Как видно из таблицы, наименьшее напряжение среза $\tau_{ср.ср}$ имеют образцы, изготовленные без применения активирующих веществ. Для образцов, где швы выполнены с применением активирующих веществ, напряжение среза $\tau_{ср.ср}$ в 3 и более раз больше, чем в образцах без активирующих веществ при одной и той же заданной степени деформации металла шва и околошовной зоны.

При этом напряжение среза $\tau_{ср.ср}$ в образцах с применением в качестве активирующего вещества латуни Л-63 с бурой составило 218 МПа, что близко к нормируемому напряжению среза стальных деталей, паянных латунным припоем, который достигает примерно 200 МПа. Это также соответствует нижней границе предела текучести $\sigma_T \cong 200 \dots 245$ МПа для стали 20 (ГОСТ 1050-52).

Еще более высокое напряжение среза (425,2 МПа) получено при использовании в качестве активирующего вещества смеси буры и припоя ПАН-3 (ТУ 14-1-2991-80). Этот показатель превысил более чем в 1,5 раза напряжение среза латуни марки Л-63 и в 1,2...1,3 раза нормируемое значение напряжения среза при пайке швов припоем ПАН-3. При этом часть образцов (№ 7 и 8) не удалось довести до разрушения по причине срыва резьбы с хвостовой части образца.

Данные результаты свидетельствуют о том, что значения прочности металла шва и основного металла близки.

Как следует из работ [3-7], коэффициент деформации, необходимый для выполнения качес-

твенных швов способом сваркопайки в стыковых соединениях труб, превышает таковой в рассматриваемых соединениях и составляет 0,4...0,5 толщины стенки трубы в месте стыка. Это объясняется перемещением нагретого металла кромок рассматриваемых соединений как в осевом, так и тангенциальном направлениях вдоль поверхности шва, что способствует улучшению механических свойств соединения [8, 23].

Толщина визуально зафиксированного сварного шва соизмерима с глубиной шероховатости поверхности кромок заготовок, являющийся результатом механической обработки деталей образцов перед

Результаты испытаний на срез образцов, выполненных способом сваркопайки

№ образца	Активное вещество	$F_{ср}$, Н	d_1 , мм	d_k , мм	$S_{шв.2}$, мм ²	$\tau_{ср}$, МПа	$\tau_{ср.ср}$, МПа
1	—	2660	8,0	10,18	101,36	26,24	—
2	—	4850	8,0	10,18	101,36	47,85	—
3	—	3751	8,0	10,18	101,35	37,01	37,0
4	Л-63	18400	8,1	10,18	102,24	179,9	—
5	Л-63	22000	8,0	10,18	101,34	217,0	—
6	Л-63	25980	7,9	10,18	100,52	258,5	218,0
7	ПАН-3	38400	Не разрушился				
8	ПАН-3	37700					
9	ПАН-3	17200	7,9	10,18	50,65	339,6	—
10	ПАН-3	30600	8,0	10,18	58,13	526,4	—
11	ПАН-3	22850	7,8	10,18	55,79	425,2	425,2

Примечания. 1. Здесь d_1 — диаметр контактной поверхности, измеренный на образце до выполнения соединения; $\tau_{ср} = F_{ср}/S_{шв.2}$. 2. Напряжение среза определяли согласно действующим методикам из выражения $\tau_{ср.ср} = (\tau_{ср1} + \tau_{ср2} + \dots + \tau_{срn})/n$, где n — количество образцов для определения среднего значения напряжения среза. В наших опытах $n = 3$. 3. При получении образцов № 1-3 активирующие вещества не применяли. 4. Составной частью активирующего вещества, используемого в опытах, являлась бура.



сваркой. Именно поэтому шов представляет собой чередующиеся участки различной толщины, вплоть до исчезновения границы между поверхностями кромок.

Выводы

1. Данные микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что металл шва представляет собой сплав на основе основного металла соединяемых деталей — железа. При выполнении способом сваркопайки шва по замкнутой цилиндрической поверхности до 25 % зоны соединения не визуализируется, и соединение заготовок происходит в твердой фазе.

2. Сравнительные исследования микротвердости металла шва и околошовной зоны свидетельствуют о получении металла, аналогичного по свойствам основному металлу.

3. Коэффициент деформации, необходимый для выполнения качественных швов способом сваркопайки по замкнутой цилиндрической поверхности, составляет 0,025...0,050. Это меньше, чем k_d у стыковых соединений труб и стержней (0,4...0,5), что объясняется перемещением нагретого металла кромок как в осевом, так и в тангенциальном направлениях вдоль поверхности шва.

1. *Высокотемпературная пайка труб для геологоразведочного бурения* / В. К. Лебедев, В. Д. Табелев, А. С. Письменный и др. // Автомат. сварка. — 1989. — № 5. — С. 28–30.
2. *Письменный А. С., Шинлов М. Е., Буженецкий А. И.* Применение индукционной сваркопайки для соединения труб нефтяного сортамента // Там же. — 1995. — № 12. — С. 35–38.
3. *Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С.* Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов // Там же. — 1983. — № 9. — С. 25–27.
4. *Структура и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой и пайкой с приложением давления* / В. Д. Табелев, Н. Л. Карета, А. И. Панасенко и др. // Там же. — 1985. — № 11. — С. 26–29.
5. *Письменный А. С.* Синтез индукционных систем для сварки и пайки труб в стык // Там же. — 1990. — № 5. — С. 11–15.
6. *Физическое моделирование осадки при сварке или пайке труб в стык* / В. К. Лебедев, А. С. Письменный, О. Г.

Касаткин, М. Е. Шинлов // Там же. — 1990. — № 8. — С. 17–20.

7. *Табелев В. Д.* Особенности образования соединений при пайке с пластическим деформированием основного металла // Там же. — 1991. — № 7. — С. 5–9.
8. *Письменный А. С., Прокофьев А. С.* Прессовая сварка труб с применением активирующих веществ // Там же. — 2002. — № 7. — С. 22–27.
9. *Прокофьев А. С., Письменный А. С.* Технология сваркопайки фланцев с трубой // Там же. — 2000. — № 5. — С. 50–52.
10. *Индукционная сваркопайка безарматурных тройниковых соединений труб* / А. С. Прокофьев, А. С. Письменный, В. А. Бондарев, А. В. Бондарев // Там же. — 2001. — № 4. — С. 46–50.
11. *Экспресс-методика для разработки и проверки технологической пайки давлением* / А. С. Письменный, В. В. Полушин, А. С. Прокофьев и др. // Там же. — 2002. — № 1. — С. 48–50.
12. *Долгунов Л. Ш., Прокопов В. К., Самсонов Ю. А.* Расчет и конструирование фланцевых соединений судовых трубопроводов и сосудов. — Л.: Судостроение, 1972. — 264 с.
13. *Реактивы для выявления макро- и микроструктур сварных соединений сталей и сплавов* / В. Ф. Грабин, А. В. Денисенко, Д. П. Новикова и др. — Киев: Наук. думка, 1977. — 120 с.
14. *Справочник машиностроителя: В 6 т.* — М.: Машгиз, 1955. — Т. 3. — 563 с.
15. *Сопrotивление материалов* / Под ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Виц. шк., 1973. — 627 с.
16. *Давиденков Н. Н., Беляев С. Е., Марковец М. П.* Получение основных механических характеристик стали с помощью измерений твердости // Завод. лаб. — 1945. — № 10. — С. 964–973.
17. *Сичиков М. Ф., Захаров Б. П., Козлова Ю. В.* Об определении механических свойств стали без испытаний разрывных образцов // Там же. — 1947. — № 12. — С. 1463–1471.
18. *Куцук-Яценко С. И., Казымов Б. И.* Оптимальный термический цикл при контактной стыковой сварке стали 12Х1МФ // Там же. — 1967. — № 6. — С. 24–27.
19. *Форостовец Б. А.* Особенности структуры металла соединений при сварке оплавлением // Там же. — 1972. — № 4. — С. 9–13.
20. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металла по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
21. *Гуляев А. П.* К вопросу о механических свойствах конструкционных сталей // Металловедение и терм. обработка мет. — 1989. — № 7. — С. 23–25.
22. *Шмыков А. А.* Справочник термиста. — М.: Машгиз, 1956. — 332 с.
23. *Сахацкий Г. П., Дудник Г. П.* Свойства соединений, выполненных стыковой сваркой в формирующих устройствах // Автомат. сварка. — 1972. — № 4. — С. 56–58.

The paper gives the results of studying the microhardness of the weld and HAZ, produced by the method of induction-press welding with application of activating substances (brazing). It is established that the weld metal is an alloy based on the parent metal of the parts being joined. It is determined that deformation coefficient required for performance of sound welds is within $k_d = 0.025...0.050$. It is shown that during performance of brazing with the contact trajectory along a closed cylindrical surface, up to 25 % of the joint zone is not visualized and the billets are joined over the base metal.

Поступила в редакцию 02.02.2004,
в окончательном варианте 25.06.2004



УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕ-, ГАЗОПРОВОДНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Ю. Н. САРАЕВ, д-р техн. наук, **В. П. БЕЗБОРОДОВ**, канд. техн. наук, **И. М. ПОЛЕТИКА**, д-р техн. наук, **А. В. ТЮТЕВ**, **И. В. НИКОНОВА**, **Н. В. КИРИЛОВА**, инженеры (Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, РФ), **С. П. СЕВАСТЬЯНОВ**, инж. (ООО «Тюменьтрансгаз», г. Югорск, РФ)

Исследовано влияние импульсного процесса сварки на структуру и механические свойства сварных соединений труб большого диаметра (1420 мм) из марганцовистых низколегированных сталей, предназначенных для нефте- и газопроводов. Показано, что импульсный режим сварки позволяет повысить однородность структуры и уменьшить размер зерна металла сварного шва и зоны термического влияния. Структурные изменения приводят к повышению пластичности зон сварного соединения и его ударной вязкости при положительной температуре (20 °С) на 8...27 %, а отрицательной (–60 °С) на 15...24 %.

Ключевые слова: импульсная сварка, низколегированные стали, сварные соединения, электроды, механические свойства, структура, трубы, нефте- и газопроводы, прочность, пластичность, ударная вязкость

Трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 16 мм из стали Х67 производства Германии (российский аналог — сталь 10Г2С) используются в сложных условиях эксплуатации при знакопеременных нагрузках и низких температурах. При сварке такой стали стационарной дугой возникает перегрев металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), вызывающий сильное укрупнение зерен. Чтобы избежать этого, приходится выполнять сварку при пониженной погонной энергии и ограничиваться узкими пределами тепловых режимов.

В последние годы требования к механическим свойствам, надежности и долговечности сварных соединений труб нефте- и газопроводов, а также конструкций и емкостей химического производства значительно возросли. В ряде случаев для таких труб и конструкций устанавливаются минимально допустимые показатели механических свойств в первую очередь это касается прочности, ударной вязкости и пластичности. Свойства сварных соединений конструкций, как правило, должны соответствовать свойствам основного металла [1].

Особенностью широко используемых в нефтяной и газовой промышленности сталей типа 09Г2С, 10Г2С, 17Г1С является их склонность к разупрочнению при сварке, в результате которого снижается конструкционная прочность сварных соединений.

В настоящее время зачастую применяют низколегированные стали в термически улучшенном состоянии (после закалки и высокого отпуска). Такой обработке подвергают, например, стали 17Г1С, 16ГС, 30ХГСНА и др. При их сварке в околошовной зоне происходит разупрочнение участка, подвергнутого нагреву выше температуры 550 °С. Полностью восстановить свойства металла ЗТВ таких сварных соединений можно только с

использованием послесварочной термической обработки — закалки с высоким отпуском. Причем режим такой обработки должен быть аналогичен режиму ранее проводившейся термической обработки [1].

Термообработка также обязательна и в некоторых других случаях, предусмотренных ОСТ 26-291–79. Однако термообработка сварных соединений всегда усложняет технологический процесс сварки, особенно при проведении строительных и ремонтных сварочных работ в полевых условиях.

Для повышения прочностных и эксплуатационных свойств сварных соединений в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН используют новый подход, основанный на управлении процессом плавления и переноса электродного металла при импульсной сварке. Это достигается путем применения систем гибкого энергетического процесса, при котором обеспечивается управление сложной электродинамической системой источник питания–электрод–дуга–сварочная ванна в зависимости от мгновенных значений энергетических характеристик с использованием каналов обратных связей и последующего проведения исследований влияния параметров адаптивной импульсной сварки на структуру, физико-механические, специальные и эксплуатационные свойства сварных соединений из высокопрочных сталей [2–4].

Целью данной работы является исследование влияния процесса импульсной сварки труб из низколегированных сталей Х67 и 17Г1СУ на структуру и физико-механические свойства сварных соединений (прочность при статическом нагружении растяжением, микротвердость структурных составляющих и ее распределение в зонах сварного соединения, ударная вязкость при температурах +20 и –60 °С) и их соответствие основным требованиям, предъявляемым к сварным соединениям труб нефте- и газопроводов.

Для изготовления образцов сваривали пластины размером 140×300 мм и толщиной 16 мм, выре-

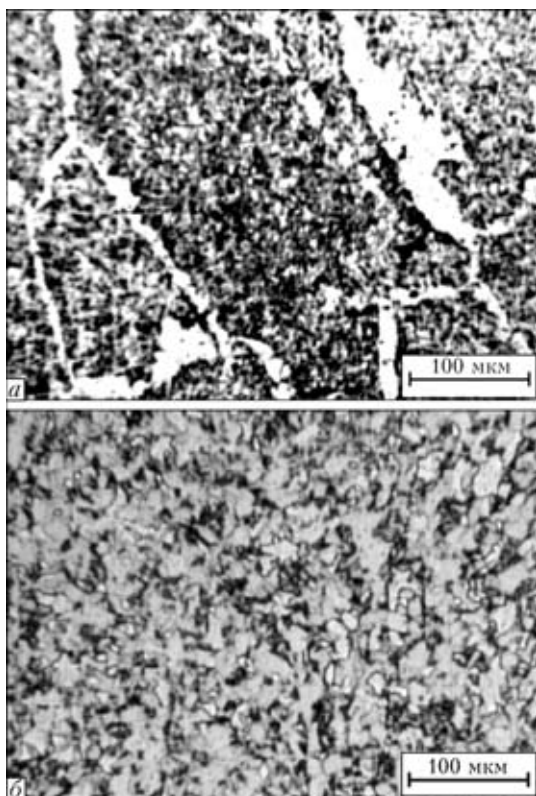


Рис. 1. Микроструктура металла шва в облицовочном слое сварного соединения стали типа 10Г2С после сварки в стационарном (а) и импульсном (б) режиме, $\times 170$

занные из труб (сталь Х67), а также пластины из стали 17Г1СУ размером 150 $\times$ 300 мм и толщиной 14 мм, вырезанные из труб диаметром 1420 мм. Сварку выполняли в стационарном и импульсном режимах. При сварке в стационарном режиме по штатной технологии использовали источник питания инверторного типа МП 2400 фирмы «Kemprj» (Финляндия), при сварке импульсным режимом — выпрямитель ВД-306Э в комплекте со специализированной приставкой УДИ-205, обеспечивающей адаптивный технологический процесс.

Для получения сварных соединений из стали 10Г2С использовали шведские электроды серии ОК (Швеция), а для сварки стали 17Г1СУ — российские электроды марки МТГ, а также немецкие электроды Kessel.

Определяли следующие механические свойства: временное сопротивление при растяжении, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение. Образцы для механических испытаний в виде двусторонних лопаток вырезали поперек сварного соединения таким образом, чтобы шов располагался посередине рабочей части образцов (ГОСТ 1497–73). Испытания проводили на установке типа «Инстрон».

Испытания образцов на ударную вязкость осуществляли на маятниковом копре типа МК-30А при температурах +20 и –60 °С. Концентратор в форме V-образного надреза наносили по сварному шву (ГОСТ 9454–78).

Аттестацию структуры зон сварных соединений проводили после механических испытаний образцов на ударную вязкость на оптическом микроскопе

Таблица 1. Механические свойства сварных соединений из стали 10Г2С, полученных при сварке в стационарном и импульсном режимах

Режим сварки	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ϵ , %
Стационарный	454	540	20,3	62,8
Импульсный	448	536	24,6	60,8

типа МИМ-9. Микротвердость металлов в зонах сварного соединения измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,5 и 1,0 Н.

Как следует из работы [1], стали типа 09Г2, 09Г2С имеют очень высокую критическую скорость охлаждения, превышающую 100 °С/с, поэтому охлаждение после сварки не вызывает образования в металле шва и ЗТВ мартенситной структуры. Структура металла различных участков ЗТВ изменяется от крупнозернистой ферритно-перлитной (зачастую видманштеттового типа) в околошовном участке до мелкозернистой ферритно-перлитной в участке неполной перекристаллизации. При этом твердость металла шва и околошовного участка ЗТВ, как правило, не превышает 2000 МПа.

Металлографический анализ образцов из стали типа 10Г2С показал, что при использовании сварки в импульсном режиме во всех участках сварного шва по высоте (корневом, заполняющем и облицовочном) и вблизи линии сплавления с основным металлом, а также в ЗТВ формируется металл с более дисперсными, однородными и равноосными структурами по сравнению с получаемыми в стационарном режиме (рис. 1).

Механические испытания образцов сварных соединений при статическом нагружении растяжением выявили высокую прочность сварных швов, сформированных по обеим технологиям (образование шейки и разрушение происходили в области границы ЗТВ с основным металлом). Сварные соединения, полученные в импульсном режиме, показывают такие же значения временного сопротивления, предела текучести, а также относительного сужения материалов, как и в стационарном режиме.

Относительное удлинение образцов возрастает примерно на 20 % (табл. 1), что связано с образованием при импульсной сварке значительно более дисперсных структур, способствующих повышению пластичности металла всех зон сварного соединения.

С целью проведения структурной оптимизации высокопрочных сварных соединений изучали влияние импульсного процесса сварки стали 17Г1СУ на формирование структуры металла сварного шва и ЗТВ. Исследования показали, что импульсный режим сварки обеспечивает в результате регулируемого ввода тепла в изделие [2] значительное измельчение структуры металла шва и наиболее подверженной структурным изменениям ЗТВ, что предотвращает резкое ухудшение микротвердости и прочности в этой зоне и тем самым уменьшает возможность возникновения здесь опасных концентраторов напряжений, способствующих образованию и распространению трещин, приводящих к разрушению (рис. 2).

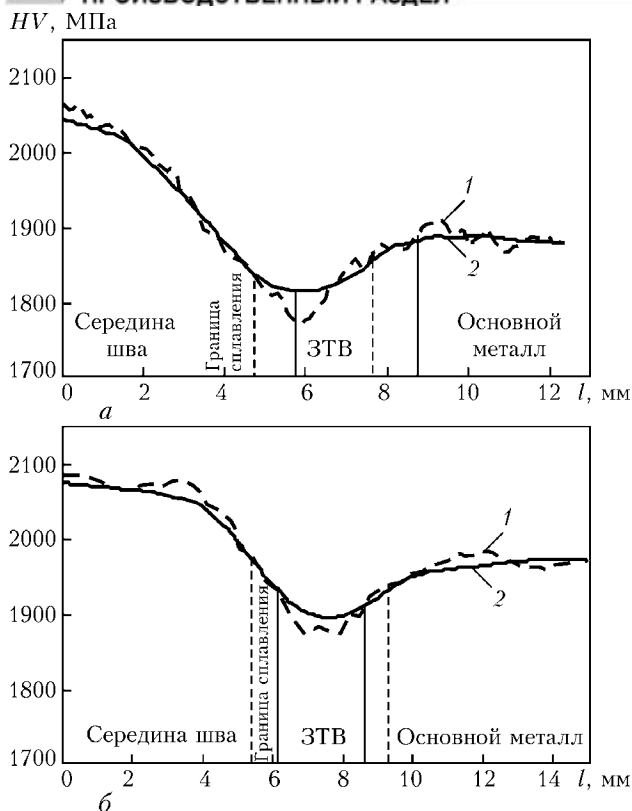


Рис. 2. Распределение микротвердости в заполняющем слое шва сварных соединений стали 17Г1СУ, полученных сваркой электродами МТГ (а) и Kessel (б) в стационарном (1) и импульсном (2) режиме; l — расстояние от центра сплавления

Таблица 2. Ударная вязкость металла шва сварных соединений из стали 17Г1СУ, полученных в стационарном и импульсном режимах сварки разными электродами

Применяемый электрод	Режим сварки	KCV, МДж/м ² , при T , °C	
		+20	-60
Kessel	Стационарный	1,30	0,41
	Импульсный	1,40	0,51
МТГ	Стационарный	1,18	0,52
	Импульсный	1,50	0,60

Размер зерна в металле зон сварного шва, формируемого при импульсном режиме, уменьшается в 2,5...3,0 раза, а в ЗТВ — примерно в 2 раза по сравнению с получаемыми при стационарном режиме (рис. 3). Это способствует снижению послесварочных деформаций и увеличению ударной вязкости сварных соединений. Так, например, ударная вязкость сварных соединений, сформированных с использованием электродов марок МТГ и Kessel, повысилась на 8...27 % в процессе испытаний при +20 °C и на 15...24 % при -60 °C (табл. 2). При этом значения σ_b сварных соединений, выполненных этими электродами, почти не изменились (в сравнении с характерными для стационарного режима) и составили около 560 МПа.

В соответствии с действующими российскими стандартами по подготовке кромок свариваемых изделий газо- и нефтехимического оборудования (ОСТ 26-291-79), ограничению погонной энергии сварки и проведению послесварочной термической обработки соединения, полученные способами руч-

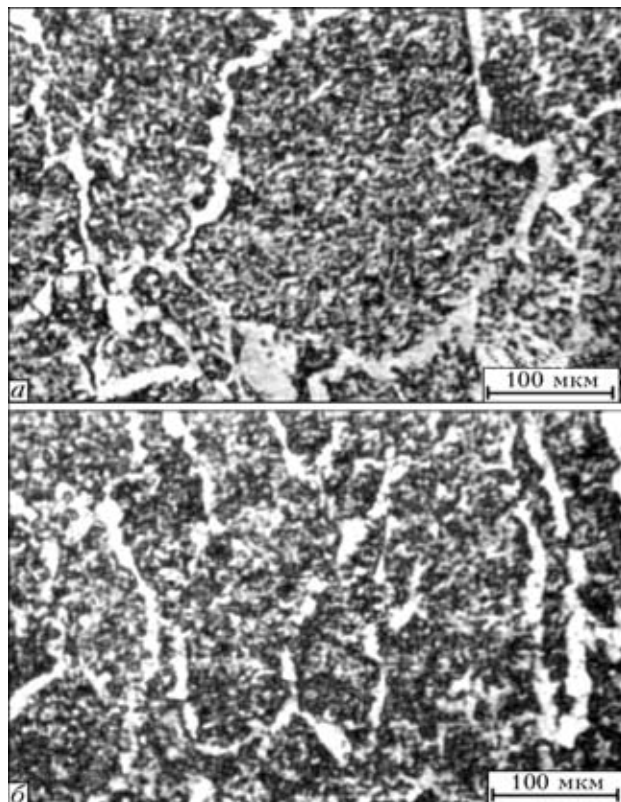


Рис. 3. Микроструктура металла шва в облицовочном слое соединения стали 17Г1СУ после сварки в стационарном (а) и импульсном (б) режиме, $\times 170$

ной дуговой сварки, механизированной под флюсом и в защитных газах, должны отвечать следующим требованиям. Минимальное значение KCV сварных соединений низколегированных марганцовистых и кремнемарганцовистых сталей при температуре ниже -20 °C должно составлять 0,3 МДж/м². Временное сопротивление сварных соединений при +20 °C должно равняться или быть выше σ_b свариваемого (основного) металла.

Анализ значений временного сопротивления металла сварных соединений из сталей 10Г2С и 17Г1СУ показал, что после сварки в импульсном режиме σ_b металла околошовной зоны во всех случаях превышает уровень прочности основного металла указанных сталей. Ударная вязкость металла сварного шва при $T_{исп} = -60$ °C после сварки в импульсном режиме стали 17Г1СУ с использованием электродов Kessel и МТГ соответственно в 1,7 и в 2,0 раза превышает требуемый стандартом уровень (0,3 МДж/м²) и на 24 и 15 % указанный показатель соединений, полученных сваркой в стационарном режиме. Важно отметить, что упомянутые значения ударной вязкости получены на сварных соединениях, не подвергнутых термической обработке (нормализации или улучшению), обычно проводимой для образцов и изделий из данного класса низколегированных сталей [1, 5]. По уровню прочности соединения исследованных сталей после сварки в импульсном режиме соответствуют требованиям стандарта к сварным соединениям труб нефте- и газопроводов. Это позволяет исключить послесварочную термическую обработку.

Выводы

1. Применение импульсного режима сварки труб большого диаметра (1420 мм) из марганцовистых сталей типа 10Г2С и 17Г1СУ, предназначенных для нефте- и газопроводов, позволяет повысить однородность структуры и в 2...3 раза уменьшить размер зерна металла сварного шва и ЗТВ основы.

2. Структурные изменения после импульсного режима сварки приводят к повышению пластичности металла зон сварного соединения, а также его ударной вязкости при 20 °С на 8...27 % и при -60 °С на 15...24 %.

Effect of a pulsed welding process on structure and mechanical properties of welded joints in large-diameter (1420 mm) pipes of manganese low-alloy steels, intended for manufacture of oil and gas pipelines, has been studied. It is shown that the pulsed welding conditions make it possible to improve homogeneity of structure and reduce grain size of the weld and HAZ zones. Structural changes at a positive temperature (20 °C) lead to increase of 8-27 %, and at a negative temperature (-60 °C) to increase of 15-24 % in ductility and impact toughness of the welded joint zones.

1. Лившиц Л. С., Хакимов А. Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.
2. Сараев Ю. Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. — Новосибирск: Наука, 1994. — 108 с.
3. Пути повышения эффективности строительства, эксплуатации и ремонта нефтегазовых объектов на основе адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки / Ю. Н. Сараев, Л. И. Макарова, Н. В. Кирилова и др. // Свароч. пр-во. — 2001. — № 5. — С. 31-37.
4. Влияние режима сварки на структуру, распределение твердости и механические свойства в сварных соединениях паропровода / Ю. Н. Сараев, И. М. Полетика, А. В. Козлов и др. // Там же. — 2002. — № 8. — С. 3-8.
5. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1985. — 408 с.

Поступила в редакцию 08.01.2004,
в окончательном варианте 30.06.2004

IV Международный фестиваль
Строительство и архитектура 2005

Организаторы:
Киевская городская администрация,
АО «Киевская международная контрактная ярмарка»
ВЦ «КиевЭкспоПлаза»,
Киев, ул. Салютная, 2-Б

23–27 марта 2005



Тематический раздел IV Международного фестиваля
СВАРКА и СТРОЙКА — 2005

Организатор: НТК «ИЭС им. Е. О. Патона»
Тел.: +380(44) 227 1238, 490 5745
e-mail: expo@paton-expo.kiev.ua

ул. Боженко, 11, Киев, 03680
Факс: +380(44) 227-6502
<http://www.paton-expo.kiev.ua>

Основные направления тематического раздела:

- Материалы для строительных конструкций.
- Проектирование сварных строительных конструкций.
- Оборудование, материалы и технологии для сварки, наплавки, резки.
- Антикоррозионные, упрочняющие, декоративные и др. виды покрытий.
- Изделия из полимерных материалов и способы их соединений.
- Оценка ресурсов строительных конструкций.
- Диагностика и новые методы контроля качества.
- Охрана труда и средства защиты.

Подробнее об условиях участия в выставке на сайте www.paton-expo.kiev.ua.



ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

М. В. КАРАСЕВ, д-р техн. наук, **Е. М. ВЫШЕМИРСКИЙ**, **В. И. БЕСПАЛОВ**, **Д. Н. РАБОТИНСКИЙ**,
И. М. ЗАХАРОВ, **А. Е. БЕЛЯЕВ**, инженеры (ЗАО НПФ «ИТС», г. С.-Петербург, РФ),
Г. В. ПАВЛЕНКО, ген. директор, **В. В. СОЛЯНИК**, инж.
(ОАО Электромашиностроительный завод фирма «СЭЛМА», г. Симферополь)

Описаны современные виды и особенности применения новых технологий механизированной сварки с использованием проволок сплошного сечения (малого диаметра) и порошковых проволок. Показана важность учета динамических свойств сварочных источников при анализе и сравнении сварочных установок для механизированной сварки.

Ключевые слова: дуговая механизированная сварка, новые технологии, установки, сравнительный анализ, проволоки сплошного сечения, порошковые проволоки, сварочные источники, динамические характеристики

В сварочном производстве России и других стран в последние пять лет широкое применение находят процессы полуавтоматической сварки. В современном сварочном производстве (машиностроение, судостроение, нефтегазовый сектор промышленности) доля полуавтоматической сварки проволоками сплошного сечения и порошковыми, включая самозащитные, достигает 75...85 % [1].

Следует отметить, что идет не просто более широкое применение известного процесса, а широкое внедрение новых технологий в рамках существующего на предприятиях старого и нового оборудования. Основной задачей внедрения новых технологий является повышение производительности труда и качества сварных соединений. В отраслевых учебных центрах активно ведется работа по подготовке сварщиков.

К числу новых технологий, несомненно, следует отнести широко применяемые в нефтегазовом секторе: способ сварки самозащитной проволокой заполняющих и облицовочных слоев шва неповоротных стыков трубопроводов (обеспечивается повышение производительности не менее, чем в 1,4 раза по сравнению с процессом ручной дуговой сварки по данным ВНИИСТ); способ сварки с формированием обратного валика на весу проволокой сплошного сечения диаметром 1,2...1,6 мм в защитных газах во всех пространственных положениях [2] (обеспечивается повышение скорости выполнения корневого прохода не менее, чем в 2 раза по сравнению со сваркой электродами с основным покрытием, и не менее, чем на 50 % по сравнению со сваркой электродами с целлюлозным покрытием); способ подварки сварного соединения с обратной стороны (обеспечивается минимизация содержания диффузионного водорода в сварном шве (до 1,34 мл/100 г), что в 3 раза меньше, чем при сварке электродами с основным видом покрытия, и в 10

раз меньше по сравнению со сваркой электродами с целлюлозным видом покрытия); способ сварки порошковыми проволоками в защитных газах (обеспечивается по сравнению со сваркой проволоками сплошного сечения повышение ударной вязкости не менее, чем в 2 раза, и повышение производительности процесса не менее, чем в 1,8 раза по данным ПО «СЕВМАШ»); способ сварки с регулируемым короткими замыканиями при выполнении в зазор корневых проходов и сварке тонколистового металла [2], а также многие другие. В связи с развитием способа сварки ВКЗ (вынужденные короткие замыкания) [2] вновь значительный интерес появляется к использованию проволок сплошного сечения диаметром 1,6 мм (при этом обеспечивается увеличение скорости сварки с 25 м/ч проволокой диаметром 1,2 мм до 50 м/ч проволокой диаметром 1,6 мм во всех пространственных положениях при сохранении показателей качества сварного шва и разбрызгивании не более 3 %). Эти моменты достаточно полно отражены в работе [1].

Вместе с широким внедрением новых технологий, естественно, применяются и новые приемы техники механизированной сварки (выступление наконечника над плоскостью выходного сечения сопла [2], колебательные движения горелки вдоль, а не поперек сварного шва и перпендикулярно ему, сварка на спуск, а не традиционно на подъем и др.).

Такое широкое развитие новых технологий и приемов техники сварки в рамках известного способа механизированной сварки в защитных газах [3] требует более осознанного подхода к выбору сварочного оборудования. В работе [4] сделана попытка систематизировать сварочные выпрямители и механизмы подачи по областям применения, схемным решениям и сварочным свойствам.

Наиболее точно произвести анализ и сравнение свойств современных сварочных установок для механизированной сварки можно по типовым осциллограммам тока и напряжения на дуге при привязке их к стадиям каплепереноса электродного ме-

талла в сварочную ванну. При этом надо иметь в виду, что эти свойства должны различаться для сварки проволокой сплошного сечения и порошковыми.

Типичные формы кривых сварочного тока и напряжений при традиционной сварке в углекислом газе приведены на рис. 1, *а*, при сварке ВКЗ — на рис. 1, *б* и при STT-процессе — на рис. 1, *в*. Как видно из рисунка, основное отличие новых видов оборудования заключается в повышенных динамических свойствах сварочных источников. Характерное время короткого замыкания традиционных установок типа ВДУ-506, ВС-300 и др. (рис. 1, *а*) составляет 10...20 мс, для установок типа ДК (рис. 1, *б*) — метод ВКЗ — 5...7 мс, для установки Invertec STT II (рис. 1, *в*) — метод STT — 2...5 мс.

В традиционных установках (рис. 1, *а*) частота коротких замыканий составляет не более 30...50 Гц и значительно изменяется при сварке, так как в годы создания этих установок не стояла задача приоритетного развития сварочных процессов с регулируемыми короткими замыканиями. Разрыв перемычки между сварочной проволокой и ванной при завершении короткого замыкания происходит при близком к максимальному току дуги. Это соответственно приводит к значительному разбрызгиванию (более 5 %), вызванному существенным воздействием электродинамических сил, хаотическому изменению размера капель электродного металла при сварке и к невозможности стабильно и в области широкого изменения режимных параметров управлять сварочным процессом.

В установках типа ДК (рис. 1, *б*) типичная осциллограмма по виду похожа на предыдущую, за исключением длительности и крутизны переднего и заднего фронтов линии тока дуги, особенно в области завершения короткого замыкания. Это приводит к качественным изменениям при сварке. Разрыв перемычки между сварочной проволокой и ванной происходит при значительно сниженном токе дуги (до 40...50 А), при этом резко снижается разбрызгивание электродного металла (до 3 % и менее), частота коротких замыканий составляет 120...150 Гц (для ВД-506ДК-4) и 70...80 Гц (для ВД-306ДК), размер капель электродного металла стабилизируется и управляется изменением режимных параметров [4], процесс стабилен и легко управляемый. Применяется проволока диаметром 1,6 мм и менее.

В установках Invertec STT II (рис. 1, *в*) осциллограмма имеет существенные отличия от двух предыдущих. Разрыв перемычки между сварочной проволокой и ванной происходит при еще более сниженном по сравнению с предыдущей установкой сварочным током, разбрызгивание электродного металла составляет менее 2 %, частота коротких замыканий — примерно 130...140 Гц, процесс стабилен и легко управляемый. Применяется проволока диаметром 1,2 мм и менее.

На установках двух последних типов уверенно производится сварка корневых и других слоев шва проволокой сплошного сечения в защитных газах. В работе [2] приведены основные технологические

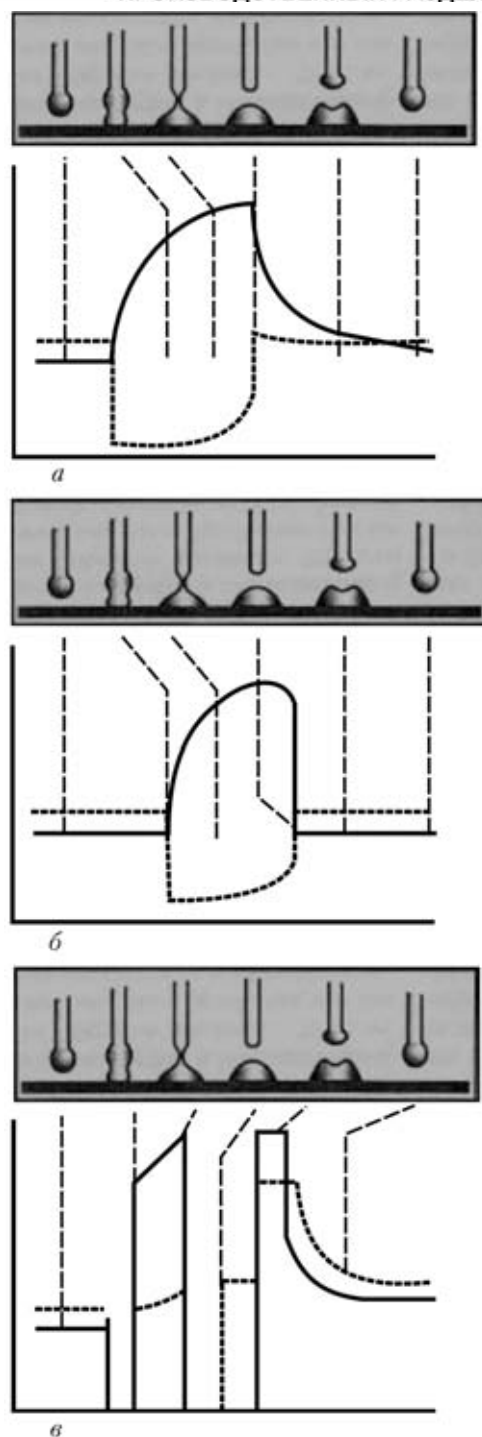


Рис. 1. Типичные формы кривых сварочного тока (жирная кривая) и напряжений (штриховая) при традиционной сварке в углекислом газе (*а*), при сварке ВКЗ (*б*) и при STT-процессе (*в*) (по данным Московского представительства Lincoln Electric Company)

отличия двух последних процессов и техника сварки корневых слоев шва проволокой сплошного сечения. Необходимо акцентировать внимание на различии в диаметрах применяемой проволоки и, как следствие, на различную линейную скорость сварки на установках последних типов.

Применение сварки в режиме коротких замыканий обеспечивает серьезное преимущество в обеспечении качества сварных соединений перед другими технологиями. На рис. 2 показан макрошлиф

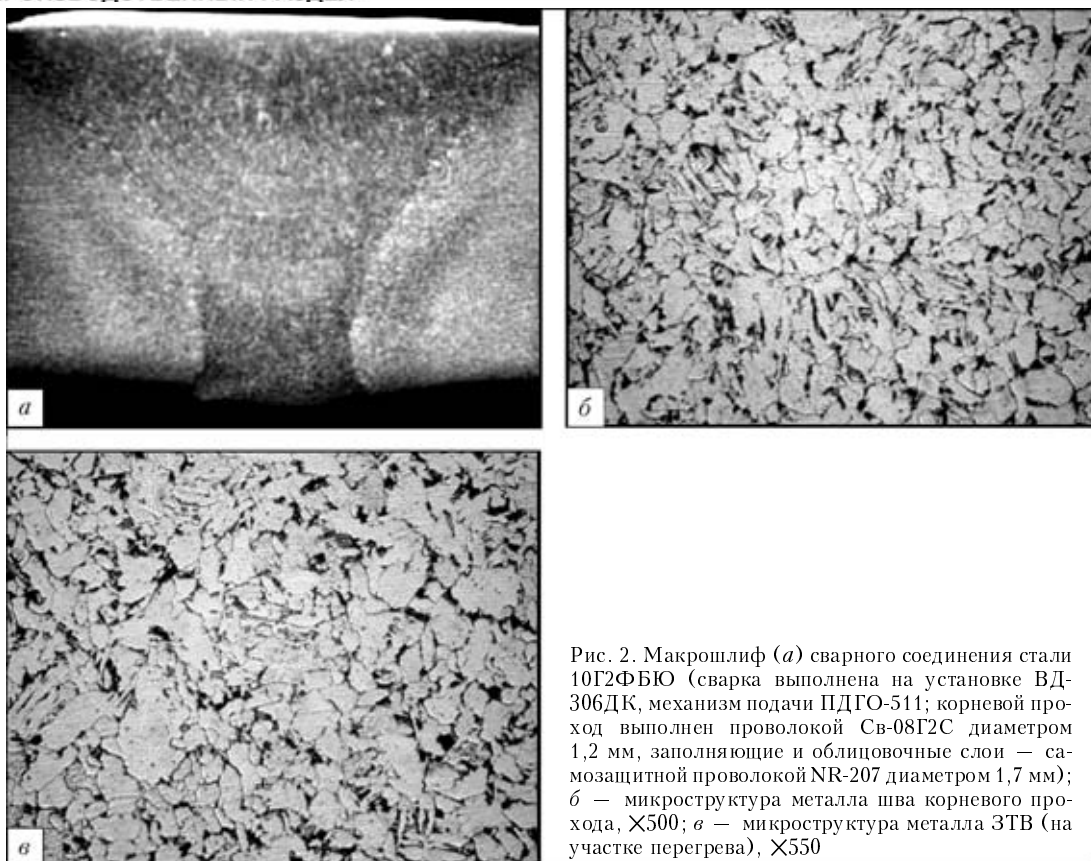


Рис. 2. Макрошлиф (а) сварного соединения стали 10Г2ФБЮ (сварка выполнена на установке ВД-306ДК, механизм подачи ПДГО-511; корневой проход выполнен проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм, заполняющие и облицовочные слои — самозащитной проволокой NR-207 диаметром 1,7 мм); б — микроструктура металла шва корневого прохода, $\times 500$; в — микроструктура металла ЗТВ (на участке перегрева), $\times 550$

сварного соединения с обратным валиком и микроструктура металла шва и ЗТВ.

Из анализа рис. 2 следует, что структура металла корня шва (рис. 2, б) близка к околошовной структуре металла в ЗТВ (рис. 2, в). Зона крупного зерна, которая, как правило, присутствует при сварке сталей такого класса практически не заметна. Это вызвано тем, что при коротком замыкании ток дуги снижается, что уменьшает тепловложение в свариваемое изделие. Основное преимущество от уменьшения тепловложения выражается в повышении уровня механических свойств изделия.

На сталях указанного типа достигаются следующие механические свойства: $\sigma_b = 618...659$ МПа (требования 600 МПа по СП 105-34-96), угол загиба более 120° , ударная вязкость KCV при -20°C равна $76...142$ Дж/см², в зависимости от расположения надреза — требования 34 Дж/см² по СП 105-34-96).

Результаты спектрального анализа контрольного сварного образца

Материал	Массовое содержание элементов, %					
	C	Ni	Mn	Cr	Ni	Ti
Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72	<0,12	<0,80	<2,00	17...19	8...9,5	0,5...0,8
Основной металл контрольного образца	0,11	0,73	1,65	17,1	8,87	0,74
Сварной шов	0,08	0,77	1,48	18,6	9,1	0,17

Способ сварки с короткими замыканиями дугового промежутка обеспечивает минимизацию выгорания легирующих элементов. При сварке нержавеющей сталей типа 18-10 на установке ВД-306ДК и механизме подачи ПДГО-510 получены следующие результаты:

сталь — 12Х18Н10Т, сварное соединение — стыковое, тип образца — ХП по ГОСТ 6996-66; $\sigma_b = 590...610$ МПа, угол загиба более 120° . Твердость основного металла $HV 204...210$, твердость металла шва $HV 212...218$.



Рис. 3. Выпрямитель тиристорного типа ВД-506ДК

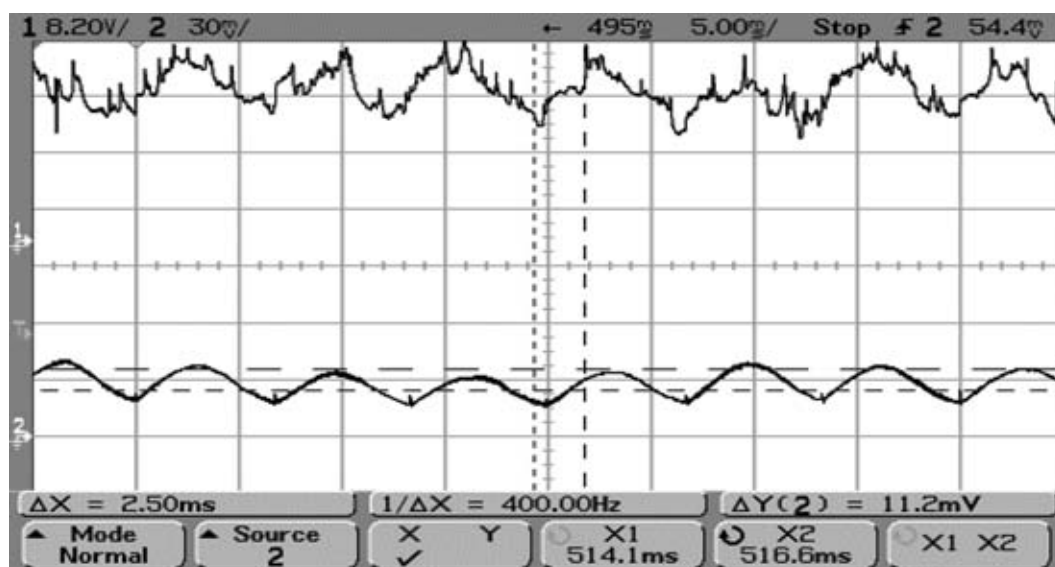


Рис. 4. Типичная осциллограмма сварки порошковой самозащитной проволокой типа NR-207 диаметром 1,7 мм на установке ВД-506ДК и механизме подачи ПДГО-511 (верхняя осциллограмма — напряжение на дуге, нижняя — ток дуги)

Результаты спектрального анализа контрольного сварного образца представлены в таблице.

При применении порошковых сварочных проволок требования к источникам существенно меняются. Это обусловлено тем, что при сварке порошковыми сварочными материалами, как и электродами с целлюлозным покрытием, возникновение коротких замыканий чаще всего ведет к появлению дефектов. Сварка в этом случае в отличие от сварки по методу ВКЗ или STT ведется «длинной» дугой. Другое отличие сварочных установок заключается в том, что длина дуги должна быть максимально стабильна, чтобы исключить неравномерное выгорание легирующих элементов. Это накладывает определенные ограничения на соотношение индуктивности дросселя и жесткости внешней вольт-амперной характеристики.

В последние годы в России при сварке порошковыми сварочными материалами наиболее часто применяют выпрямители тиристорного типа ВД-506ДК (рис. 3) («ИТС», г. С.-Петербург) и ДС-400 (ЛИНКОЛЬН, США). Они наиболее полно отвечают комплексу требований, предъявляемых к таким установкам. Возможность выпрямителей типа ДК эксплуатироваться как при сварке ВКЗ, так и при сварке порошковыми проволоками обусловлена тем, что имеется переключение видов внешних вольт-амперных характеристик. Объемы применения составляет более 5 тыс. штук каждого выпрямителя. На одном ПО «СЕВМАШ» эксплуатируется более тысячи комплексов ВД-506ДК с

механизмами подачи ПДГ-322М при сварке порошковыми проволоками. Как видно из рис. 4, процесс струйный, стабильный, кривые тока и напряжения повторяют сетевые пульсации, что отвечает техническим требованиям производителя сварочных материалов.

В заключение следует отметить, что за последние годы в России резко ускорился процесс внедрения новых сварочных технологий. Это определяет новые требования к применяемому сварочному оборудованию. Выше предпринята попытка анализа применимости серийно выпускаемого сварочного оборудования к требованиям новых технологических процессов и условиям использования новых сварочных материалов.

1. Анализ наиболее эффективного использования различных видов сварочного оборудования и сварочных материалов в производстве металлоконструкций / М. В. Карасев, С. В. Исаков, Д. Н. Работинский, А. В. Симонова // Сварка в Сибири. — 2002. — № 1, 2.
2. Новые разработки НПО «Сэлма-ИТС» в области дуговой сварки в защитных газах / М. В. Карасев, Д. Н. Работинский, Г. В. Павленко и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 40–46.
3. Сравнительный анализ сварочно-технологических свойств современных выпрямителей для сварки в защитных газах / М. В. Карасев, Д. Н. Работинский, Г. В. Павленко, К. А. Павлов // Сварка в Сибири. — 2003. — № 2. — С. 17–22.
4. Основные тенденции развития производства сварочного оборудования в объединении «СЭЛМА-ИТС» и его применение в России и странах СНГ / М. В. Карасев, Е. А. Копиленко, Г. В. Павленко и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 52–57.

Described are new methods and peculiarities of application of new technologies for mechanised solid (small diameter) and flux-cored wire welding. It is shown that allowance for the dynamic properties of welding power sources is important for analysis and comparison of mechanised welding units.

Поступила в редакцию 08.11.2004



ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ДРОССЕЛЯ СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н. И. ПОСТОЛАТИЙ, инж. (Кахов. з-д электросвароч. оборудования)

Описана методика определения необходимой индуктивности сварочной цепи постоянного тока и расчета конструкции дросселя сварочной цепи по допустимой скорости нарастания тока.

Ключевые слова: дуговая сварка, напряжение, сварочный ток, жесткая внешняя характеристика, электродинамика источника, пульсации напряжения и тока, каплеперенос расплавленного металла, закон управления, индуктивность, потокосцепление, магнитный поток, дроссель, геометрия магнитопровода

Одним из основных элементов сварочных выпрямителей является дроссель на выпрямленной стороне источника питания. От индуктивности дросселя зависят сварочные свойства источника. Практика настройки параметров сварочных выпрямителей тиристорных (плавно управляемых) и вентильных (со ступенчатым управлением) подтвердила определяющую роль электродинамики сварочной цепи на качество формирования наплавленного металла и минимизации потерь. Требования ГОСТ 25616–83, безусловно, необходимы, но явно недостаточны для оптимального выбора соотношений конструктивных параметров источника. Субъективная оценка опытными операторами-сварщиками характера процесса (вплоть до акустики) остается совершенно необходимой.

Если в управляемых выпрямителях в распоряжении разработчика, кроме выбора RL соотношений тракта сеть–трансформатор–мост–дроссель, имеется еще и закон управления [1], то в вентильных источниках определяющим является правильный выбор схемы дросселя в сочетании с индуктивностью короткого замыкания трансформатора (приведенной ко вторичной стороне). При работе двух выпрямителей на параллельную нагрузку в одном источнике (КИГ-401, КИГ-601) необходимо оптимизировать каждый параллельный тракт.

На Каховском заводе ЭСО накоплен опыт по определению требуемой индуктивности сварочной цепи постоянного тока по заданной начальной скорости нарастания тока и приближенного расчета конструктивных параметров дросселя при оптимальном их соотношении (сечение магнитопровода, количество витков, немагнитный зазор). Практика показывает, что дроссель, установленный для универсальных источников, по критериям для режима жестких внешних характеристик вполне пригоден и для падающих. Поэтому ограничимся источниками с ЖВХ.

Как следует из работы [2], наиболее неблагоприятным по формированию и потерям является режим сварки на токах 250...350 А, сопровожда-

ющийся крупнокапельными короткими замыканиями дугового промежутка (напряжение на дуге примерно 25...30 В). На осциллограмме напряжения на электроде зафиксирован ступенчатый «провал», равный $U_{св}$.

Очевидно, что эта ступень напряжения в начальный момент распределяется последовательно по участкам всего тракта пропорционально их индуктивностям. Для всего тракта в начальный момент можно записать

$$-U_{св} = L \frac{di_{\max}}{dt}, \quad (1)$$

где L — суммарная индуктивность тракта, приведенная ко вторичной (сварочной) цепи; $di_{\max}/dt$ — максимальная (начальная) скорость нарастания тока.

Далее скорость убывает по экспоненте с постоянной времени $\tau = L/R$, где R — суммарное активное сопротивление тракта, приведенное ко вторичной (сварочной) цепи.

С одной стороны, слишком быстрое нарастание сварочного тока вследствие малой индуктивности приведет либо к разрушению капли, либо к флуктуациям ванны и плохому формированию. С другой, — чрезмерная индуктивность вызовет затянутый (вялый) каплеперенос, а следовательно, и плохое формирование.

Влияние суммарного активного сопротивления R , очевидно, состоит в том, что установившееся значение тока короткого замыкания, к которому стремится переходный процесс при малом R , настолько велико, что крутизна формы нарастания тока приведет также либо к разрушению капли, либо к флуктуациям ванны.

Противоречие заключается еще и в том, что с учетом КПД следует стремиться к возможно меньшему R . Поскольку R определяет крутизну внешней статической характеристики источника (т. е. способность к саморегулированию дуги при постоянной скорости подачи электрода), то этот параметр должен быть компромиссным.

Из выше приведенного следует, что на сварочные свойства влияет весь комплекс параметров, и отдельно взятый параметр не может эти свойства характеризовать. Однако главным параметром все же остается наибольшая скорость нарастания тока.

Согласно работе [2] по динамическим характеристикам источники делятся на инерционные

(10...30), средне- (30...60), мало- (70...200) и безынерционные (свыше 200 кА/с).

В соответствии с этой классификацией определим требуемую суммарную индуктивность для каждой группы с учетом формулы (1) и при $U_{св} \approx 25$ В:

$$L = U_{св} \frac{di_{\max}}{dt}.$$

Для инерционных источников L составляет $(2,5...1,0) \cdot 10^{-3}$, среднеинерционных — $(0,8...0,4) \cdot 10^{-3}$, малоинерционных — $(0,36...0,125) \cdot 10^{-3}$ Гн.

Согласно техническим характеристикам 13 источников [2] их КПД составляет 70...72 %, следовательно, их активное сопротивление короткого замыкания приблизительно одинаково, и ток короткого замыкания (в частности, при каплепереносе) имеет одинаковый порядок.

Индуктивность дросселей источников (кроме электромашинных) составляет 0,16...0,56 мГн, что позволяет отнести их к средне- и малоинерционным. Опыт короткого замыкания источника КИГ-401 по тракту Y/Y-мост на минимальной и максимальной ступени показывает индуктивность короткого замыкания в пределах 0,10...0,11 мГн.

Опыт короткого замыкания этого же источника по тракту Y/Δ показывает их индуктивность, равную 0,234...0,345 мГн. Проверка сварочных свойств по тракту Y/Δ-мост (без дросселя) дает хороший результат. При проверке КИГ-401 по тракту Y/Y-мост (без дросселя) установлено, что сварка невозможна.

Аналогичные результаты получены на источнике КИГ-601. Выходная цепь этих источников по дросселю имеет несимметричную схему, которая и приводит к взаимной симметрии электродинамики двух параллельных трактов.

Индуктивность дросселя КИГ-401 по тракту Y/Y-мост-дроссель составляет $0,11 + 0,45 = 0,56$ мГн; по тракту Y/Δ-мост-дроссель — $0,345 + 0,125 = 0,47$ мГн.

Следовательно, источники КИГ-401 и КИГ-601 можно отнести к среднеинерционным.

Из приведенного выше следует, что для определения требуемой индуктивности дросселя после задания допустимой скорости нарастания и определения из опыта коротких замыканий или расчета внутренней индуктивности (рассеяния) трансформатора

$$L_{др} = L_{тр} - L_{к.з'}$$

где $L_{др}$ — индуктивность дросселя; $L_{тр}$ — суммарная требуемая индуктивность тракта по условию допустимой скорости нарастания тока; $L_{к.з'}$ — индуктивность короткого замыкания трансформатора из опыта коротких замыканий (или расчета).

Для расчета используются следующие обозначения: δ — суммарный зазор из материала с относительной магнитной проницаемостью, близкой к вакууму; $l_{ст}$ — средняя длина магнитосиловой линии по стальному магнитопроводу, м; I — ток

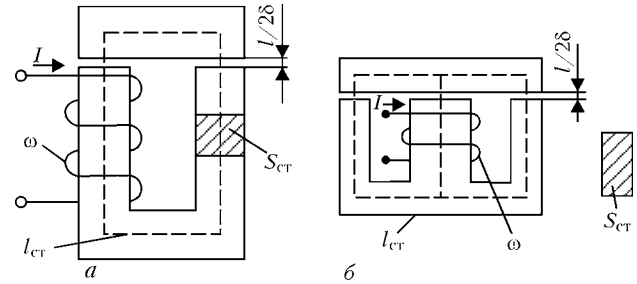


Рис. 1. Электромагнитные схемы дросселя с П-образным (а) и Ш-образным (б) магнитопроводом

в катушке, А; ω — количество витков в катушке; $S_{ст}$ — сечение магнитопровода, м²; B — индукция в магнитопроводе (и в зазоре), Тл; $H_{ст}$ — напряженность магнитного поля в стали, А/м; Φ — магнитный поток по сечению стали, Вб; $\Psi = \Phi\omega$, Ψ — потокоцепление, Вб.

На рис. 2 приведено семейство кривых намагничивания магнитопроводов, содержащих различные немагнитные зазоры δ_v вплоть до разомкнутого магнитопровода, где кривая вырождается в линейную зависимость намагничивания воздуха:

$$B_v = \mu_v H_v,$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; 1/\mu_0 = 796; \frac{\mu_v}{\mu_0} \approx 1 [3],$$

где μ_v — магнитная проницаемость в зазоре; H_v — напряженность магнитного поля в зазоре, А/мм.

Поскольку кривые 2, 3, ..., n отражают зависимость индукции B в двух средах, удобнее рассматривать их в координатах $B = f(I)$, где I — ток в обмотке дросселя.

Рассмотрим связь между кривой намагничивания дросселя $B = f(I)$ и его индуктивностью. Запишем выражение для индуктивности $L_{др}$ катушки с магнитопроводом без зазора в любой точке его кривой намагничивания

$$L_{др} = \frac{d\Psi}{dI}. \quad (2)$$

В формуле (2) выполним следующие эквивалентные замены и подстановки [4]:

$$\begin{aligned} L_{др} &= \frac{d\Psi}{dI} = \frac{d}{dI} \omega \Phi = \frac{d}{dI} \omega B S_{ст} = \frac{d}{dI} \omega \mu \mu_0 H S_{ст} = \\ &= \frac{d}{dI} \omega \mu \mu_0 \frac{\omega I}{l_{ст}} S_{ст} = \frac{\mu \mu_0 \omega^2 S_{ст}}{l_{ст}} = \frac{\mu_0 \omega^2 S_{ст}}{l_{ст}/\mu}, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ — относительная динамическая магнитная проницаемость среды в ее рабочей точке. Здесь $\mu = f(B)$ и в итоге является нелинейной функцией.

Анализируя формулу (3), можно условно считать, что ферромагнитный магнитопровод длиной $l_{ст}$ заменен линейной средой длиной $l_{ст}/\mu$ с абсолютной магнитной проницаемостью μ_0 , а индуктивность $L_{др}$ записана для рабочей точки магнитопровода. Кроме того, рассматривая кривую намагничивания электротехнической стали [4], где $\mu = (dB/dH)/\mu_0 = f(B)$ имеет в начале порядок $(5,0...4,5) \cdot 10^3$, в середине (в районе перед «ко-



леном») $(2,0 \dots 1,5) \cdot 10^3$, а на участке насыщения стремится к единице; индуктивность катушки со сталью снижается по мере намагничивания вплоть до пренебрежимого минимума. Таким образом, замкнутый магнитопровод насыщается на малых токах, и на токах сварки дроссель работать не будет.

Если ввести в магнитопровод некоторый участок (зазор) δ , то в координатах $B = f(I)$ кривая намагничивания растянется вдоль оси тока, кривые 2, 3, ..., n по мере увеличения зазора будут стремиться к «кривой» намагничивания вакуума, принимая все более линейный характер.

С учетом формулы (3) для расчета индуктивности дросселя такой конструкции выражение примет вид [4]

$$L_{\text{др}} = \frac{\mu_0 \omega^2 S_{\text{ст}}}{\delta + l_{\text{ст}}/\mu}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что в ненасыщенном дросселе индуктивность практически не зависит от длины магнитопровода из-за его относительно небольшой эквивалентной длины $l_{\text{ст}}/\mu$. Пока магнитопровод не начинает насыщаться, индуктивность зависит только от сечения стали, количества витков и размера зазора.

Следовательно, задача состоит в том, что, кроме расчета заданной индуктивности в рабочей точке ферромагнитной среды, следует в этой точке оказаться при заданном сварочном токе и оптимальном соотношении сечения стали, количестве витков и зазоре. Формула (4) однозначного решения не обеспечивает, требуются дополнительные условия.

Рабочей точкой B_p можно задаться, исходя из максимально допустимой индукции (насыщения) B_{max} .

Анализ конструктивных параметров дросселей известных источников показывает, что их рабочая точка B_p находится на уровне

$$B_p \approx 0,75 B_{\text{max}},$$

что на практике достаточно для сопротивления пульсациям сварочного тока.

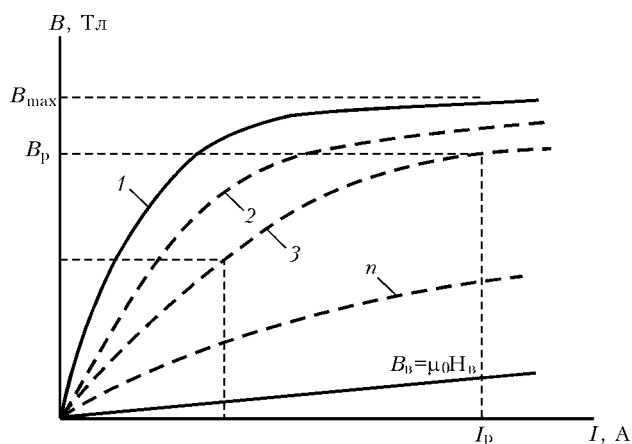


Рис. 2. Зависимость намагничивания замкнутого магнитопровода из ферромагнитного материала от тока при различных зазорах

В ненасыщенном магнитопроводе с зазором рабочая точка B_p однозначно определяется напряженностью магнитного поля H_p в зазоре

$$B_p = \mu_0 H_p.$$

Магнитодвижущая сила намагничивания $I_p \omega$ магнитной цепи по закону полного тока распределяется на зазор δ и ферромагнитный участок $l_{\text{ст}}$

$$I_p \omega = \delta H_p + l_{\text{ст}} H_{\text{ст}}. \quad (5)$$

Заменим в математической модели по формуле (5) ферромагнитный участок эквивалентным ему по магнитному сопротивлению участком добавочного зазора

δ , мм	ω	$S_{\text{ок}}, \text{мм}^2$	$S_{\text{ст}}, \text{мм}^2$	L , мГн
$I_p = 150 \text{ A}$				
1	8	800	560	0,0391
2	15	1500	1050	0,138
4	31	3100	2170	0,631
8	61	6100	4270	2,45
10	76	7600	5320	3,80
12	91	9100	6370	5,45
$I_p = 300 \text{ A}$				
1	5	100	700	0,0191
2	9	1800	1260	0,059
4	16	3200	2240	0,174
8	31	6220	4340	0,642
10	38	7600	5320	0,950
12	46	9200	6440	1,410
$I_p = 500 \text{ A}$				
1	3	1000	700	0,00688
2	5	1666	1167	0,017
4	10	3332	2332	0,0706
8	18	6000	4200	0,21
10	23	7667	5370	0,352
12	27	9000	6300	0,475
$I_p = 600 \text{ A}$				
1	2	800	560	0,0025
2	4	1600	1120	0,0105
4	8	3200	2240	0,0434
8	16	6400	4480	0,177
10	19	7600	5320	0,235
12	23	9200	6440	0,350
$I_p = 1000 \text{ A}$				
1	—	—	—	—
2	3	2000	1400	0,0074
4	5	3330	2330	0,017
8	9	6000	4200	0,052
10	12	8000	5600	0,099
12	14	9330	6530	0,132

$$l_{\text{ст}} H_{\text{ст}} = \frac{l_{\text{ст}}}{\mu} H_p$$

(как следует из кривых намагничивания электро-технических сталей [5], на рабочих участках этот параметр находится в пределах $1,5 \cdot 10^3 \leq \mu \leq 5 \cdot 10^3$).

Подставляя в формулу (5) перепад магнитного потенциала на добавочном зазоре, получаем

$$I_p \omega = \delta H_p \frac{l_{\text{ст}}}{\mu} H_p = H_p \left(\delta + \frac{l_{\text{ст}}}{\mu} \right)$$

С учетом зависимости (5) имеем

$$I_p \omega = \frac{B_p}{\mu} \left(\delta + \frac{l_{\text{ст}}}{\mu} \right)$$

откуда

$$\omega = \frac{B_p}{I_p} \frac{\delta + l_{\text{ст}}/\mu}{\mu_0}. \quad (6)$$

По опыту проектирования дросселей $l_{\text{ст}}/\mu$ находится в пределах 0,1...0,2 мм, что позволяет в первом приближении принимать его равным $\delta_{\text{доп}}$, т. е. примерно 0,15 мм.

Задавшись рабочей точкой $B_p = 0,75 B_{\text{max}}$, при рабочем токе I_p по формуле (6) можно определить количество витков в зависимости от зазора:

$$\omega \approx \frac{0,75 B_{\text{max}}}{I_p} \frac{\delta + 0,15}{\mu_0} \quad (7)$$

(например, для стали 3414 полагаем $B_{\text{max}} = 1,8$ Тл).

Для расчета индуктивности по формуле (3) следует определиться с размерами магнитопровода.

$$S_{\text{ок}} = \frac{I_p \omega}{\Delta K_{3.0}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{ок}}$ — сечение окна, мм²; Δ — плотность тока в обмотке по условиям нагрева (для меди

принимаем $\Delta = 2,5$ А/мм² с учетом искусственной вентиляции); $K_{3.0}$ — коэффициент заполнения окна; $K_{3.0} = 0,6$).

По опыту проектирования магнитопроводов принимаем

$$S_{\text{ст}} \approx 0,7 S_{\text{ок}}. \quad (9)$$

Расчет зависимости количества витков ω , размера окна $S_{\text{ок}}$, сечения магнитопровода $S_{\text{ст}}$, индуктивности дросселя $L_{\text{др}}$ от немагнитного зазора δ (при рабочей точке $B_p \approx 0,75 B_{\text{max}} = 1,4$ Тл) по формуле (4) сводим в таблицу.

Анализ таблицы показывает, что получить требуемую индуктивность дросселя при заданном рабочем токе путем простого наращивания количества витков невозможно из-за насыщения магнитопровода дросселя.

Поэтому следует, ориентируясь по этой таблице, сначала определиться с зазором, далее с количеством витков (7), затем с сечением магнитопровода (8), (9), потом по формуле (4) проверить индуктивность дросселя $L_{\text{др}}$. Последующие уточнения конструкции для получения заданного $L_{\text{др}}$ по условию сохранения рабочей точки возможны только за счет сечения стали.

После выбора профиля пластины следует выполнить уточненный расчет по формулам (6) и (4).

1. О сварочных свойствах тиристорных выпрямителей / Н. И. Постолатий, А. Д. Глущенко, С. В. Дух, Л. С. Гриценко // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 42–44.
2. Потаповский А. Г. Сварка в углекислом газе. — М.: Машиностроение, 1984. — 81 с.
3. Чертов А. Г. Физические величины. — М.: Высш. шк., 1990. — 220 с.
4. Методика расчета дросселей входного и выходного фильтров сварочных инверторных источников питания при использовании стандартных магнитопроводов / И. В. Пенетгов, С. Н. Мещеряк, М. В. Турты, С. В. Рымар // Автомат. сварка. — 1997. — № 4. — С. 34–39.
5. Копылов И. П. Проектирование электрических машин. — М.: Энергия, 1980. — 204 с.

A procedure is described for determination of the required inductance of DC welding circuit and design of welding circuit choke by the admissible rate of current increment.

Поступила в редакцию 14.06.2004



УДК 621.791.3.039

ИСТОЧНИКИ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПАЙКИ

А. М. ЖАДКЕВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Ретроспективно рассмотрено развитие оборудования и техники нагрева в процессе пайки с применением углеводородного и водородного топлива. Проанализированы технологические особенности и возможности пламени различного состава при ацетилено-кислородной, водородно-кислородной и атомно-водородной пайке. Показана роль ряда специалистов и организаций в истории газовой и газозлектрической пайки.

Ключевые слова: газокислородная, водородно-кислородная, атомно-водородная пайка, углеводородное топливо, газовые горелки, источники тепла, электрическая дуга

Важнейшими классификационными признаками пайки являются степень и температура расплавления [1], которые напрямую связаны с физико-химическими характеристиками источника нагрева. В течение нескольких тысячелетий большинство способов пайки и кузнечной сварки металлов основывалось на использовании тепла, выделяющегося при горении древесины (торфа, каменного угля). Для интенсификации процесса горения, повышения температуры и концентрации применялось искусственное дутье. При этом возможности управления режимом пайки были ограничены сравнительно низкой теплотворной способностью топлива и слабой интенсивностью поступления воздуха.

В настоящее время количество способов пайки, классифицируемых по источникам нагрева, насчитывает несколько десятков. Задачей настоящей работы является анализ генезиса пайки, ее технические возможности, особенности применения и роль источников тепла в развитии припоев и технологий пайки.

С древнейших времен горение угля, древесины и других углеводородов использовали в металлургии с тремя основными целями: получения тепла, восстановления металлов из оксидов и (реже) легирования [2]. При пайке углеводородным пламенем полностью используется только первая функция, сходная с металлургией, и реже — вторая. При этом часто возникают и специфические функции: обеспечение и поддержание температурных условий для химико-металлургических реакций между припоем и поверхностными слоями изделий; улучшение физических условий (повышение жидкотекучести, увеличение допустимого зазора и др.). Следует заметить, что эти особенности характерны не только для способов пайки с нагревом углеводородным пламенем, но и для ряда других способов пайки (с другими источниками тепла, например, основанными на реакции окисления водорода).

Начиная с VIII в. металловедение и металлообработка привлекает внимание специалистов на Ближнем Востоке.

Большой вклад в научные основы химии внес арабский ученый Джабир ибн Хайян (латинизированное имя — Гебер). В частности, в зависимости от поведения металлов на воздухе и в огне, он разделил их на «благородные» и «неблагородные». Ученые Халифата расплавляли, выпаривали, перегоняли, проводили всевозможные реакции с разнообразными веществами, в частности, открыли способ получения водорода при реакции металлов с кислотами, установили точки плавления (сравнительные) различных металлов, разработали технологию воздушно-водородной и кислородно-воздушной пайки [3]. Естественно, что важнейшей технологией производства сложных изделий из известных в то время металлов была пайка.

Широкое применение у восточных народов золота в быту и архитектуре привлекло внимание европейцев. Результатом крестовых походов западноевропейских рыцарей и монахов за богатствами арабов было, кроме всего прочего, появление алхимиков [4]. Первыми алхимиками в основном были монахи, перенявшие знания у арабов. Они совершенствовали конструкции горелок, аппаратов для получения горючих газов и кислорода. Их достижения, хотя и не привели к существенному прогрессу в металлургии, технологии плавления и пайки, но обеспечили расцвет многих ремесел, связанных с металлообработкой. Мастерство литейщиков, кузнецов, лудильщиков (паяльчиков) и других металлистов перестало быть секретом отдельных средневековых цехов [5].

Накопленные к середине XVI в. научные знания и опыт изложены в 12-ти томной энциклопедии «О металлах» (De re metallica) выдающегося немецкого ученого врача, общественного деятеля Георга Бауэра (латинизированное имя — Агрикола) [6]. В этом труде, изданном в 1556 г., он обобщил опыт в области металлургии.

К середине XIX в. были разработаны оптимальные конструкции аппаратов для получения водорода, выделяющегося при реакции азотной кислоты с цинком, и горелки для пайки и сварки. Температура водородно-кислородного пламени достигала 2600 °С, что превышало температуру плавления не только серебра и золота, но и платины [7]. При одинаковом объемном соотношении водорода и кислорода различаются три зоны пламени: внутреннее ядро

Теплотворность и температура пламени горючей смеси с кислородом, °С

Наименование горючего и его примерный состав, об. %	Низшая теплотворность при 20 °С и 760 мм рт. ст., ккал/м ³	Температура пламени в смеси с кислородом, °С
Ацетилен C_2H_2	12600	3150
Водород H_2	2400	2100...3100
Коксовый газ 50...60 % H_2 , 25...30 % CH_4 , 5...7 % CO , 6...13 % N_2 , CO_2	3500...4200	2000
Природный газ 96...98 % CH_4 , 0,6...1,0 % C_2H_6 , C_3H_8 , 1,0...1,5 % N_2 , CO_2	7500...7900	2000
Нефтяной газ 12 % H_2 , 28 % C_2H_2 , C_3H_8 , 50 % CH_4 , 10 % CO , CO_2	9800...13500	2300
Бензин	10200... 10600*	2500... 2600
Керосин	10000... 10200*	2450... 2500

Примечание. Отмеченные звездочкой данные для бензина и керосина приведены в килокалориях на килограмм.

синего цвета (1), средняя зона светло-голубого (2) и факел бледно-розового цвета (3) (рис. 1).

Прорыв к новому, более производительному и эффективному виду пайки связан с применением природных газов и способов промышленного производства ацетилена и кислорода, их сжатия, транспортировки и хранения.

В 1835 г. английский ученый Э. Деви впервые получил из карбида кальция (CaC_2) ацетилен (C_2H_2); реакцию взаимодействия карбида кальция с водой $CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2$ синтезировал из угля и водорода в 1860 г. французский химик П. Э. Бертелло [8] (рис. 2).

В то время для освещения больших городов, общественных зданий, цехов и отдельных домов использовали газовые фонари, в которых газ подавался централизованно. Однако ацетилен не применяли из-за высокой стоимости карбида кальция, получаемого в лабораторных электропечах. Лишь в 1892 г. сотрудник американской компании «Вильсон алюминий» Т. В. Вильсон провел первую плавку карбида кальция по технологии, достаточно эффективной для промышленного использования [9]. Одновременно с ним дешевый способ выплавки карбида кальция из кокса и извести разработал французский ученый А. Муассан. Стоимость продукта снизилась в несколько тысяч раз [10]. Тем

не менее, ацетилен как технологический (а не осветительный) газ привлек внимание специалистов только после сообщения А. Шателье в 1895 г. о том, что температура сгорания ацетилена в кислороде достигает 4000 °С [11].

При экзотермической реакции $C_2H_2 + 2,5O_2 = 2CO_2 + H_2O + Q$ количество выделяющегося тепла в 5 раз превышало количество тепла, выделяющегося при сгорании водорода, и более чем в 1,5 раза при сгорании природного газа (таблица) [12]. Широкое применение ацетилена стало возможным после установления инженером французского отделения компании «Томсон-Хьюстон» Г. Клаудом возможности растворения ацетилена в жидкостях. Ацетилен начали закачивать под давлением до 2,5 МПа в баллоны с ацетоном и транспортировать, не опасаясь взрывов [13] (рис. 3).

Таким образом, к началу XX в. были найдены принципиальные конструкторские и технологические решения по обеспечению газопламенной пайки, и она среди других способов пайки заняла ведущее место.

Использование ацетилено-кислородного пламени при пайке превалировало над другими газо- и парообразными углеводородными горючими смесями. Однако для газопламенной пайки (так же, как и для газовой сварки), кроме того, использовали коксовый, пиролизный, природный нефтяной газ, пары бензина и керосина.

Однако с точки зрения получения тепла ацетилено-кислородное пламя является наиболее эффективным из всех углеводородных источников нагрева, и пайка латунными медными, бронзовыми, стальными припоями по качеству и производи-

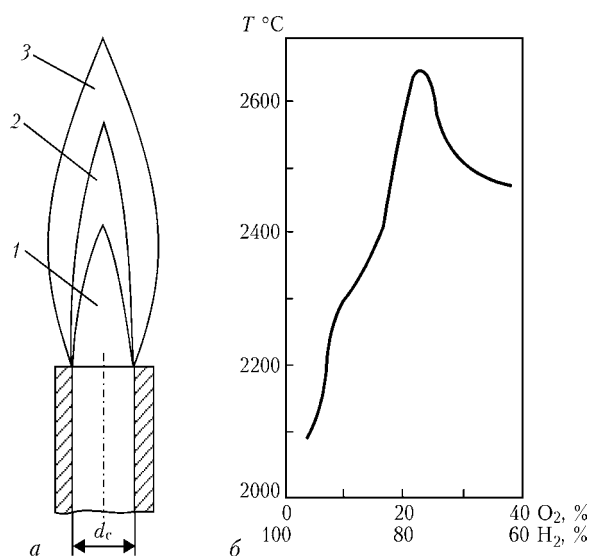


Рис. 1. Строение водородно-кислородного пламени (а) и изменение его температуры в зависимости от состава смеси (б)

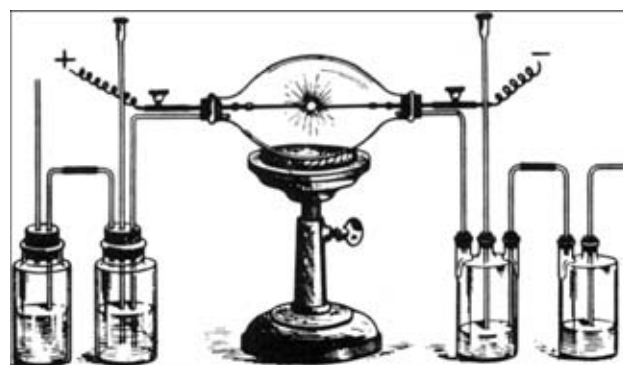


Рис. 2. Прибор Бертелло для получения ацетилена (1862)

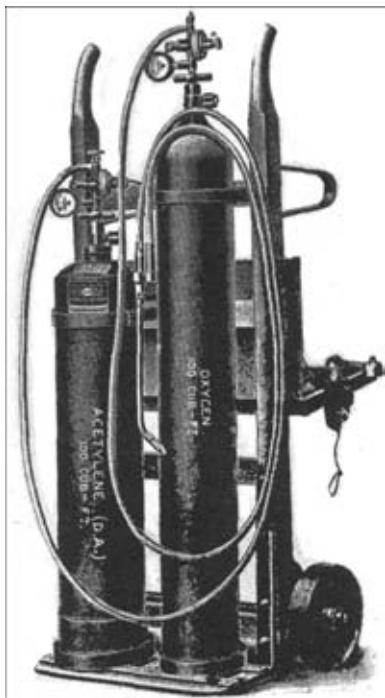


Рис. 3. Передвижное оборудование для газовой сварки и пайки (1916)

тельности конкурировала с дуговой сваркой тонкообмазанными электродами.

При использовании пламени для сварки и пайки необходимо учитывать, что процессы распада ацетилена и окисления углерода и водорода проходят несколько стадий. Опуская цепь химических превращений, описанных в работах К. К. Хренова [13], Н. Н. Клебанова [14], Д. Л. Глизманенко, Г. Б. Евсеева и других, следует отметить, что в определенных участках пламени имеются H , H_2 , C , CO . Пламя (рис. 4) имеет три зоны (I–III) с различной температурой, в наружной оболочке ядра происходит распад ацетилена ($C_2H_2 = 2C + H_2$) и реальная температура в оболочке ядра не превышает $1500^\circ C$. Для пайки чаще всего «используется» зона пламени, находящаяся сразу за ядром, где в результате реакции ($C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$) образуется водород, обладающий восстановительными свойствами по отношению к оксидам многих металлов. К тому же именно в этой зоне наиболее высокая температура пламени.

Сведения о времени появления способов пайки без непосредственного контакта с открытым пламенем отсутствуют. Тем не менее, можно предположить, что пайка и лужение с использованием тепла разогретых газов (в печи), а также тепла, передающегося через подставку или паяльник, возникли намного раньше способов газопламенной пайки.

Эффективность газопламенной пайки в значительной степени зависит от конструкции горелок. Долгое время использовали наддув мехами (наподобие кузнечных) или с помощью насосов и механических воздуходувок. Распространение газового освещения и особенно начавшаяся в конце XIX в. борьба «газоосветительных» компаний с «электроосветительными» стимулировала совершенствование аппаратуры [15]. Смесь горючего

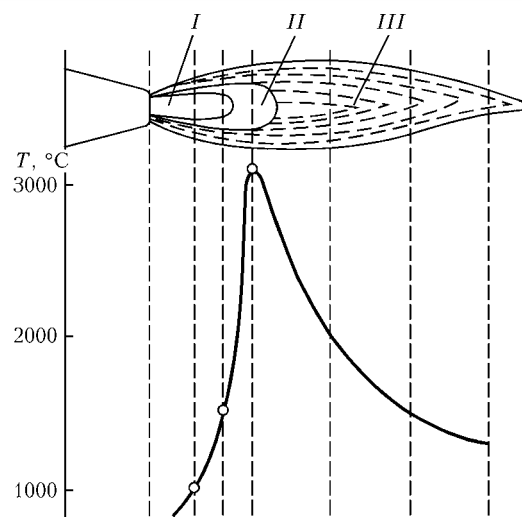


Рис. 4. Структура ацетилено-кислородного пламени и распределение температуры по его длине

газа и воздуха (а затем кислорода) не должна была взрываться ни внутри, ни на выходе из горелки и должна была обеспечивать высокую концентрацию теплоты [16]. Уже в первой половине XIX в. были созданы устройства, предотвращающие обратный удар потока горящего газа внутрь канала, сначала для водородно-кислородного пламени, а затем и углеводородно-кислородного. Сложнее оказалось выполнить второе условие — найти конструкцию горелки, в которой углеводороды сгорали бы полностью. Долгое время плотный нагар углерода оседал на стенках канала и засорял сопло.

Ч. Пикар из компании «Френч ацетилен диссолвед» нашел комплексное решение — горючий газ и кислород смешивали внутри горелки, а ацетилен подавали из баллонов под избыточным давлением [16]. Из генераторов же газ выходил под нормальным давлением, поэтому другой сотрудник этой же компании (Э. Фуше) в 1909 г. разработал горелку, в которую под давлением подавали кислород, а ацетилен всасывался благодаря инжекции [17]. Эти два принципа стали основой для совершенствования газовых горелок в последующие годы [18]. Одновременно интенсивно были усовершенствованы и ацетиленовые генераторы — к концу XIX в. европейские страны и США выпускали десятки тысяч генераторов трех типов («карбид в воду»; «вода на карбид» и смешанный тип), значительную часть которых использовали не только для сварки, но и для пайки (рис. 5, 6).

Применение газопламенной обработки в машиностроении в России и в Западной Европе началось одновременно. В 1906 г. газовую сварку и пайку демонстрировали в Московском техническом училище. К 1911 г. газосварочные посты (где также и паяли) имелись в железнодорожных мастерских, заводах Петербурга, Москвы, Екатеринослава, Урала и в других регионах. В это же время акционерное общество «Перун» открыло заводы по выпуску оборудования в Петербурге, Варшаве и Екатеринославе [19, 20]. Интенсивное развитие российской промышленности в предвоенные и в годы первой мировой войны потребовало подго-

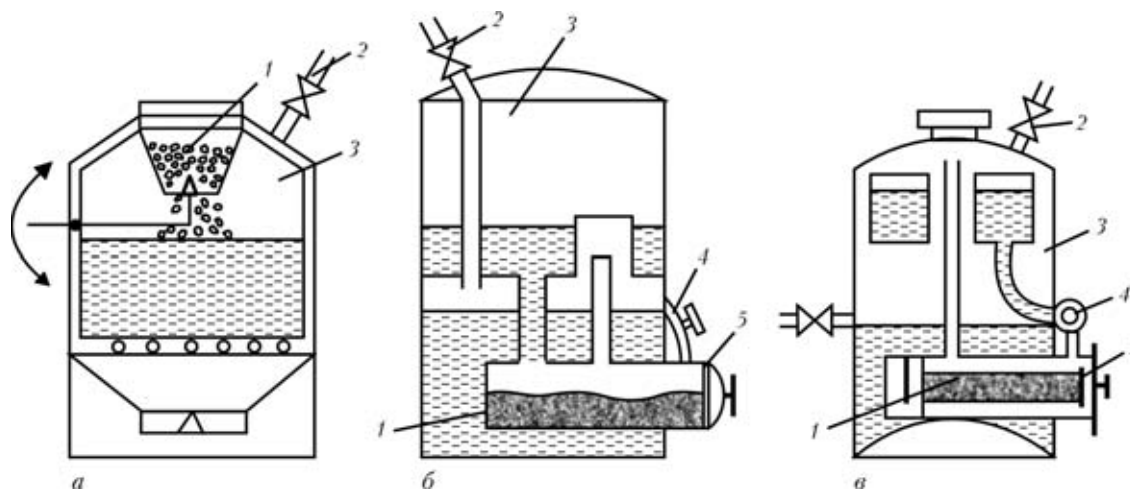


Рис. 5. Схемы ацетиленовых генераторов: *а* — с подачи в воду карбида кальция; *б* — с подачи порций воды в реторту с карбидом; *в* — с периодическим взаимодействием карбида с водой (смешанный тип); 1 — карбид кальция; 2 — отбор газа; 3 — газосборник; 4 — подача воды; 5 — реторта

товки специалистов. В Петроградском технологическом институте была организована школа «свинцово-паяльного дела и автогенной сварки». Профессор В. Я. Курбатов в 1918 г. написал монографию, ставшую пособием для специалистов [20]. На заводах российско-американского акционерного общества «Рагаз» (в г. Ростове и других городах) за период 1927–1930 гг. было выпущено 2074 шт. ацетиленовых генераторов, 5782 шт. сварочных горелок, 4632 шт. редукторов. Более интенсивное развитие автогенной промышленности началось в 1930-х годах после ликвидации смешанных иностранно-советских предприятий.

Быстрыми темпами развивалась кислородная промышленность, строились печи по выплавке карбида и цехи по производству газосварочного оборудования, было налажено производство пропан-бутана из нефти и метана, из природного газа. За десять лет индустриализации (к 1938 г.) СССР по производству кислорода вышел на первое место в Европе и второе, после США, в мире. В 1934 г., когда прекратился ввоз импортного оборудования, специалисты выбирали источники нагрева, исходя из оптимальных условий пайки. Наряду с ацетилено-кислородной пайкой в целях экономии средств применяли пары жидких горючих [21].

При выборе горючих газов учитывалась их теплотворная способность и температура пламени (см. таблицу) [12]. В соответствии с этими характеристиками пайку легкоплавкими (мягкими) припоями рекомендовали выполнять с применением природного газа, паров бензина и керосина [21]. Объем использования автогенной обработки к концу 1930-х годов составил 53 % общего объема сварочных работ.

Широкое применение пайка нашла в годы Великой Отечественной войны. В 1944 г. в СССР было создано специализированное исследовательское учреждение по развитию технологий, основанных на применении газового пламени — ВНИИАвтогенмаш, и уже в начале 1950-х годов газопламенная пайка цветных и черных металлов стала одним из направлений деятельности института. Одна из первых работ была посвящена изу-

чению причин пористости при капиллярной пайке латуней серебряными припоями, созданию научных основ для выбора флюса и припоя при газопламенной сварке (пайке) чугуна [22]. Длительное время исследованиями руководил директор института А. Н. Шашков, а затем Г. А. Асиновская, К. В. Васильев, И. И. Ильина, Н. И. Никифров [23]. В институте были разработаны технологии газопламенной пайки латуни, не требующие очистки соединений от остатков флюса и шлаков, выполнен ряд работ по технике пайки [24].

Однако одним из главных направлений в деятельности ВНИИАвтогенмаша стало создание нового оборудования, соответствующего прогрессивным газопламенным технологиям. Так, уже к концу 1940-х годов были разработаны конструкции многопламенных горелок, применяемых при пайке труб или цилиндрических деталей диаметром 30...170 мм при рабочем давлении ацетилена до 1,5 кгс/см² и кислорода — 6,0 кгс/см², с мак-

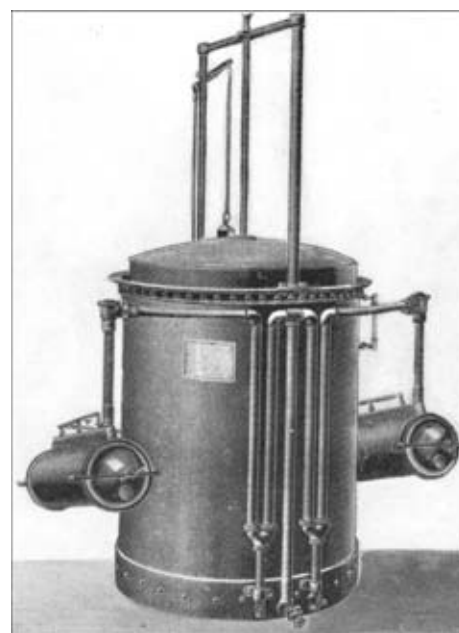


Рис. 6. Ацетиленовый генератор конструкции Кея (1897) — один из первых автоматических аппаратов смешанного типа

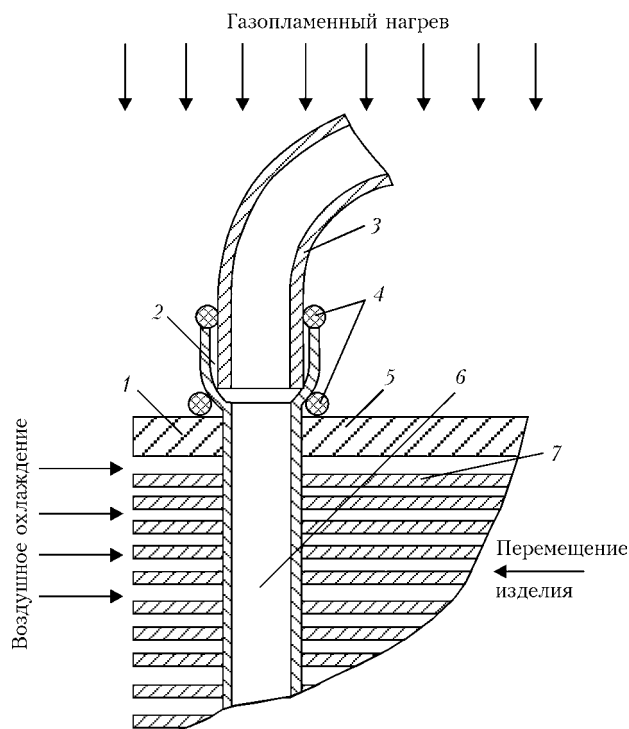


Рис. 7. Схема паяемого узла теплообменника: 1, 2 — точки расположения термпар; 3 — калач; 4 — припой; 5 — трубная доска; 6 — оребренная трубка; 7 — пластины оребрения

симальным количеством мундштуков — 44 [25]. Для пайки изделий прямоугольного сечения конструировали многопламенную горелку, верхний и нижний наконечники которой (с общим числом сопел до 74) были шарнирно связаны с распределительной камерой.

К своим перспективным разработкам ВНИИАвтогенмаш относит оборудование и технологию газопламенной пайки, при которой пары борсодержащей жидкости вводятся непосредственно в пламя. При этом высокая герметичность соединений ряда сплавов обеспечивается без очистки мест соединения [23].

Для расширения выпуска оборудования для газопламенной обработки были построены заводы автогенного машиностроения в 1952 г. в Одессе («Автогенмаш») и в 1958 г. в Кировограде («Кировоградавтогенмаш», ныне — «Ванадзоравтогенмаш»). В 1950–1970-х годах годовой прирост этого оборудования в СССР в среднем составил 13,1 % [19]. В эти и последующие годы, кроме ВНИИАвтогенмаша и МВТУ им. Н. Э. Баумана, заметный вклад в совершенствование газопламенной техники внесли коллективы филиала ВНИИАвтогенмаша в Воронеже, Гипрокислорода, завода «Красный автоген» № 1 (Москва), Воронежского экспериментального завода и др.

В последний четверти XX в. усилия специалистов в области газопламенной пайки были направлены на механизацию процесса пайки особо сложных по конструкции серийно выпускаемых изделий. Так, например, в Институте газа АН УССР была разработана оригинальная схема подачи пламени с одновременным воздушным охлаждением [26] (рис. 7). Трубы и калачи теплообменников изготавливали из меди или мельхиора,

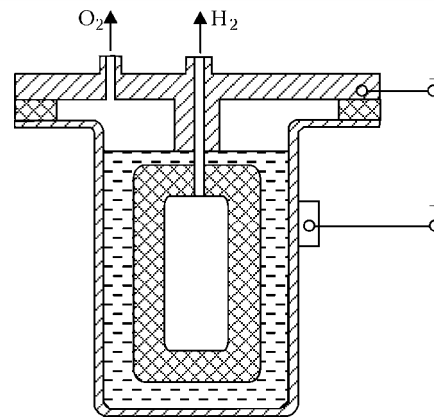


Рис. 8. Схема раздельного получения водорода и кислорода в электролизере

а трубные доски — из коррозионностойкой стали или латуни, припой при сборке укладывали в виде колец. Применение печной пайки исключалось из-за наличия на пластинах покрытия (лужения) из легкоплавкого сплава. Поэтому осуществляли одновременный нагрев всей поверхности трубной доски группой факелов, причем установка обеспечивала встречное движение теплообменника и продуктов сгорания, а луженые пластины дополнительно охлаждали воздухом.

Рассматривая способы применения для паяния углеводородного топлива, следует сказать об одном из самых древних простейших паяльников — медном заостренном бруске, закрепленном на держателе. Таким инструментом, разогретым теплом открытого пламени, паяли (сваривали) свинцовые трубы знаменитого римского трубопровода, свинцовые пластины крыш дворцов и обшивки кораблей. Медный паяльник в виде бруска или стержня до сих пор широко применяется лудильщиками в мастерских, где паяют легкоплавкими припоями. Такой способ пайки можно отнести к пайке нагретыми блоками, поскольку «нагрев паяемых материалов и припоя осуществляется контактирующими с ними нагретыми телами» [1].

В XX в. техника применения водорода для пайки (как и для сварки) развивалась по двум направлениям: первое основывалось на электролизе воды, второе — на диссоциации атомарного водорода.

К предложению известного российского физика Д. А. Лачинова использовать тепло реакции между двумя газами — водородом и кислородом, полученными в электролизерах [27], возвращались несколько раз (рис. 8). Так, в 1930-х годах в разных странах предпринимались попытки, наряду с газовой и атомно-водородной сваркой, использовать и электролизную сварку [28]. В СССР был налажен выпуск монополярных генераторов производительностью 1,3 м³/ч гремучего газа при оптимальном токе 200 А. Генераторы как приставки к электросварочному оборудованию применяли на машинно-тракторных станциях [29].

К совершенствованию электролизно-водных генераторов и техники сварки и пайки водородно-кислородным пламенем вернулись в конце 1960-х годов. Внимание привлекло то, что объем газовой



Рис. 9. Электролизно-водный генератор фирмы «Kager» (Water-Welder)

смеси, образующейся при электролизе воды, в 1868 раз превышал объем исходной воды; отпадала необходимость в хранении и транспортировке взрывоопасных газов, поскольку расход газовой смеси при непосредственном ее использовании мог соответствовать производимому объему. Зарубежный опыт показал, что генераторы могут вырабатывать в час несколько сотен литров газовой смеси; можно осуществлять сварку, пайку и резку проводов, фольги, керамики, стекла... Высокотемпературное экологически чистое пламя пригодно для высоко- и низкотемпературной пайки [30].

В ФРГ в конце 1960-х г. был разработан водородно-кислородный генератор производительностью до 170 л/ч [29–31] (модель Water-Welder, рис. 9), который нашел применение для процессов пайки и микросварки изделий электротехнической и электронной промышленности. В 1971 г. специалисты ВНИИТЭМ (Москва) создали упрощенный аппарат (СМО-3275), который нашел применение в ювелирной и электронной промышленности.

Существующие в СССР промышленные электролизеры для отдельного получения из воды водорода и кислорода не могли быть использованы для проведения технологических работ в связи с рядом проблем технического и организационного характера. К основным из них относились: стационарность исполнения электролизеров, необходимость отдельного особо оборудованного помещения для их монтажа, громоздкость (масса электролизеров более 1 т), слишком высокая производительность для питания одного сварочного поста (10 м³/ч и более), высокие требования к обеспечению взрывобезопасности. Вместе с тем, для газопламенных методов обработки материалов исключалось и использование баллонов с водородом в связи с высокой степенью взрывоопасности его смесей с кислородом.

В ИЭС им. Е. О. Патона в 1973 г. по предложению академика В. К. Лебедева были начаты работы по созданию отечественных малогабаритных газогенераторов горючей смеси для процессов пайки и сварки микроизделий, для получения водородно-кислородной смеси путем электролиза воды [32]. Разрабатывалось два варианта — фильтпрессовый электролизер с отдельным полу-

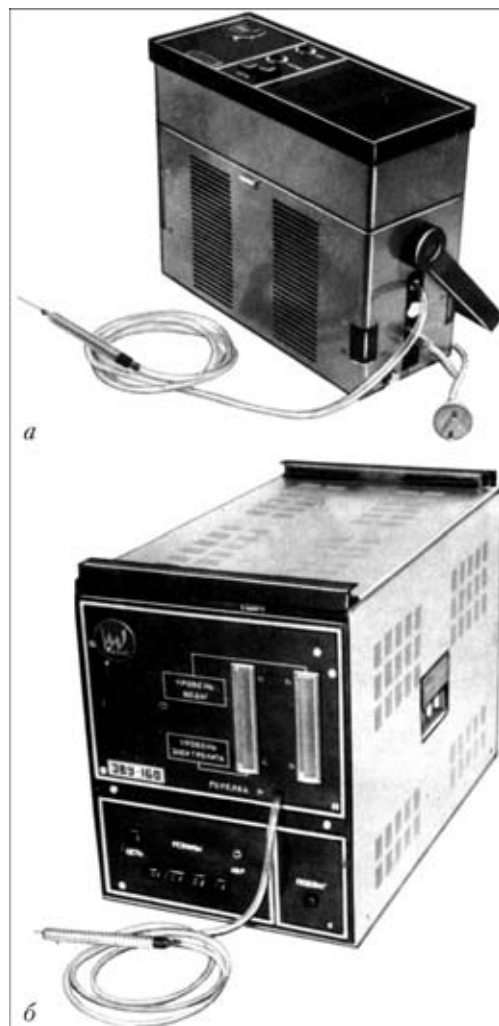


Рис. 10. Газогенераторы водородно-кислородной смеси с электролизером биполярного типа: а — ЭВУ-40; б — ЭВУ-160

чением водорода и кислорода и электролизер монополярного типа для получения смеси водорода с кислородом (гремучего газа).

При разработке В. И. Балакиным электролизеров биполярного типа обнаружилась невозможность копирования в электролизере производительностью до 0,1 м³/ч технических решений, использованных в конструкциях электролизеров производительностью 10 м³/ч и более. Таким образом, «модернизация» известных конструкций электролизеров заключалась в поисках оптимальной формы электродов, обеспечивающей достаточную степень герметизации электролитических ячеек, а также варианта равномерного распределения электролита между ячейками и в решении других менее важных проблем.

В результате работ, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона В. М. Кислицыным, А. Г. Мусиным, И. М. Мельниченко, В. П. Шевченко и другими, были созданы и выпущены несколько моделей газогенераторов биполярного типа [32] (рис. 10).

В настоящее время разработки в этом направлении проводятся на предприятиях Москвы, выпускающих газогенераторы марок «Москва» (ОАО НПП «Газосварочные аппараты-XXI век»), «ЛИГА» (г. Санкт-Петербург) и др.



Рис. 11. Газогенераторы водородно-кислородной смеси с монополярным электролизером: а — фирмы «Hydrox», производительностью $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; б — ИЭС им. Е. О. Патона (А-1803), производительностью $1,6 \text{ м}^3/\text{ч}$

В то же время в ИЭС им. Е. О. Патона было разработано несколько моделей газогенераторов водородно-кислородной смеси с монополярным электролизером, а также технологии сварки и пайки изделий из различных металлов и сплавов [33–37]. Отличительной особенностью предложенной конструкции электролизера является использование электродов в виде двух лент, свернутых по спирали вокруг центрального токоподвода, причем на одну из лент навивали с шагом $5 \dots 10 \text{ мм}$ изоляционную нить диаметром около 1 мм , обеспечивающую требуемый зазор между электродами [38].

На базе газогенератора ГВК-1,5 был разработан газогенератор водородно-кислородной смеси производительностью до $1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, который затем серийно изготавливали на Броварском опытном заводе оборудования «Факел» с 1980 по 1990 гг.

Газогенераторы различных серий были внедрены на ПО им. Артема (г. Киев) в технологической линии по изготовлению изделий радиотехнического профиля, на нескольких предприятиях фармацевтической промышленности в линиях по герметизации стеклянных ампул с медпрепаратами, а также на других предприятиях во многих научно-исследовательских институтах на операции пайки микроизделий.

За рубежом в 1990-е годы также уделялось внимание разработкам этого направления. Например, лидировавшая в те годы фирма «Hydrox» (США), освоила выпуск нескольких моделей газогенераторов водородно-кислородной смеси производительностью от $0,3$ до $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ с электролизером монополярного типа. Разработки ИЭС им. Е. О. Патона не уступали по массогабаритным характеристикам разработкам фирмы «Hydrox» (рис. 11), но превосходили по технологическим характеристикам и надежности. Следует отметить, что ни в Европе, ни в Америке ни одна из фирм не занималась разработкой газогенераторов водородно-кислородной смеси с электролизером биполярного типа.

Технологические процессы пайки с нагревом водородно-кислородной смесью разрабатывали на нескольких московских предприятиях [39, 40], причем были получены обнадеживающие результаты по газопламенной пайке водородно-кислородным пламенем алюминиевых сплавов с использованием припоев системы Al–Zn без флюсов.

Следует отметить, что экспериментальными исследованиями особенностей работы газогенераторов, теоретическими обоснованиями и рекомендациями по выбору оптимальных вариантов источников для газотермической обработки металлов, в том числе и пайкой, занимались В. Н. Корж и др. (КПИ), В. М. Неровный и др. (МГТУ им. Н. Э. Баумана), В. И. Столбов и др. (Тольяттинский политехнический институт) [42], В. Ф. Квасницкий и др. (Украинский государственный морской технический университет им. С. О. Макарова) [43].

В связи с тем, что для увеличения размеров восстановительной зоны пламени к водородно-кислородной смеси необходимо примешивать углеродные добавки (пары спирта, ацетона, бензина), которые снижают температуру пламени (см. таблицу).

Что касается горелок, то в принципе они представляют собой обыкновенную трубку, в которую подается уже готовая смесь. Диаметр трубки выбирается в зависимости от мощности пламени (для сварки и резки используются также ацетилено-кислородные горелки). Применение газов, получаемых в электролизно-водных генераторах с целью пайки, не представляет особых проблем, а техника пайки не отличается от техники пайки другим газовым пламенем [35]. Интересным технологическим решением является предложение проводить нагрев двумя коаксиальными газовыми потоками. В соответствии с этим техническим предложением через центральное сопло подают водородно-кислородную смесь стехиометрического состава (обеспечивающую температуру пламени порядка 3400°C), а через канал, охватывающий цен-

тральное сопло, — защитный газ, например, ту же водородно-кислородную смесь, но обогащенную парами углеводородной жидкости, обеспечивающую восстановительную атмосферу вокруг центральной зоны нагрева. Известны устройства [42], позволяющие дозировать вводимую в зону пайки (сварки) тепловую энергию, что обеспечивает высокую воспроизводимость качества паяных или сварных соединений [45].

Весьма перспективна разработка аппаратуры для раздельного получения из воды водорода и кислорода для технологического использования в процессах сварки и пайки.

Другое направление применения водорода в качестве энергоносителя к виду газопламенной пайки можно отнести только условно. Способ атомно-водородной сварки (и пайки) основан на явлении диссоциации водорода в электрической дуге, открытым в 1911 г. выдающимся американским ученым И. Ленгмюром. Сварка и пайка производится горелкой с двумя неплавящимися электродами (вольфрамовыми), между которыми горит дуга. В зону дуги подается водород, где двухатомные молекулы этого газа диссоциируют [46]. Атомы (ионы) водорода, попадая на сравнительно холодный металл, рекомбинируют с выделением энергии $H + H = H_2 + 436$ кДж/моль. Изделие и присадка (припой) нагреваются как теплом дуги (конвекцией и излучением), так и экзотермическим теплом.

В 1930-х годах атомно-водородная сварка и пайка широко применялись в авиационной, электротехнической и других отраслях промышленности, обеспечивая наиболее качественные соединения (по сравнению с известными тогда способами) алюминия, меди, бронзы. Развитием этих технологий занимались в Московском машиностроительном институте (ныне — МГТУ им. Н. Э. Баумана), в Ленинградском промышленном институте, в лабораториях системы Авиапрома и др. Наибольшее распространение технология получила в США (более 3 тыс. постов). В 1940-х годах технологии, основанные на «водородной дуге», были вытеснены другими, более эффективными технологиями, и в настоящее время применяется в исключительных случаях, например, при сварке тройников из толстостенных трубок диаметром до 20 мм в авиастроении, обеспечивая «кинжальный» прогрев на всю толщину трубки, что недостижимо при реализации дуговых способов сварки в очень узкую разделку шва.

Выводы

1. Газовоздушная и газокислородная пайка возникли в период средневековья. Высокопроизводительные способы получения карбида кальция, первые промышленные конструкции ацетиленовых генераторов и газовых горелок были разработаны и усовершенствованы изобретателями и учеными многих стран Европы и США во второй половине XIX — начале XX вв.

2. В 1920–1930-х годах для пайки изделий авиационной и электротехнической промышленности

применяли установки, выпускавшиеся для атомно-водородной сварки.

3. В первой половине XX в. были проведены исследования газового пламени; в СССР организовано производство оборудования и материалов для газовой пайки, созданы специализированный институт (ВНИИАвтогенмаш) и ряд лабораторий. Во второй половине XX в. основной задачей являлось совершенствование оборудования, автоматизация процессов пайки.

4. В XX в. получила развитие техника пайки водородно-кислородным пламенем. Разработаны конструкции электролизно-водных генераторов, надежных и эффективных в промышленном применении.

- ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. — М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1979. — 19 с.
- Ререн Т. Роль углерода в древней металлургии // Черн. металлы. — 1998. — № 2. — С. 68–71.
- Фигуровский Н. А. Очерки общей истории химии. От древнейших времен до начала XIX в. — М.: Наука, 1969. — 455 с.
- Джуа М. История химии / Пер. с итал. — М.: Мир, 1975. — 560 с.
- Stillman J. M. The study of alchemy and early chemistry. — New York, 1960. — 575 p.
- Agricola G. Zwölf Buecher vom Berg- und Huettenwesen // VDI-Verlag Duesseldorf, 1978. — 385 S.
- Fletcher T. A. New commercial application of oxygen // J. Soc. Chem. Ind. — 1888. — № 3. — P. 182–185.
- Мусабеков Ю. С., Черняк А. Я. Выдающиеся химики мира: Библиограф. указатель. — М.: Знание, 1971. — 270 с.
- Smith K. S. A history of the oxyfuel and electric arc welding processes // Practical Welding Today. — 1998. — March-April. — P. 19–22.
- Lebrun M. Fifty years of welding in France // British Welding J. — 1954. — № 7. — P. 25–28.
- Chatelier H. Sur la combustion de l'acetylene // Comptes rendus de l'Academie des sciences. — 1895. — № 27. — S. 1144–1147.
- Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. — Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1968. — 503 с.
- Хренов К. К. Сварка, резка и пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1970. — 408 с.
- Клебанов Н. Н. Газовая сварка и резка металлов. — М.: Машгиз, 1947. — 328 с.
- Корниенко А. Н. Термохимические процессы на службе сварки // Автомат. сварка. — 1996. — № 7. — С. 42–50.
- Lebrun M. La soudure, le brasage et l'oxycoupage des metaux. 3500 ans d'histoire. — Paris: Academie de Marine, 1961. — 27 S.
- Weirs S. A., Orn T. An early history of oxyacetylene welding and cutting in the United States // Welding Eng. — 1935. — № 6. — P. 22–24.
- Грандон, Дегранж, Роземберг. Выбор и оборудование кислородно-ацетиленовой установки. — Л.: Наука и школа, 1927. — 95 с.
- Антонов И. А. Газопламенная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1976. — 264 с.
- Курбатов В. Я. Самосварка и различные способы спаивания металлов. — Пг.: Науч.-техн. отдел ВСНХ, 1918. — 204 с.
- Милославский С., Глизменко Д. Горючие газы для автогенной обработки металлов // Автоген. дело. — 1933. — № 7. — С. 18–24.
- Шашков А. Н., Асиновская Г. А., Ильина И. И. Низкотемпературная пайко-сварка чугуна белым припоем // Тр. ВНИИАвтогенмаш. — 1970. — Вып. 16. — С. 153–167.
- Никифоров Н. И., Васильев К. В., Смирнов А. Х. Работы ФГУП «ВНИИАвтогенмаш» в области аппаратуры и технологии газопламенной пайки // Сб. 1. «Пайка, современные технологии, материалы, конструкции». — М.: Центральный Российский Дом знаний. — 2001. — С. 67–69.
- Асиновская Г. А. Газопламенная пайка металлов. — М.: Машгиз, 1963. — 83 с.



25. *Кольцевые* многопламенные горелки КГ для газопрессовой сварки поперечных стыков труб и круглой стали // Информ. листок ВНИИАВТОГЕНМАШа. — 1953. — Октябрь. — № 41. — 5 с.
26. *Механизированная* пайка теплообменников твердыми припоями с использованием природного газа, сжигаемого в смеси с воздухом / А. Е. Еринов, В. А. Сорока, С. А. Петинкин и др. // Автомат. сварка. — 1982. — № 12. — С. 49–51.
27. *Якименко Л. М., Модылевская И. Д., Ткачек З. А.* Электролиз воды. — М.: Химия, 1970. — 264 с.
28. *Попов С. М.* Применение электролизной сварки в условиях ремонта самолетов // Авиапром-сть. — 1938. — № 4. — С. 18–24.
29. *Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В.* Пайка металлов. — М.: Машгиз, 1959. — 442 с.
30. *Wasser-Schweisser* // Produktion. — 1972. — № 8. — S. 104.
31. *Mikroschweisgeraet* «Water-Welder» // Technische Rund. — 1968. — № 7. — S. 49.
32. *Протоколы* технических совещаний. — Архив ИЭС им. Е. О. Патона, оп. 1, д. 2440, л. 21.
33. *Балакин В. И.* Применение электролизно-водных генераторов при пайке, резке и сварке // Автомат. сварка. — 1986. — № 8. — С. 57–61.
34. *Кислицын В. М., Мусин А. Г.* Малогабаритные переносные установки для пайки и сварки кислородно-водородным пламенем // Сварка и пайка элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — Киев: Знание, 1974. — С. 10–11.
35. *Установка* для импульсной газопламенной пайки микроизделий / А. А. Россошинский, В. М. Кислицын, А. Г. Мусин и др. — Киев, 1976. — [4] с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 295).
36. *Установка У-853* для микропламенной пайки / А. А. Россошинский, В. М. Кислицын, А. Г. Мусин и др. — Киев, 1975. — [4] с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 15).
37. *Генераторы* водородно-кислородной смеси ГВК-1,5 и ГВК-0,2 / В. М. Кислицын, А. Г. Мусин, В. П. Шевченко. — Киев, 1981. — [4] с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 2).
38. *А. с. СССР 507668.* Электролизер для получения гремучего газа из воды и водных растворов / В. К. Лебедев, А. А. Россошинский, В. М. Кислицын и др. — Оpubл. Б. И. — 1976. — № 11.
39. *Латыпов Р. А., Хромов В. Н., Семешин А. Л.* Восстановление систем охлаждения двигателей автотракторной техники газопламенной пайкой // Сб. 2. «Пайка, современные технологии, материалы, конструкции». — М.: Центральный Российский Дом знаний. — 2001. — С. 25–29.
40. *Хромов В. Н., Семешин А. Л., Латыпов Р. А.* Восстановление радиаторов систем охлаждения газопламенной пайкой // Свароч. пр-во. — 2000. — № 9. — С. 44–49.
41. *Корж В. Н., Дыхно С. Л.* Обработка металлов водородно-кислородным пламенем. — Киев: Техніка, 1984. — 64 с.
42. *Фролов В. П., Маркова И. Ю., Певзнер Н. Б.* Пайка и паяльщики за последние 30 лет / Материалы научн.-техн. конф. «Пайка-2000», Тольятти, Тольяттинский политех. ин-т, 2000. — С. 3–7.
43. *Кафедра* сварочного производства УГМТУ — 40 лет / Г. Ф. Романовский, В. Ф. Квасницкий, А. И. Сафонов, Е. А. Корщенко // 36. наук. праць УДМТУ. — Миколаїв, УДМТУ. — 1999. — № 6. — 151 с.
44. *А. с. СССР 1449268 МКИ В 23 к 7/08.* Способ газопламенной обработки / В. Т. Жоголь, В. Ф. Резниченко, В. П. Мельников и др. — Оpubл. Б. И. — 1986. — № 12.
45. *А. с. СССР 721289 МКИ В 23 к.* Устройство для газопламенной микросварки и пайки / С. Л. Дыхно, В. М. Кислицын, А. Г. Мусин и др. — Оpubл. Б. И. — 1980. — № 10.
46. *Weinman A., Langmuir J.* Atomic hydrogen welding // General Electric Rev. — 1926. — № 29. — P. 160–163.

Retrospective description of development of the equipment and technique of heating during brazing with application of hydrocarbon and hydrogen fuel is given. Analyzed are the technological features and capabilities of flame of different composition in acetylene-oxygen, hydrogen-oxygen and atomic-hydrogen brazing. The role of several specialists and organizations in the history of gas and gas-electric welding is demonstrated.

Поступила в редакцию 07.09.2004

Научно-производственный центр «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Сплавы на основе титана благодаря высокой удельной прочности и другим уникальным свойствам нашли широкое применение в аэрокосмической технике, самолетостроении, судостроении, химическом машиностроении, энергетике и других областях промышленности. Основным сырьем для изготовления титановых сплавов является губчатый титан, который производится на Запорожском титано-магниевом комбинате из ильменитовых руд. Украина занимает третье место в мире по запасам этих руд, причем самого высокого качества.

Для разработок сплавов на основе титана, оборудования и технологий их получения из губчатого титана в 1996 г. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины был создан Научно-производственный центр «Титан». Производство слитков осуществляется методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) на отечественном оборудовании производительностью 3000 т в год. При этом впервые в мире:

- ✓ способ ЭЛПЕ использован для получения высоколегированных сплавов титана;
- ✓ создана и внедрена в производство технология выплавки слитков из недробленных блоков губчатого титана;
- ✓ освоена выплавка полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб;
- ✓ созданы оборудование и технология оплавления боковой поверхности слитков, успешно применяемые вместо их механической обработки.

В настоящее время Научно-производственным центром «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона установлены кооперационные связи со специализированными предприятиями Украины, что позволяет производить разный сортимент полуфабрикатов из титана (поковки, прутки, трубы) как для нужд промышленности Украины, так и на экспорт.

НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины
03028, ул. Ракетная, 26, Киев, Украина
Тел.: (38044) 264-9543; факс: 264-1096; e-mail: info@titan-patona.kiev.ua

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс CMT, предложенный фирмой «Фрониус»

Применение процесса CMT (Cold Metal Transfer — перенос холодного металла):

- сварка тонких листов, например, из алюминия и алюминиевых сплавов толщиной до 3 мм, конструкционных сталей, в том числе нержавеющей, толщиной до 2 мм;
- пайка CMT.

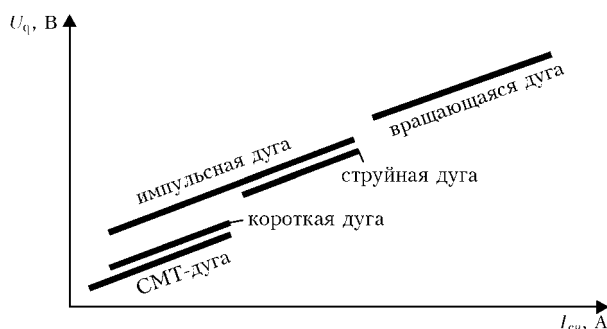


Рис. 1. Эффективная область применения процесса CMT по сравнению с другими

Преимущества по сравнению с традиционными технологиями (рис. 1):

снижение тепловложения одновременно с увеличением усиления шва;

высокая стабильность сварочной дуги, в том числе при резком изменении направления сварки (переориентации робота);

высокие скорости сварки (Al+Al, стыковой шов толщиной 1 мм, $v_{св}$ до 250 см/мин), а также пайки CMT (соединение внахлест для листов, оцинкованных электролитическим способом, $v_{пайки}$ = 150 см/мин). Заметим, что скорость сварки, а также склонность к возможному образованию брызг зависит от метода цинкования и толщины покрытия. Например, листы, оцинкованные горячим способом, могут свариваться почти без брызг и с небольшой скоростью пайки;

улучшенное перекрытие зазора (при толщине листа 1 мм возможно перекрытие зазора до 1,5 мм для нахлесточных соединений);

практически отсутствие брызг (почти не требует дополнительной обработки);

предотвращение прилипания электрода (функция Stickout) может обеспечиваться в широком диапазоне режимов без существенного изменения тока, при этом регулируется, главным образом, скорость подачи проволоки, что обеспечивает равномерный провар (CrNi/Fe).

Изменения в стандартном оборудовании и необходимое оснащение для процесса CMT:

Источник питания: специальный источник питания (TPS 3200/4000/5000/MV) Remote — исполнение с RCU 5000 i;

возможно управление всеми функциями стандартного источника питания TPS (импульсный режим, стандартный режим, сварка WIG); при использовании процесса CMT установлен поджиг SFI (поджиг без брызг);

в отличие от стандартного источника питания TPS установлен LHSB; новая плата; на фронтальной панели Remote USB есть разъем для обновления данных; изменения программного обеспечения; со второго квартала 2005 г. можно будет включить эти функции в стандартный источник питания (код свободного включения).

Механизм подачи проволоки: VR 7000 CMT: новая плата; установлено соединение с LHSB; в стандартном исполнении — с подающими роликами 1,2 мм HR.

Шланговый пакет горелки с амортизатором проволоки: длина 4,25 или 6,25 м;

амортизатор проволоки должен быть подвешен на манипуляторе; длина амортизатора проволоки на узле привода 1,2 м (длина постоянная, для того чтобы гарантировать точный режим работы); шланг подачи проволоки;

кабель LHSB, вставленный в шланговый пакет.

Приводной механизм (рис. 2) масса 1,6 кг без корпуса горелки;

грузоподъемность робота 6 кг;

конструкцией предусмотрен поворот на 6 осей;

конструкция с бесприводным серводвигателем переменного тока (используется также в роботах);

использование стандартных корпусов горелок;

установка прижимного давления на роликах подачи проволоки при открытом прижимном рычаге.

Оборудование процесса CMT дает возможность включения в управление сварочным процессом скорости подачи проволоки (как динамического регулируемого параметра). Благодаря этому откры-



Рис. 2. Приводной механизм в процессе CMT



Рис. 3. История создания процесса СМТ

ваются абсолютно новые возможности регулирования и управления сварочным процессом.

При этом удается, с одной стороны, сделать сварочную дугу более стабильной и независимой от внешних влияний, как например, скорости подачи проволоки, изменений функции Stickout или от состояния поверхности свариваемых деталей, и с другой стороны, обеспечить в ней сварочный процесс без брызг.

Горяче-холодный процесс обеспечивает новые возможности

Некоторые материалы и примеры применения не согласуются с воздействием высоких температур, обусловленных сварочным процессом. Во избежание прожогов и образования брызг, а также в целях обеспечения качественных сварных соединений требуются более низкие температуры. Система СМТ дала это возможным. Конечно же, в области сварочных процессов «холодный» является понятием относительным, но по сравнению с традиционным процессом MIG/MAG СМТ обеспечивает меньшую температуру металла. Сварка в режиме горячей-холодный металл стала возможной благодаря технологической разработке фирмы «Фрониус», а именно: включению блоков подачи проволоки в систему регулировки процесса сварки. Результат: роботизированная сварка и пай-

ка MIG/MAG без образования брызг для сверхтонкого металла толщиной 0,3 мм и больше.

Новая технология отличается от традиционной

Сварочный процесс. Появление процесса СМТ является нововведением. Для предложения ее на рынок понадобилось пять лет исследовательской работы (рис. 3). В стадии разработки находятся и другие перспективные предложения в этом направлении.

Блоки подачи проволоки включены в систему регулировки процесса. Данная инновация влияет на весь сварочный процесс, так как впервые блоки подачи проволоки непосредственно включены в систему его регулировки. Цифровая система процесса фиксирует возникновение короткого замыкания и путем отвода проволоки помогает отделению капли (рис. 4). Все это происходит в режиме цифрового управления, в чем и заключается первое значительное различие от традиционной сварки короткой непрерывной дугой.

Уменьшение ввода тепла. Второе отличие процесса: перенос металла происходит под действием сил инерции. В условиях короткого замыкания она сразу же автоматически отводится. Таким образом, в течение фазы горения сама дуга вводит тепло только кратковременно, затем ввод тепла уменьшается.

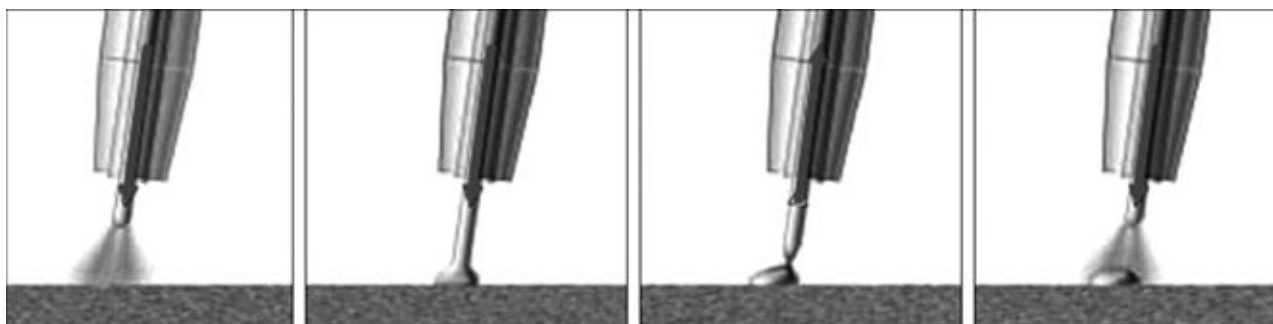


Рис. 4. Обратное движение проволоки, способствующее отрыву капли

Перенос материала без образования брызг. Результат достигается отводом проволоки в момент возникновения короткого замыкания, что помогает отделению капли. Короткое замыкание под контролем, ток короткого замыкания незначителен (рис. 5), что обеспечивает перенос материала без образования брызг.

Все эти различия позволяют осуществлять операции, связанные с большими трудностями: сварные и паяные швы без образования брызг; сварное соединение стали с алюминием; сварку сверхтонкого листа с толщиной 0,3 мм даже стыковым швом без технологической подкладки (рис. 6) для сварочной ванны и т. п.

Вся система приспособлена к оптимизации сварочного процесса. С целью внедрения этого процесса пришлось разработать новые компоненты системы. Новые решения найдены и для системы подачи проволоки. С одной стороны, работают два блока подачи проволоки: передний (Robacta Drive CMT) подает и отводит проволоку до 70 раз в секунду (SynchroPuls: только до 5 раз); задний блок (VR 7000 CMT) проталкивает проволоку. Оба блока регулируются в цифровом режиме. Передний блок (Robacta Drive CMT) оснащен безредукторным приводом высокودинамичным серводвигателем переменного тока, обеспечивающим точную подачу проволоки и постоянное давление прижима. В отличие от традиционных систем кабель-шланговый пакет горелки может быть отсоединен от блока привода, что позволяет осуществлять замену быстро и без необходимости в повторной настройке TCP (Tool Center Point).

С другой стороны, между двумя блоками привода устанавливается проволоочный буфер, обеспечивающий их независимость друг от друга и служащий в качестве дополнительного накопителя проволоки. Тем самым, подача проволоки происходит практически без усилий. Проволоочный буфер желательно установить на балансире, при невозможности, на третьей оси робота. Компактная и удобная в обращении система позволяет осуществлять и замену фитиля в проволоочном буфере без использования инструмента: открыл, снял фитиль, поставил новый, закрыл, и готово.

Составляющие системы СТМ (рис. 7)

1. Источник сварочного тока TPS 3200/4000/5000 CMT

Полностью цифровой, управляемый микропроцессором и регулируемый в цифровом режиме инверторный источник сварочного тока MSG

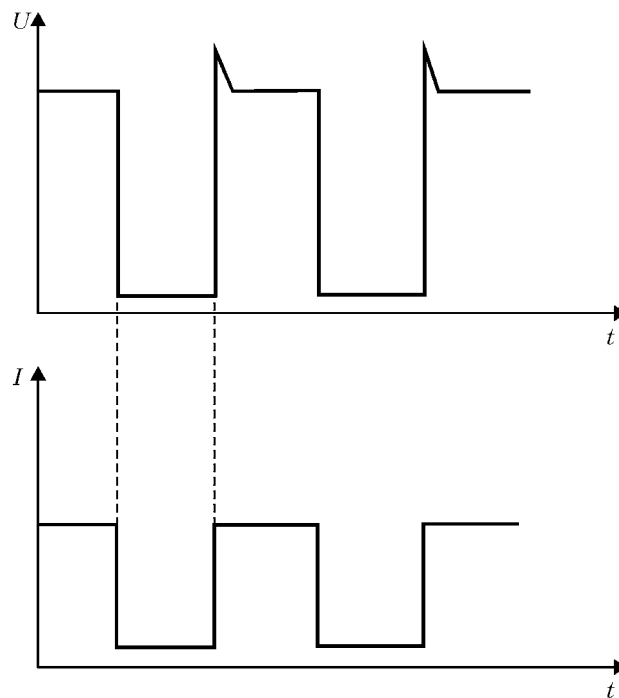


Рис. 5. Переход материала в шов, осуществляемый почти без тока

(320/400/500 А) с интегрированным функциональным пакетом для процесса CMT.

2. Дистанционное управление RCU 5000i

Блок дистанционного управления с дисплеем с полным набором текста; контроль данных сварки с помощью функции Q-Master; простота руководства пользователя.

3. Блок охлаждения FK 4000R

Простой и надежный прибор обеспечивает оптимальное водяное охлаждение сварочной горелки робота.

4. Интерфейс робота

Пригодный для работы со всеми предлагаемыми на рынке роботами, независимо от принципа управления: цифровой, аналоговый или через шину «field bus».

5. Блок подачи проволоки VR 7000 CMT

Регулируемый в цифровом режиме блок подачи для всех принятых видов упаковки проволоки.

6. Robacta Drive CMT

Компактная роботизированная сварочная горелка с безредукторным высокودинамичным серводвигателем переменного тока цифрового управления.

7. Проволоочный буфер

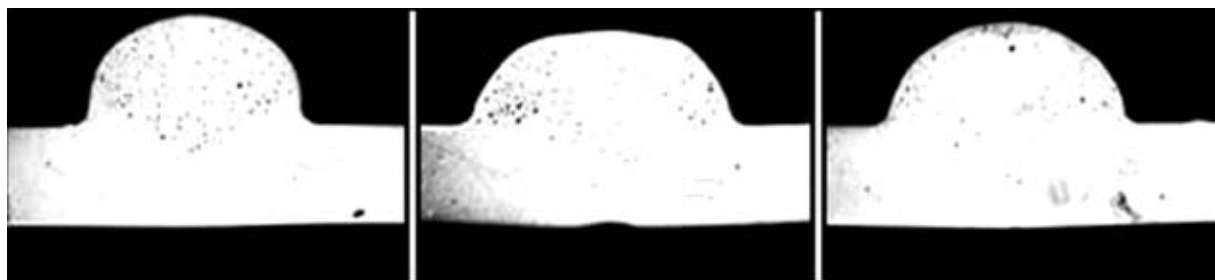


Рис. 6. Макроснимки сварного соединения, выполненного процессом CMT

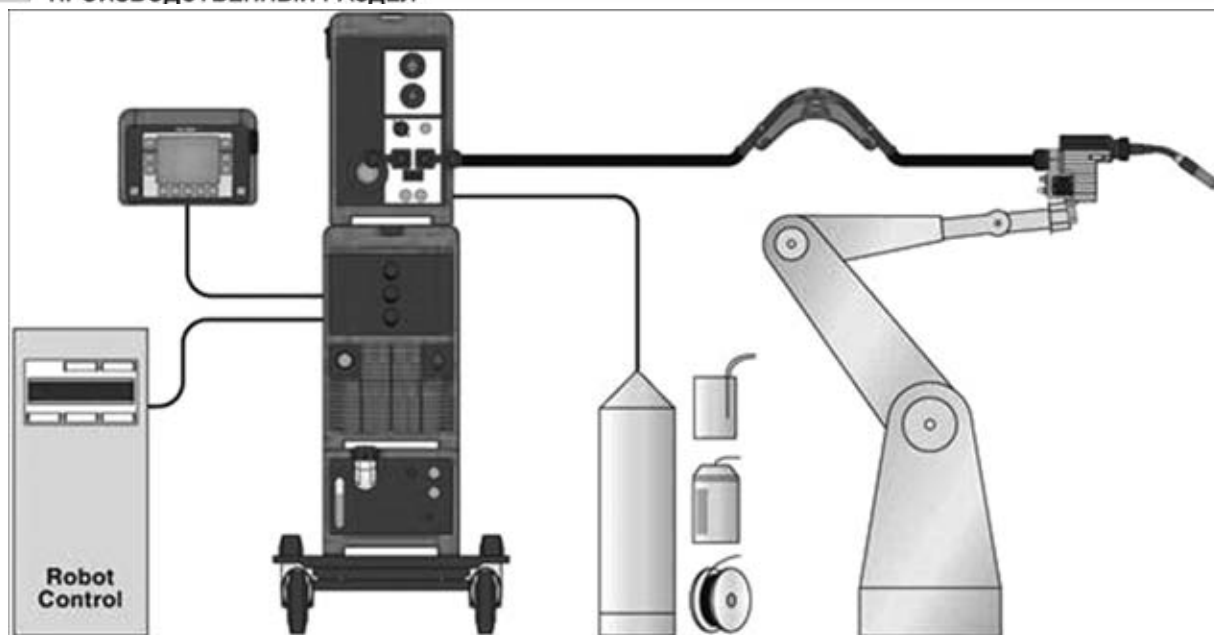


Рис. 7. Сварочная система СМТ

Обеспечивает независимость обоих блоков подачи проволоки друг от друга и служит дополнительным накопителем проволоки. Проволочный буфер желательно устанавливать на балансире, при невозможности — на третьей оси робота.

Применение. Сварка любого тонкого или сверхтонкого металла, начиная с толщины 0,3 мм; пайка оцинкованного листа по технологии MIG; соединение стали с алюминием. До сих пор такие операции можно было выполнять только при соблюдении самых сложных условий (например, подкладки для сварочной ванны), или они вообще заменялись другими технологиями соединения при отказе от преимуществ сварного соединения. Процесс СМТ устанавливает новые стандарты сварочной техники. Процесс идеально пригоден для автомобильной промышленности и производства комплектующих к ней, авиационной промышленности и аэрокосмической, изготовления металлических и порталных конструкций. С его помощью можно решать все задачи в автоматизированном режиме или с поддержкой робота; возможно применение всех основных и присадочных материалов.

Экономичность, сервис, безопасность

Отсутствие брызг освобождает от необходимости выполнения дополнительной обработки. Тонкий

металл соединяется стыковым швом, в связи с чем отпадает необходимость в использовании подкладки для сварочной ванны. Процесс стабильно осуществляется в автоматизированном режиме.

Благодаря возможности выполнения самых различных процессов данная разработка позволяет выполнять сварку не только по системе СМТ, но и по стандартной технологии MIG/MAG и технологии сварки импульсной непрерывной дугой. Факторами экономии являются: снижение потерь защитного газа к сварочной горелке, автоматическое отключение блока охлаждения, низкая мощность на холостом ходу, высокий коэффициент полезного действия, модульная и, таким образом, гибкая конфигурация системы и простота выполнения сервисных работ. Все преимущества, характерные для цифровых систем MIG/MAG, присутствуют и в данной системе.

Работа с системами фирмы «Фрониус» — дело безопасное. Система имеет знаки безопасности S и SE, категорию защиты IP23, контроль изоляции относительно земли, терморегулируемый вентилятор. Благодаря отсутствию образования брызг системы СМТ выделяют меньше сварочного дыма и, таким образом, не загрязняют рабочее место.

В. Л. Бондаренко,
европейский инженер-сварщик



ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛЕЙ КАРБИДОВ ТИТАНА

В. Н. КАЛЬЯНОВ, д-р техн. наук, А. Н. ПЕТРЕНКО, инж. (Укр. инж.-педагог. акад., г. Харьков)

Приведены результаты лабораторных испытаний на износостойкость и технологическую прочность трех типов наплавленного металла (боротитанового, аустенитно-мартенситного и мартенситно-аустенитного). Показано, что наилучший комплекс свойств имеют стали с высоким содержанием метастабильного аустенита, упрочненные дисперсными выделениями карбидов титана.

Ключевые слова: абразивная износостойкость, карбидная фаза, карбид титана, технологическая прочность, самозащитная порошковая проволока, боротитановый наплавленный металл, метастабильный аустенит

Стойкость наплавленного металла против абразивного изнашивания во многом определяется твердостью, структурным состоянием и степенью легирования основы, а также составом, количеством и твердостью упрочняющей карбидной (карбонитридной, карбоборидной, интерметаллидной) фазы. Увеличение доли карбидной фазы до некоторого предела повышает износостойкость. При этом изменение количества карбидной фазы оказывает более существенное влияние на износостойкость, чем агрегатная твердость, полученная только путем увеличения твердости матрицы. Износостойкость также возрастает с повышением твердости упрочняющей фазы [1–5]. Карбид титана TiC относится к термодинамически стойким карбидам, имеет высокую температуру плавления и твердость (около 32 ГПа). При этом стоимость ферротитана в сравнении с ферросплавами других сильных карбидообразующих элементов (ванадия, вольфрама и др.) ниже, к тому же он менее дефицитен.

Введение легирующих элементов в наплавленный металл для повышения износостойкости может привести к снижению технологической прочности и эксплуатационных показателей. Особенно сильно понижает указанные свойства углерод [6]. Целью работы является исследование износостойкости и технологической прочности наплавленного металла различных структурных классов, содержащего значительную долю термодинамически стойких карбидов.

Изученный в работе наплавленный металл можно разделить на три группы: боротитановый (180ТЗР, 250ХЗТЗНР и др.), аустенитно-мартенситный (100Х10Г10Т4С, 100Х10Г8Т4С, 75Х6Г9МЗТЗС), мартенситно-аустенитный (150Х6Т4М [1], 100Х3Г9Т4С). Для наплавки металла указанных составов изготовлены соответствующие самозащитные порошковые проволоки. Наплавку образцов проводили на пластины из сталей 20, 45, 5ХНМ без предварительного подогрева. Перед испытаниями рабочие поверхности образцов (диаметром 10 мм, длиной 35 мм) шлифовали и притирали. Испытания на износос-

тойкость проводили при возвратно-поступательном движении по карбундовой абразивной шкурке с размером зерна абразива 200...160 и 80...63 мкм, номинальное давление 1,37 МПа. Скорость движения образца по поверхности шкурки 0,086 м/с. Разогрев образцов при испытании незначителен. В качестве эталона для испытания принят образец из стали 45 с твердостью примерно HB 200. Износ определяли как отношение потери массы эталона к потере массы исследуемого материала. Дополнительно к этому исследовали микротвердость на поверхности после изнашивания ($P = 0,5$ и 1 Н) и вблизи поверхности трения на «косых» шлифах (таблица). Стойкость к образованию горящих трещин (с учетом содержания легирующих и примесных элементов, мас. %) определяли по значению критерия

$$H.C.S. = \frac{C(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}) 10^3}{3Mn + Cr + Mo + Ti}$$

и на машине ЛТП-6 [7], склонность к образованию холодных трещин — согласно ГОСТ 26388–84.

Для наплавленного металла первой группы с увеличением содержания бора доля борсодержащей эвтектики и ее микротвердость возрастают [5]. Ввиду возможного образования лег-

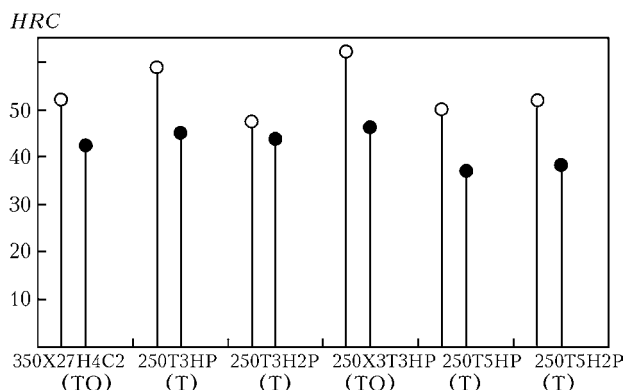


Рис. 1. Твердость наплавленного металла при 293 (○) и 873 К (●) (Т — трещины; ТО — трещины и отрывы в зоне сплавления)

© В. Н. Кальянов, А. Н. Петренко, 2004

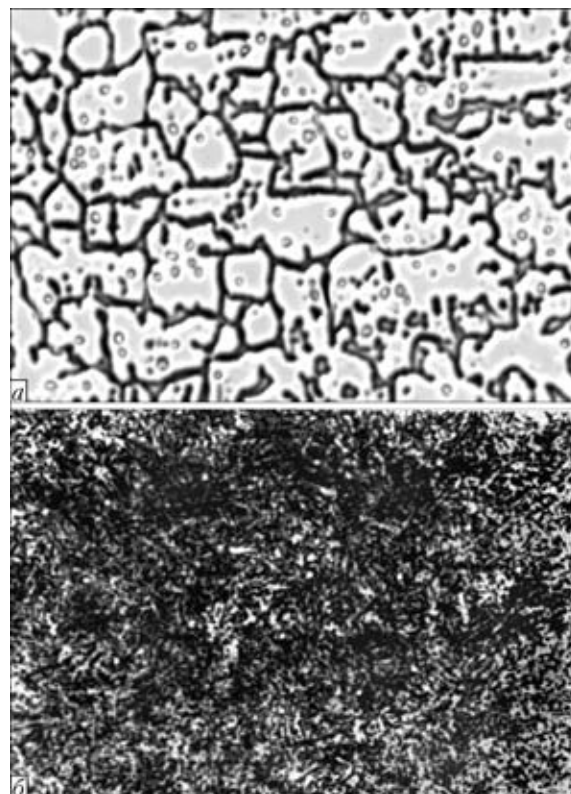


Рис. 2. Микроструктура наплавленного металла, $\times 600$: а — 100Х10Г10Т4С; б — 100Х3Г9Т4С



Свойства напавленного металла

Тип напавленного металла	Микротвердость вблизи поверхности изнашивания, МПа	Относительная износостойкость, ϵ	Твердость HRC	Фазовый состав	Критерий трещиностойкости Н.С.С.
30X10Г10	10200	2,51	29	A + M	0,68
100X3Г9Т4С	4300	2,05	35...40	M + A + K	2,70
150X6Т4М	10800	6,61	54...56	M + A + K	12,5
100X10Г10Т4С	11500	6,97	35...37	A + M + K	2,27
100X10Г8Т4С	8800	6,71	36...39	A + M + K	2,63
75X6Г9МЗТЗС	9300	5,98	—	A + M + K	2,03

коплавких эвтектик Fe–B и значительного содержания углерода в продуктах распада твердого раствора этот металл обладает значительной склонностью к образованию различного вида трещин и отрывов в зоне сплавления (рис. 1). Структура последней — «светлая полоса» с игольчатым строением. Согласно данным работы [5] металл типа 250X3ТЗНР, 250Т5Н2Р имеет более высокую износостойкость по сравнению с металлом 350X27Н4С2. Достоинством металлов данной группы является их низкая стоимость, недостатком — склонность к образованию трещин при наплавке.

Вторая группа представляет собой напавленный металл с высокой долей метастабильного аустенита (100X10Г8Т4С, 75X6Г9МЗТЗС). Особенностью этих материалов является то, что соотношение содержания титана к углероду не менее 4 (т. е. такое, при котором большая часть углерода связана в карбиды). Основная доля карбидов титана, вероятно, образуется еще в жидком металле [1]. При дальнейшем охлаждении кристаллизуется низкоуглеродистый металл, что при значениях критерия Н.С.С. равны 2,03...2,63 обеспечивает более высокие показатели технологической прочности по сравнению с материалами I и II групп [7]. Высокая износостойкость напавленного металла обеспечивается наличием твердой высокодисперсной карбидной фазы и высокой степенью упрочнения марганцевого метастабильного аустенита. Фазовый состав — аустенит, карбиды и, как правило, небольшая доля мартенсита (таблица, рис. 2, а).

С увеличением содержания хрома до 10 % (при 8...10 % Mn) значение показателя относительной износостойкости возрастает и для напавленного металла 100X10Г8Т4С, 75X6Г9МЗТЗС с аустенитно-мартенситной структурой соответственно составляет 6,71 и 5,98. При повышении содержания марганца с 8 до 10 % (100X10Г10Т4С) относительная износостойкость незначительно увеличивается.

Для металла типа 100X3Г9Т4С (третья группа) с фазовым составом мартенсит, остаточный аустенит, карбиды титана (рис. 2, б) характерны невысокая твердость, отсутствие трещин. Однако при этом напавленный металл имеет сравнительно низкую износостойкость ($\epsilon = 1,8...2,4$), что, видимо, связано с невысокой сопротивляемостью абразивному изнашиванию низкоуглеродистой мартенситной матрицы. Напавленный металл типа 150X6Т4М имеет приблизительно такое же количество карбидной фазы, но более твердую, упрочненную углеродом, матрицу. В результате металл имеет высокую твердость (HRC 54...56) и износостойкость ($\epsilon = 6,61$).

The paper gives the results of laboratory studies of wear resistance and technological strength of three types of deposited metal (boron-titanium austenite-martensite and martensite-austenite). It is shown that steels with a high content of metastable austenite strengthened by dispersed precipitations of titanium carbides have the best complex of properties.

Поступила в редакцию 25.05.2004

Производственные испытания ковшей роторной пескометной установки, напавленные сталью 100X10Г10Т4С, показали более высокую стойкость последних по сравнению с ковшами, напавленными сталью 10X13, 10X20Н10Б, 300X27Н4СЗ, 320X22ТР.

Выводы

1. Высокомарганцевый напавленный металл, упрочненный карбидами титана (при соотношении $Ti/C \geq 4$), обладает достаточно высокими показателями свариваемости, что позволяет проводить наплавку без подогрева.

2. Наиболее высокие показатели абразивной износостойкости (в данном диапазоне концентраций легирующих элементов) достигаются при получении в напавленном металле аустенитной либо аустенитно-мартенситной структуры.

3. Мартенситный (250X3ТЗНР) и мартенситно-аустенитный (150X6Т4М) напавленный металл характеризуется высокой износостойкостью и сравнительно низкой стоимостью, при этом технологическая прочность невысока.

1. Рязцев И. А., Кондратьев И. А., Васильев В. Г. Износостойкость напавленного металла системы легирования Fe–C–Cr–Ti–Mo // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 48–51.
2. Данильченко Б. В. Стойкость напавленного металла, предназначенного для работы в условиях абразивного изнашивания // Свароч. пр-во. — 1992. — № 4. — С. 31–33.
3. Кальянов В. Н., Муратов В. А., Почепцов А. В. Теплостойкость и износостойкость боротитанового напавленного металла // Там же. — 1970. — № 6. — С. 21–23.
4. Кальянов В. Н. Структура и характеристики износостойкого экономнолегированного напавленного металла // Там же. — 1997. — № 4. — С. 13–17.
5. Кальянов В. Н., Петренко А. Н. Износостойкий напавленный металл системы C–B–Ti–Ni // Висн. ХДТУСГ. — 2004. — Вип. 26. — С. 353–356.
6. Гук В. А. Материалы и технологии наплавки деталей машин, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания // Автомат. сварка. — 2000. — № 8. — С. 13–14.
7. Кальянов В. Н., Багров В. А. Свариваемость наплавляемых мартенситных сталей с инструментальными сталями // Свароч. пр-во. — 1998. — № 4. — С. 14–15.



ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*



*AUSTRALASIAN WELDING JOURNAL (Австралия),
2004. — Vol. 49, First Quarter (англ. яз.)*

Henderson I. Наплавленные покрытия для восстановления, нанесения дополнительных слоев и повышения износостойкости, с. 8–11.

Измерение твердости на стальных сварных соединениях, с. 14–15.

Pitrun M., Nolan D., Dunne D. Соотношение сварочных параметров и содержания растворимого водорода в швах, выполненных дуговой сваркой порошковой проволокой с рутиловым покрытием, с. 33–46.

*PRAKTIKER (Германия),
2004. — № 3 (нем. яз.)*

Надежные, удобные для пользователя баллоны с защитным газом, с. 67.

Otto F. Ответственность за безопасность производственных установок, с. 69, 94.

Wilhelm G. Успехи в области газотермического напыления пластмассовых изделий, с. 70.

Matthes K.-J. et al. Повышение стойкости соотродов лазерным диспергированием диборидами, с. 74–78.

Smulczynski U. Ремонт гибочного пресса, с. 79–80, 82.

Schuster J., Schulze E. Разумные выводы после аварии — результаты исследований, с. 83–96.

Дискуссия по вопросу предельно допустимых концентраций дыма, с. 88–89.

Lehe J., Senk B. Показатели качества электродной проволоки для высокопроизводительной сварки МАГ, с. 90–93.

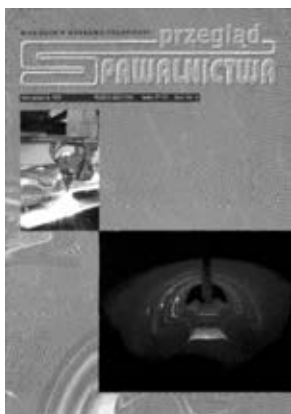


*PRZEGLAD SPAWALNICTWA
(Польша), 2004. — № 4 (пол. яз.)*

Lukoje A., Nowacki J. Изменения ЗТВ при сварке стали дуплекс, с. 3–7.

Szefner Z. Температура чувствительности основного материала — параметр технологии сварки, с. 9–10, 15–16.

Kurpsitz B. Подготовка сварщиков в Польше: вчера, сегодня, завтра, с. 17–23.



RIVISTA ITALIANA della SALDATURA (Италия), 2003. — Anno LV, № 6 (итал. яз.)

Adamowski J. et al. Свариваемость современных высокопрочных сталей, используемых в автомобильной промышленности, с. 731–735.

Bonalumi P. et al. Специальные присадочные металлы для сварки новых котельных сталей типа T23 и T24, с. 737–743.

Masetti F. Новая технология сварки подвесных мостов, с. 747–760.

Bresciani F. et al. Контроль качества сварки термопластических материалов, с. 765–771.

Valente T., Craboledda S. Проблемы, связанные со сваркой в судостроении, в частности, со сваркой нержавеющей и листовых сталей, с. 775–781.

Bach F. W. et al. Вневакуумная электронно-лучевая сварка тонколистовых материалов и стальных листов, с. 783–790.

SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN (Германия), 2004. — № 2 (нем. яз.)

Постепенное оживление рынка промышленных роботов, с. 50–51.

Otto F. Обязательства производителей перед пользователями, с. 52.

Высокий потенциал лазерной сварки пластмасс, с. 53–54.

Теплоотвод с помощью алюминиевых печатных плат при сварке, с. 54.

Ремонт кузовов автомобилей ручным лазером, с. 55.

Zenner H., Grzesiuk J. Влияние разделки кромок и выполнения шва на прочность сварки высококачественных алюминиевых конструкций, с. 58, 60–62.

Anagreh N., Dorn L. Подготовка поверхности склеиваемых изделий из алюминиевого деформируемого сплава EN AW-AlMg3, с. 64, 66–73.

Zah M.-F., Eireiner D. Сварка трением с перемешиванием на фрезерном станке с цифровым управлением, с. 74, 76–77, 79–80.

Beckert M. Из истории сварки: Е. О. Патон — жизнь и трудовая деятельность великого сварщика, с. 81–82.



* 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)



Работа комиссий МИС

- III — «Контактная сварка».
Xu P. IIW-Commission III «Resistance welding, solid state welding and allied joining processes». IIW-Sitzung im Juni 2003 in Bukarest, с. 83–84.
 IX — «Поведение металлов при сварке»
Herold H. IIW-Kommission IX «Verhalten der Metalle beim Schweißen», с. 84–85.
 XVI — «Соединение полимеров и технология склеивания».
Potente H. IIW-Kommission XVI «Fügen von Polymeren und Klebtechnologie», с. 85–86.
 XV — «Основы конструирования, расчета и производства сварных конструкций».
Hobbacher A. IIW — Kommission XV «Grundlagen der Konstruktion, Berechnung und Fertigung von Schweißkonstruktionen», с. 87.
 V — «Неразрушающий контроль и обеспечение качества».
Dobmann G. IIW — Kommission V «Zerstörungsfreie Prüfung und Qualitäts-sicherung», с. 88.
 VIII — «Техника безопасности».
Zschiesche W. IIW — Kommission VIII «Arbeits- und Gesundheitsschutz», с. 88–89.
 II — «Дуговая сварка и присадочные материалы».
Kannengisser T. IIW — Kommission II «Lichtbogenschweißen und Zusatzwerkstoffe», с. 89–90.
 X — «Поведение структуры сварного соединения».
Blauel J. G. IIW — Kommission X «Strukturverhalten von Schweißverbindungen — Versagens-vermeidung», с. 90–91.

*SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN (Германия),
 2004. — № 3 (нем. яз.)*

- Hartmann G. F.** Первые шаги средних предприятий за рубеж, с. 98.
Старт года техники в Берлине (2004 г. объявлен годом техники), с. 99–100.
Интервью с руководителем Института лазерной техники Фраунхофер, с. 101.
Hornig H. Дистанционная лазерная сварка выходит за рамки лабораторного статуса, с. 102.
Изготовление самоохлаждающихся бочек с помощью роботизированной сварки, с. 103–104.
Bach F.-W. et al. Дуговая приварка применяющихся под водой шпилек растягиваемой дугой, с. 106, 108–112.
Dilthey U., Brandenburg A., Schleser M. Применение и дозировка клея без наполнителя в области микроизделий, с. 113–117.
Zinke M., Schroder J. Влияние различных видов поверхности высоколегированной сплошной проволоки для сварки в защитных газах, с. 118, 120–123.
Beckert M. Из истории сварки: первая докторская работа в области сварочной техники (Август Гильперт), с. 125–127.
Работа службы информации: Обзор литературы по неразрушающему контролю, с. 128–130.
Nieselt-Achilles A. Миниатюрный трехмерный мир, с. 132–133.
Дискуссия по вопросу предельно допустимых концентраций дыма, с. 133–134.

*WELDING AND CUTTING (Германия),
 2004. — № 2 (англ. яз.)*

- Лазерная** резка — принцип и методы работы лазеров для резки, с. 80–83.
Matthes K.-J. et al. Лазерная дисперсия для изготовления упрочненных боридом износостойких поверхностей титановых сплавов, с. 86–90.
Nascimento R. M. do et al. Микроструктурное изменение и механическая прочность паяных соединений металлических сплавов с окисью алюминия, металлизированных титаном, с. 96–102.
Fussel U., Beetz R. Многофункциональность технологии соединения — паяные соединения позволяют также выполнять задачи, связанные с будущими функциональными элементами, с. 108–115.
Bach F.-W. et al. Подготовка подложки с помощью обработки сухим льдом и нанесение покрытия с помощью термического напыления за один рабочий цикл, с. 116–119.
Matthes K. J. et al. Коррозионное растрескивание под напряжением соединений, выполненных лучевыми способами сварки на малоуглеродистых и низколегированных сталях, с. 120–125.
Dilger K. et al. Разработка автоматически управляемого устройства для ручного нанесения клея, с. 126–131.

ИЗДАНИЯ РОССИИ

*СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО (Россия),
 2004. — № 4(833) (рус. яз.)*

- Норин П. А.** Возбуждение открытой сварочной дуги и переход к устойчивому режиму горения, с. 12–14.
Дюргов Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки, с. 14–18.
Черный О. М. Влияние сил поверхностного натяжения на струйный перенос металла при сварке током обратной полярности, с. 19–21.
Язовских В. М., Бельский В. Я., Кротов Л. Н. Механизм вторично-эмиссионных процессов при электронно-лучевой сварке с модуляцией электронного пучка, с. 21–27.
Маркашова Л. И., Арсенюк В. В., Григоренко Г. М., Бердникова Е. Н. Особенности процессов массопереноса при сварке давлением разнородных металлов, с. 28–35.
Шахматов М. В., Шахматов Д. М. Особенности контактной стыковой сварки чугуна, с. 36–41.



Штрикман М. М., Половцев В. А., Шилло Г. В. и др. Фрикционная сварка листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМг6, с. 41–47.

Гюсов С. Ф., Трущенко Е. А., Советченко Б. Ф. и др. Сварка трением стали Р6М5 в режиме сверхпластичности. Ч. II. Разработка алгоритма сварки и определение пределов изменения параметров режима, с. 48–52.

Гецкий О. Б., Кудров И. В., Яров В. М. Особенности работы сварочных инверторов от автономных источников питания, с. 53–55.

Бровман М. Я., Паученков К. Ф. Конструктивные особенности сварных металлических баллонов, с. 55–58.

СВАРКА В СИБИРИ

(Россия), 2004. — № 1 (11) (рус. яз.)

Метод сварки живых мягких тканей в медицине — ноу-хау Института электросварки им. Е. О. Патона, с. 11–12.

Степанов А. В., Рукавицын П. Н. Восстановление ограничительных поверхностей в стальном корпусе боксы грузового вагона, с. 19–20.

Бройдо В. Л. Технология изготовления крупногабаритных сварных конструкций драги 250 ДМ для добычи алмазов, с. 22–23.

Бабенко Э. Г., Кузьмичев Е. Н. Восстановление деталей подвижного состава с использованием керамических лигирующих флюсов на основе минеральных концентратов Дальневосточного региона, с. 25–26.

Квагинидзе В. С., Огородникова Н. Н. Выбор сварочных материалов для проведения ремонтной сварки металлоконструкций горно-транспортного оборудования, с. 29.

Астафьев А. Г., Карасев И. С. Нанесение упрочняющего износостойкого покрытия на стальные втулки, с. 30.

Демьяшев П. Г., Марьин С. Б. Экспресс — ФСА процесса сварки погруженным вольфрамовым электродом, с. 31–34.

Бронников А. А. Горячая клепка при ремонте грузовых железнодорожных вагонов, с. 35–36.

Макенко В. М., Баранов Е. М., Строителев Д. В. и др. Разработка состава шихты порошковой проволоки из минерального сырья Дальневосточного региона, с. 37–38.

Токарев С. И. Опыт внедрения установки для наплавки внутренних поверхностей деталей электропоездов в локомотивном депо ст. Вихоревка, с. 40–41.

Осипенко А. Н., Ерушин А. М. Машины для термической резки металлов «Енисей», с. 45–46.

Квагинидзе В. С., Огородникова Н. Н. Влияние дефектов на механические свойства и работоспособность сварных соединений металлоконструкций горно-транспортного оборудования, с. 47–48.

Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций, с. 49–53.

Карасев М. В., Работинский Д. Н., Павленко Г. В. Новые разработки НПО «Сэлма — ИТС» в области оборудования для дуговой сварки, с. 54–59.

СВАРЩИК-ПРОФЕССИОНАЛ (Россия)

2004. — № 3 (рус. яз.)

Чинахов Д. А., Федько В. Т., Сараев Ю. Н., Давыдов А. А. Влияние сварочного тока на распределение твердости в многослойных сварных соединениях стали 30ХГСА, с. 6–8.

Петров А. В. «Томскподводтрубопроводстрой» — российский лидер бестраншейной прокладки трубопроводов, с. 8–9.

Зяблицев М. П. Заварка «заплат» при проведении огневых работ на линейной части газопровода, с. 9–10.

Юшин Д. А. Сварочный выпрямитель ВДУ-516 с цифровой системой управления, с. 10–12.

Вилисов А. А. Опыт обучения сварщиков в НП «Центр повышения квалификации кадров Пермь-нефть», с. 20.

Зинченко А. В. Мастер-класс по механизированной сварке в защитных газах многослойных вертикальных швов, с. 22.

НА КАВКАЗЕ ПОЯВИЛСЯ ПИК ПАТОНА

В августе этого года научно-спортивная экспедиция Федерации альпинизма и скалолазания Украины и Национальной академии наук Украины обследовала горный район, который прилегает с востока к Эльбрусу.



Много скально-ледовых вершин окружают Эльбрус и составляют его корону. Безымянный пик высотой 3930 м является узловым в хребте, который разделяет ледники Чат и Ирик, которые стекают с восточного склона Эльбруса. Участники экспедиции проложили на этот пик три маршрута: по восточному и южному гребням, а также по северному ребру. Перовосхождения были сделаны 14–15 августа 2004 г.

Как сообщили в пресс-службе Федерации альпинизма и скалолазания Украины, по праву, которое имеют первопроходцы, безымянный пик 3930 назван «Пик Патона» в честь Бориса Патона, Президента Национальной академии наук Украины. На вершинных скалах установлен памятный знак.

В составе экспедиции, которая первой поднялась на пик, были Валентин Симоненко — президент Федерации альпинизма и скалолазания Украины, руководитель Счетной палаты Украины, Владимир Шумихин — заслуженный деятель науки и техники Украины, Мстислав Горбенко — заслуженный тренер Украины, заслуженный мастер спорта; Владимир Лебеденко — заслуженный врач Украины и др.

УДК 621.791.009(100)



WELDEX/РОССВАРКА — 2004

5–8 октября 2004 г. в Москве в ВЦ «Сокольники» прошла 4-я Международная специализированная выставка «Weldex/Россварка — 2004». Ее организовал Выставочный холдинг MVK при содействии компании «Элсвар», ВЦ «Сокольники» и Российское научно-техническое сварочное общество. Поддержку организаторам оказали Министерство промышленности и энергетики РФ, правительство Московской области, Московская межотраслевая ассоциация главных сварщиков.

Выставка проходила под девизом «Россия — родина электрической дуги и электродуговой сварки». В 2004 г. исполнилось 150 лет со дня рождения Н. Г. Славянова, создавшего в XIX в. аппарат для сварки металлическим электродом. Он же сконструировал первый в мире сварочный генератор, сделал и опробовал автоматическое приспособление для регулировки длины дуги.

Следует сразу отметить — выставка удалась. Это прежде всего связано с тем, что сварка и родственные ей процессы (резка, наплавка, пайка, нанесение защитных покрытий) являются на сегодня широко используемыми технологическими процессами во многих отраслях промышленности (машиностроении, энергетике, строительстве, авиа-, судо- и автомобилестроении в др.). Трансформировавшись из ранее проводимых выставок «Под-

московная сварка», выставка Weldex/Россварка с каждым годом расширяет выставочную экспозицию и привлекает более широкий круг участников. Так, к примеру, экспозиционные площади выставки в нынешнем году составили около 1700 м² (против 1000 м² в 2003 г.), а количество участников возросло со 100 до 161. Этому, вероятно, способствует наблюдающийся в России рост экономики, диктующей потребность в замене устаревшей сварочной





техники и необходимость применения современных технологий.

Традиционная тематика выставки охватывала весь спектр оборудования и технологии электродуговой, газоэлектрической, плазменной, лазерной, газопламенной сварки, резки и наплавки (ручной, механизированной и автоматизированной); оборудование и технологии контактной сварки и сварки пластмасс, пайки, термической обработки, производства сварочных материалов; широкую гамму материалов для сварки, резки, наплавки, напыления, пайки; средства и методы защиты от вредных производственных факторов; методы обучения и повышения квалификации сварочного персонала и др.

В выставке принял участие 161 экспонент, которые представляли предприятия, организации и фирмы России, Венгрии, Италии, Германии, Англии, Турции, Австрии, а также Украины и Беларуси. Среди них Weldotherm ГмбХ, ЗАО Аларм, Балтийский сталепрокатный завод Бёлер Велдинг, ГРПЗ, ОАО ЗОНТ, ЗАО НПФ «ИТС», ЗАО Искра, ООО компания «Корд», ООО Линкор, Лосиноостровский электродный завод, ООО Межгосметиз — Мценск, концерн Мессер Каттинг и Велдинг, ОАО «Стальная группа Мечел», ЗАО Мидасот-Т, НИТИ «Прогресс», ООО Плазма, ООО РоСлав, СЗСМ «Ротекс», ЗАО СовПлим, Спецэлектрод, Технологические системы защитных покрытий, ООО Технотрон, Фрониус/ТЦ Тена и др.

Ведущие российские, а также шведские, германские, французские и другие предприятия представили на WELDEX/РОССВАРКА новинки сварочных технологий, среди которых автоматизированные комплексы для плазменной резки с цифровым программным управлением. Широко было представлено современное сварочное оборудование для ручной аргонодуговой, полуавтоматической сварки с инверторными источниками питания, обладающими такими преимуществами перед традиционными источниками питания, как малая масса, широкий диапазон регулирования параметров сварки, чрезвычайно малое энергопотребление при резком улучшении качества сварки.

Были представлены электротехнические аппараты, установки для ручной плазменной сварки, с традиционными и инверторными источниками питания. Преимущество инверторных источников заключается в резком расширении возможностей сварки.

Ряд производителей представили на выставку высококачественные сварочные электроды, проволоки для сварки разнообразных металлов и сплавов. Был представлен инструмент для сварочных производств — держатели, сва-

рочные маски, электрические ручные машины для зачистки сварных швов, оборудование для термообработки сварных швов, а также печи для сушки и прокаливания сварочных материалов.

Предлагался большой выбор разнообразных устройств для защиты работников сварочных производств от сварочных дымов, образующихся при сварке и резке, удаления и очистки от них воздуха, а также вспомогательное сварочное оборудование, кантователи, столы сварщиков. Широко была представлена современная рабочая спецодежда для сварщиков, костюмы, маски, перчатки, рукавицы, обувь. По мнению посетителей, хорошим был выбор оборудования для контроля качества сварки ультразвуковым, рентгеновским и другими методами.

Результаты перспективных научных разработок представил ряд академических институтов и университетов — по результатам разработок своих сварочных кафедр. Востребованной была информация по подготовке сварочных кадров на сварочных кафедрах и специализированных центрах подготовки.

В рамках выставки ежедневно проводились дефиле-показы профессиональной одежды сварщиков, легкой сварочной техники, сварочных аксессуаров и материалов, что позволяло постоянно поддерживать атмосферу праздничности и зрелищности, знакомить посетителей с новинками, представленными на выставке.

В заключение немного статистики. По данным маркетинговой службы MVK, оборудованием и технологиями для электродуговой сварки металлов интересовалось 40,38 % посетителей. Востребованы на рынке оборудование и технологии плазменной, лазерной, газоплазменной сварки. Интерес к ним проявили 29,58 %





посетителей. Вызвали интерес и достижения в области орбитальной сварки. Как показали опросы, 51,75 % посетителей приходят для изучения новых разработок. Новинки технологий появляются на каждой сварочной выставке, проходящей в КВЦ «Сокольники». Их продвижению на рынке помогают не только сами выставки, но и проходящие в рамках деловой программы семинары и конференции, которым посетители придают большое значение. 44,67 % посетителей ищут на выставке деловые контакты. Общее количество посетителей составило 6141 чел.

«WELDEX/РОССВАРКА» способствует развитию сварочных технологий и их успешному продвижению на рынке. Но выставка содействовала также возникновению интереса к формированию модного стиля профессиональной одежды сварщиков и даже, как утверждают участники, сварочного оборудования. Сегодня уже все понимают, что красота и удобство сказываются на результатах труда. Качество сварки, в первую очередь, обусловлено качеством оборудования. Но без мастерства сварщика этого качества не оценить. Понимая это, организаторы выставки ставят перед собой цель — поднять престиж профессий, обслуживающих сварочное производство. Этому служат ставшие доброй традицией конкурсы «Лучший сварщик», «Лучший инженер-сварщик» и «Мисс Сварка России». Прошли они и в этом году.

Звание «Мисс Сварка России» присуждено Ольге Арнаутовой, менеджеру-консультанту по продаже сварочного оборудования фирмы «НГС-комплект», официального представительства датской компании «МЕГАТРОНИК», г. Королёв.

Конкурс «Лучший сварщик» проходил в трех номинациях. В номинации «Ручная дуговая сварка» первым стал Николай Муратов, сварщик ЗАО «МОСФЛОУ-ЛАЙН», г. Москва. В номинации «Полуавтоматическая сварка плавящейся проволокой в защитных газах» (МИГ/МАГ) победителем стал Дмитрий Филь, сварщик предприятия «СФТехнологии», г. Москва. В номинации

«Аргодуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов» (ТИГ) первое место у Сергея Фомина, сварщика ОКБ Сухого, г. Москва. Победителем конкурса «Лучший инженер-сварщик-2004» в номинации «Лучший инженер-технолог» стал А. Г. Астафьев, инженер Иркутского авиационного завода (филиала ОАО НПК «ИРКУТ», г. Иркутск) за работы и изобретения в области сварки погруженной дугой.

Уже традиционно многие известные зарубежные производители оборудования и материалов были представлены на выставке своими российскими дистрибьюторами ООО Бакоу-Даллоз (шлемы сварщиков торговой марки Optrel и Beauvrger), ООО Вебер комеханикс (оборудование компании Ideal-Werk, CEA, Vitari), ЗАО Вэлдинг Эллойс (автоматы, полуавтоматы и порошковые проволоки Welding Alloys), ООО Газстройсервис (продукция ESAB AB), Зодиак (оборудование компании Деса), НГС-Комплект (оборудование MEGATRONIC) и др.

Украина на выставке была представлена заводом автоматического оборудования Донмет — крупнейшим в Украине предприятием по проектированию и производству сертифицированного газокислородного оборудования для резки, сварки и пайки металлов, ОАО Зонт и Техмаш — производителями оборудования для газокислородной и плазменной резки, ООО Навко-Тех (установки и робототехнические комплексы для дуговой сварки), ОАО Симферопольский моторный завод (современные электросварочные, в том числе инверторные и чопперные источники на базе компонентов ведущих мировых производителей, программируемые универсальные полуавтоматы, преобразователи напряжения), а также профессиональными журналами «Автоматическая сварка» и «Сварщик».

В рамках выставки ее участники имели возможность сделать краткие сообщения о новых образцах техники и материалов, видах услуг, предлагаемых на рынке сварочного производства. Такие выступления прозвучали во время выездной сессии-симпозиума Московской межотраслевой ассоциации главных сварщиков (ММАГС) 6 октября.

Сессия была посвящена теме «Новые технологии, инструменты, материалы. Новые решения в технологическом оборудовании». На ней выступили директор ЗАО «Электрик-Микс, г. С.-Петербург (услуги по модернизации старого технологического оборудования с учетом возможности новой элементной базы), представитель ОАО Зонт, г. Одесса (особенности подводной плазменной резки), представитель ООО «Сварка», г. С.-Петербург (производство токоподводящих наконечников), представитель МИФИ, г. Москва (разработка аморфных лент-припоев), представитель Фрониус/ТЦ Тена, г. Москва (СМТ процесс для сварки тонколистовых соединений) и др.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук,
А. Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук



«ФРОНИУС-ФАКЕЛ» СЕГОДНЯ

Фирма «Фрониус-Факел» организована в августе 1990 г., когда пересеклись пути всемирно известной австрийской фирмы «Фрониус» и Броварского (Киевская обл.) завода «Факел».

В советское время завод «Факел» специализировался на выпуске оборудования по восстановлению изношенных деталей машин, нанесению защитных и антикоррозионностойких покрытий, а также в области сварки, резки и пайки.

Фирма «Фрониус» основана в 1945 г. Гюнтером Фрониусом. Первая продукция фирмы выпускалась в гараже. Головной офис фирмы с производственной базой расположен в г. Велс, Австрия. Кроме Украины, интегрированные предприятия фирмы расположены также в Бразилии, Франции, Германии, Норвегии, Швейцарии, Словакии, Чехии и США.

Сфера деятельности фирмы «Фрониус», кроме сварки, включают также производство зарядных систем и солнечной электроники.

По данным за 2003 г. общее число сотрудников 1354 чел., средний возраст 32 года, доходы компании более 132 млн евро, затраты на НИОКР 10 %, удельный вес экспорта 82,3 %, активных патентов 187.

В первые годы совместное предприятие выпускало сварочное оборудование в основном для австрийских заказчиков по давальческой схеме. В середине 1990-х гг. «Фрониус-Факел» половину всей продукции отправлял главному заказчику, 30 % продавал в республиках бывшего СССР, а 20 % реализовывал уже в Украине.

С 1999 г. объемы производства и реализации на предприятии ежегодно растут в среднем на 25...30 %. Изменилась и структура продажи произведенного: 25...30 % теперь экспортируется в Россию, Белоруссию и Казахстан, до 1 % реализуется в Австрии (в основном это запасные части). Больше всего товара продается на внутреннем рынке.

Украинским заказчикам «Фрониус-Факел» поставляет свыше 100 единиц сварочного оборудования ежемесячно. Среди его стратегических партнеров — «Днепрвагонмаш» (г. Днепродзержинск), Крюковский вагоностроительный завод, Харьковский завод им. Малышева, Сумское машиностроительное производственное объединение им. Фрунзе, «АНТК им. Антонова», Львовский автобусный завод, Мариупольский «Азовмаш», Дарницкий химзавод, пивоваренные и молочные предприятия Украины. В Институте электросварки им. Е. О. Патона оборудование фирмы используется для проведения научно-исследовательских работ (им оснащено три лаборатории).

В моделях, которые выпускает совместное предприятие, широко используются контролирующие и вычислительные электронные приборы. На «Фрониус-Факеле» налажена система



управления качеством продукции, гарантийный и послегарантийный сервис. Все это заблаговременно отрабатывалось и внедрялось специалистами австрийской фирмы «Фрониус».

«Фрониус-Факел» распространяет и помогает внедрять передовые производственные технологии «Фрониуса» на других предприятиях Украины.

«Фрониус-Факел» открыл свои представительства в Днепропетровске, Запорожье, Львове, Сумах, Одессе. Наблюдается дальнейший рост объемов производства и реализации продукции и соответственно прибыли на «Фрониус-Факеле». Вместе с тем, устаревшее производственное оборудование на предприятии, которому уже 15...20 лет, не может гарантировать сохранения стабильной себестоимости и рентабельности производства новых аппаратов, надлежащего уровня их качества. Поэтому и было решено совместно с фирмой «Фрониус» разработать проект коренной технической перестройки производства на броварском предприятии. Его исполнение с участием всех заинтересованных сторон начнется в 2005 г.

Следует полностью заменить оборудование на участке наведения трансформаторов, на участке изгиба металлического листа для трансформаторных корпусов следует установить машины с ЧПУ. В проекте учитываются перспективы развития машиностроения Украины, а именно растущий внутренний спрос на сварочное оборудование.

В этом году планируется завершить реконструкцию помещения под технический центр подготовки сварщиков из Украины, России и Белоруссии, которые будут работать на оборудовании «Фрониуса». Австрийская фирма готова инвестировать этот проект при условии приобретения «Фрониусом» земельного участка, на котором расположено предприятие, в собственность.

Оборудование, которое производит «Фрониус-Факел», действительно требует от тех, кто на нем будет работать, высокого уровня подготовки. В этом убеждаешься, когда видишь на демонстрационном стенде рабочие образцы инверторных полуавтоматов Транспульссинер-жик-4000 и 5000 и другую современную технику.

В прошлом году объем реализации продукции и выполнение заказов «Фрониус-Факел» достиг более 10 млн грн.

В настоящее время рассматривается и перспективный вопрос координации производственных усилий предприятий в составе «Фрониус» (трех заводов в Австрии, а также предприятий в Чехии и Украине). Программа предусматривает прежде всего недопущения дублирования выпуска одинаковой продукции.

Определенный опыт в этом смысле уже имеется. «Фрониус-Факел» покупает немало комплектующих на предприятиях Чехии, Италии, Германии, поэтому благодаря зарубежным поставкам имеет возможность хорошо ориентироваться в области ценообразования.

В последние десятилетия Украина уверенно демонстрирует успехи в области сварочного производства. И эту славу национального лидерства приумножает в красочном селе Княжичи под Броварами — фирма «Фрониус-Факел», производитель самого современного сварочного оборудования.



В. Л. Бондаренко,
европейский инженер-сварщик



Учебные программы на 2005 г.

Шифр курса	Наименование программы	Продолжительность	Сроки проведения
------------	------------------------	-------------------	------------------

1. Повышение квалификации инженерно-технических работников

(с аттестацией на право технического руководства работами при изготовлении ответственных сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)

101	Техническое руководство сварочными работами на объектах, за которыми осуществляется государственный надзор (руководители сварочных работ):	подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)	февраль, октябрь
102		переаттестация	24 ч	
103	Руководство сварочно-монтажными работами при строительстве и ремонте газопроводов из полимерных материалов:	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	март, май, июнь, октябрь
104		переаттестация	1 неделя (32 ч)	февраль, май
105	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)		3 недели (112 ч)	сентябрь
106	Подготовка членов комиссии по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	июнь, декабрь
107		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (70 ч)	февраль, апрель, июнь, июль, сентябрь, декабрь
108		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (72 ч)	июль
109	Подтверждение полномочий, расширение допусков председателей комиссий - экспертов УАКС со стажем:	3 года	16 ч	по согласованию с УАКС
110		6 лет	32 ч	
111		9 лет	16 ч	
114	Подтверждение полномочий, расширение допусков членов комиссии по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке со стажем:	3 года	май, октябрь
115		6 лет	32 ч	апрель, июнь, сентябрь
116		9 лет	24 ч	май, октябрь
117		специалистов по техническому контролю	24 ч	апрель, июнь, ноябрь
118		специалистов по охране труда	24 ч	январь, апрель, май, ноябрь
119	Технология и организация производства сварочных электродов		3 недели (112 ч)	июнь
120	Профессиональная подготовка и аттестация специалистов по металлографическим исследованиям (исследование макро- и микроструктур, измерение твердости, выявление межкристаллитной коррозии и определение ферритной фазы)		2 недели (72 ч)	февраль, октябрь
121	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки (с выдачей международного диплома):	Международный инженер по сварке	72 и 444 ч ¹	март, октябрь
123		Международный технолог по сварке	72 и 340 ч ¹	
125		Международный специалист по сварке	56 и 222 ч ¹	
127		Международный практик по сварке	32 и 146 ч ¹	март, декабрь
133		Международный инспектор по сварке	от 42 до 218 ч ¹	
136	Подготовка менеджеров по управлению качеством в сварочном производстве (с выдачей европейского сертификата)		2 недели (72 ч)	март, декабрь
137	Организация неразрушающего контроля на предприятиях железнодорожного транспорта		2 недели (72 ч)	январь, май, декабрь
138	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
139	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений:	повышение квалификации и аттестация	2 недели (72 ч)	март
140		переаттестация	24 ч	октябрь
141	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов:	аттестация	2 недели (76 ч)	по согласованию с заказчиком
142		переаттестация	14 ч	

Тематические семинары (возможно проведение у заказчика)

144	Международные и национальные стандарты в области сварочного производства и их отечественные аналоги	2 дня	в течение года
145	Современное сварочное оборудование на рынке Украины	2 дня	
146	Новые технологии профессиональной подготовки сварщиков и дефектоскопистов	1 день	

2. Подготовка и повышение квалификации инструкторов и преподавателей по сварке для системы профессионально-технического обучения

201	Подготовка, повышение квалификации инструкторов по сварке и родственным технологиям	5 недель (192 ч)	май, ноябрь
202	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин по сварке и родственным технологиям	3 недели (112 ч)	

3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации персонала в области сварки и родственных технологий

(с присвоением квалификации в соответствии с национальными и международными требованиями)

Подготовка сварщиков:

301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	9 недель (352 ч)	индивидуальное обучение по согласованию с заказчиком
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (ТИГ)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки	3 недели (112 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (МИГ/МАГ)	3 недели (112 ч)	
305	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	3 недели (112 ч)	март, сентябрь
306	автоматической дуговой сварки под флюсом	3 недели (112 ч)	апрель, октябрь
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	май, ноябрь
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	3 недели (112 ч)	июнь, декабрь
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полимерных материалов)	5 недель (192 ч)	январь, апрель, июнь, июль, сентябрь, ноябрь
310	по программам Международного института сварки с присвоением квалификации Международный сварщик	5 – 12 недель ¹	по согласованию с заказчиком
311	Специальная подготовка по технологии и оборудованию контактной сварки арматуры	2 недели (72 ч)	

Повышение квалификации сварщиков:

312	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	индивидуальное обучение по согласованию с заказчиком
313	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (ТИГ)	2 недели (72 ч)	
314	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
315	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (МИГ/МАГ)	2 недели (72 ч)	
316	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	
317	автоматической дуговой сварки под флюсом	2 недели (72 ч)	
318	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	
319	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	1 неделя (36 ч)	
320	пластмасс (сварка трубопроводов из полимерных материалов)	2 недели (72 ч)	
321	Повышение квалификации газосварщиков (газовая пайка цветных металлов)	32 ч	

Переподготовка сварщиков:

323	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 - 4 недели	индивидуальное обучение по согласованию с заказчиком
324	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (ТИГ)	2 - 3 недели	
325	газовой сварки	2 недели	
326	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (МИГ/МАГ)	1 - 2 недели	
327	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	1 - 2 недели	
328	автоматической дуговой сварки под флюсом	1 - 2 недели	
329	электрошлаковой сварки	1 - 2 недели	
330	по программам Международного института сварки с присвоением квалификации Международный сварщик	5 – 8 недель ¹	

Подготовка, переподготовка и повышение квалификации дефектоскопистов

334	Подготовка дефектоскопистов:	ультразвукового контроля	196 ч	февраль, октябрь
335		рентгеновского и гамма контроля	188 ч	
336		магнитного контроля	172 ч	апрель, ноябрь
337		газового и жидкостного контроля	172 ч	
338	Переподготовка дефектоскопистов:	ультразвукового контроля	184 ч	февраль, июнь, октябрь
339		рентгеновского и гамма контроля	156 ч	
340		магнитного контроля	152 ч	апрель, ноябрь
341		газового и жидкостного контроля	144 ч	

342	Повышение квалификации дефектоскопистов:	ультразвукового контроля	от 104 до 128 ч ⁴	февраль, июнь, октябрь
343		рентгеновского и гамма контроля	от 104 до 168 ч ⁴	
344		магнитного контроля	от 108 до 132 ч ⁴	апрель, ноябрь
345		газового и жидкостного контроля	от 76 до 132 ч ⁴	
347	Целевая подготовка дефектоскопистов ультразвукового контроля колесных пар вагонов		от 36 до 160 ч ⁴	по согласованию с заказчиком
346	Подготовка контролеров сварочных работ		от 76 до 116 ч ⁴	февраль, сентябрь
Другие профессии				
351	Подготовка газорезчиков:	газовой резки	3 недели (112 ч)	июль, ноябрь
352		ручной и механизированной воздушно-плазменной резки	3 недели (112 ч)	январь, июль
353	Подготовка металлизаторов по нанесению упрочняющих и защитных покрытий на металлы		5 недель (196 ч)	март
354	Специальная подготовка по поверхностной закалке колесных пар на установках высокотемпературной закалки (повышение квалификации термистов)		3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком

4. Аттестация персонала сварочного производства

(в соответствии с национальными и международными нормами и стандартами)

401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с ДСТУ 2944-94, ДСТУ 2945-94, правилами Госназдорхрантруда (ДНАОП 0.00-1.16-96), правилами Госатомнадзора (ПНАЭГ-7-003-87)		от 72 до 152 ч ²	1-2 неделя месяца 3-4 неделя месяца
403	Дополнительная аттестация сварщиков согласно ДНАОП 0.00-1.16-96		24 ч	по согласованию с заказчиком
405	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с правилами Госназдорхрантруда (ДНАОП 0.00-1.16-96), правилами Госатомнадзора (ПНАЭГ-7-003-87)		32 ч	еженедельно
406	Подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с международными стандартами ISO 9606 и EN 287		2 недели (72 ч)	1-2 неделя месяца 3-4 неделя месяца
407	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными и европейскими стандартами ISO 9606 и EN 287		32 ч	еженедельно
408	Подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с международным стандартом ISO 14732 (операторы автоматических установок дуговой сварки плавлением / операторы контактной точечной сварки)		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
409	Аттестация сварщиков на право выполнения работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)	
410	Периодическая аттестация сварщиков на право выполнения работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч	
411	Квалификационная аттестация сварщиков на машинах контактной (прессовой) сварки (рельсов, промисловых и магистральных нефте- и газопроводов)		24 ч	
412	Квалификационная аттестация газорезчиков ручной и механизированной воздушно-плазменной резки		24 ч	
413	Аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полимерных материалов)		проводится по окончании курса 309	
414	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полимерных материалов)		32 ч	в течение года
415	Специальная подготовка дефектоскопистов к аттестации в соответствии с ДНАОП 0.00-1.27-97:	ультразвуковой контроль	от 24 до 140 ч ³	по согласованию с заказчиком
420		радиационный контроль		
425		магнитный контроль	от 24 до 110 ч ³	
430		капиллярный контроль		
435		визуально-оптический контроль	от 24 до 70 ч ³	

¹ - Продолжительность обучения устанавливается Уполномоченным Национальным органом (УНО).

² - Продолжительность подготовки устанавливается аттестационной комиссией.

³ - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

⁴ - Продолжительность обучения зависит от квалификации слушателя.

По просьбе заказчиков возможно проведение обучения в другие сроки или по другим программам, не вошедшим в данный перечень, а также на территории заказчика.

На период обучения слушателям предоставляется общежитие с оплатой за наличный расчет.

Стоимость обучения определяется при заключении договора.

Для приема на обучение необходимо направить заявку в адрес Центра с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11

Тел. (+380 44) 456-63-30, 456-10-74, 261-54-62, 261-51-09, Факс (+380 44) 456-48-94

E-mail: paton-tc@paton.kiev.ua, http: www.paton-tc.kiev.ua

ВОЗДУХ РЕЖЕТ МЕТАЛЛ

Традиционный лидер в области воздушно-плазменной резки (ВПР) научно-производственное предприятие «Плазмотрон» НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» предлагает новое поколение своих установок «Киев-5» и «Киев-8У», специально предназначенных для экономичной и высокоскоростной резки металлопроката и разделки металлоизделий на металлолом

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВОК ВПР

Установка	Напряжение питающей сети, В	Потребляемая мощность, кВт	Максимальная толщина разрезаемой стали и алюминия, мм	Максимальный расход воздуха при давлении 0,4...0,6 МПа, л/мин	Масса, кг
«Киев-5»	3-х фазн. 380	20	50	200	200
«Киев-8У»	3-х фазн. 380	30	70	200	280

Технологические преимущества установок «Киев-5» и «Киев-8У» в сравнении с отечественными и зарубежными установками плазменной резки. Отличительная особенность установок — воздушное охлаждение ручных резаков, их малая масса и габариты, удобства выполнения работ. Резка производится с опиранием резака на изделие, чем обеспечивается стабильность процесса при максимальной толщине разрезаемого металла, а также минимальное воздействие на резчика излучения дуги и газопылевыведений.

Возможность выполнения работ на открытых площадках в любых климатических условиях, малая масса установок и низкое электропотребление открывают широкие перспективы их эффективного использования в первую очередь для разделки металлоизделий на металлолом.

Предшествующие им аналоги, ранее выпускаемые установки «Киев-4м», «АПР-404» и др., при практически той же прорезающей способности были в несколько раз тяжелее и выше по потребляемой мощности, оснащались громоздкими резаками с водяным охлаждением, поэтому не способны были конкурировать с газокислородной резкой (ГКР) при разделке металлоизделий на металлолом черных металлов.

Экономическая эффективность установок ВПР в сравнении с ГКР:

✓ для производства работ с установками ВПР необходима только электроэнергия, расходы на которую применительно к резке черных металлов более чем на порядок меньше в сравнении с затратами при ГКР на баллонные газы (кислород, пропан-бутан) и их транспортировку;

✓ применительно к резке нержавеющей стали, чугуна и цветных металлов (алюминий, медь и сплавы на их основе) ВПР является безальтернативным способом термической резки, так как эти виды металлов не поддаются ГКР;

✓ ВПР с применением установок «Киев-5» и «Киев-8У» в несколько раз производительнее за счет мгновенного старта (сквозного прорезания без подогрева) и больших скоростей резки на толщинах стали до 50 мм;

✓ при резке больших толщин (свыше 80 мм) целесообразно применять комбинацию способов ВПР с механической ломкой непрорезанных участков, а при разделке на металлолом разнотолщинных изделий из черных металлов — сочетать способы ВПР и ГКР. В последнем случае с учетом больших объемов резки малых и средних толщин экономический эффект достаточно высок.

Области применения установок «Киев-5» и «Киев-8У»:

✓ разделка на металлолом крупногабаритных сооружений (судов, самолетов, ж/д вагонов, рельсовых путей, бронетехники);

✓ резка профильного проката и оборотного лома на металлургических заводах;

✓ резка крупногабаритного лома на мерный лом (на базах металлолома);

✓ резка в полевых условиях сооружений и техники с применением дизель-генераторных станций и контейнерных установок ВПР;

✓ подводная ВПР мелкозатопленных сооружений;

✓ качественная резка листового и профильного проката с применением копирных устройств.

Цены и окупаемость. Установки «Киев-5» и «Киев-8У» в комплекте с запчастями и обучением специалистов заказчика стоят соответственно 2700 и 3400 дол. США.

Для сравнения зарубежные установки ВПР с вдвое меньшей толщиной резки стоят от 4000 до 5000 дол. США. При больших объемах резки окупаемость установок «Киев-5» и «Киев-8У» составляет 3–4 месяца (за счет экономии затрат на горючие газы и их транспортировку и высокой производительности резки).

По всем вопросам просьба обращаться:
Украина, 03057 Киев-57, ул. Эжена Потье, 9а
E-mail: plasmtec@iptelecom.net.ua
Тел./факс: (38044) 456 23 36
Тел.: (38044) 456 40 50



УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ за 2004 г.

ПЕРЕДОВИЦА

Институту электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — 70, № 9

45 лет кафедре сварочного производства, № 8

Торжества, посвященные юбилею ИЭС им. Е. О. Патона, № 10

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

АНТОНЮК С. Л., КОРОЛЬ В. Н., МОЛЯР А. Г., ЗАМКОВ В. Н., ТОПОЛЬСКИЙ В. Ф. Сопротивление усталости сварных соединений опытного титанового сплава Т-110, № 2

АСТАХОВ Е. А. Антифрикционные свойства и коррозионная стойкость детонационного покрытия из Al_2O_3 , применяемого в судовом машиностроении № 11

БЕЛОУС В. Ю., ПРИЛУЦКИЙ В. П., ЗАМКОВ В. Н. Влияние управляющего магнитного поля на вольфрамовый электрод при сварке титана в узкий зазор, № 4

БОНДАРЕВ А. А., ТЕРНОВОЙ Е. Г., ШВЕЦ В. И., НАЗАРЕНКО С. В., РАССАМАХИН Б. М., ТАРАСОВ Г. В. Структура и свойства тонколистовых соединений железоникелевого сплава 32НКА, полученных электронно-лучевой сваркой, № 8

БОРИСОВ Ю. С., ЗАЦЕРКОВНЫЙ А. С., КРИВЦУН И. В. Математическое моделирование процесса плазменного напыления композиционных порошков с учетом экзотермической реакции синтеза материала покрытия, № 1

БУШМА А. И., ЗЕЛЬНИЧЕНКО А. Т., КРИВЦУН И. В. Сравнительный анализ лазерного, плазменного и комбинированного способов нагрева мелкодисперсных керамических частиц, № 5

ВОРОПАЙ Н. М., МАЖЕЙКА А. И., МАРКОВИЧ С. И. Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации, № 5

ГРАБИН В. Ф., ГОЛОВКО В. В., КОСТИН В. А., АЛЕКСЕЕНКО И. И. Морфологические особенности микроструктуры металла швов низколегированных сталей с ультранизким содержанием углерода, № 7

ГРЕЦКИЙ Ю. Я., МАКСИМОВ С. Ю. Повышение устойчивости дуги, горящей в воде, при сварке порошковой проволокой, № 2

ГРИГОРЕНКО Г. М., ГОЛОВКО В. В., ГРАБИН В. Ф., КОСТИН В. А. Влияние металлургических характеристик флюса на структуру и фазовый состав высокопрочного металла шва, № 3

ГРИГОРЕНКО Г. М., КОСТИН В. А., ГОЛОВКО В. В., ГРАБИН В. Ф. Влияние химической неоднородности на образование игольчатого феррита в высокопрочном металле шва, № 4

ДЕМЧЕНКО В. Ф., КОЗЛИТИНА С. С. Компьютерные системы информационной поддержки сварочного производства, № 10

ДЯДИН В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении, № 4

ЕРМОЛАЕВ Г. В., ЛАБАРТКАВА А. В., ХИЗНИЧЕНКО Ю. Н. Учет пластических деформаций при компьютерном моделировании полей напряжений в паяных узлах из разнородных материалов, № 8

ЕРШОВ А. В., БЫКОВСКИЙ О. Г. Оценка энергопереноса на анод дугового разряда в инертных газах, № 6

ЗАДЕРИЙ Б. А., КОТЕНКО С. С., МАРИНЧЕНКО А. Е., ПОЛИЩУК Е. П., ЮЩЕНКО К. А. Влияние температуры отжига на механические характеристики молибденового сплава и его сварных соединений, № 6

ЗАЙЦЕВА Н. В., ЗАХАРОВ С. М., МАКСИМОВ С. Ю., ЛЯХОВАЯ И. В. Свойства аустенитного металла шва, выполненного под водой, № 4

ЗАМКОВ В. Н., ПРИЛУЦКИЙ В. П. Теория и практика TIG-F сварки (A-TIG) (Обзор), № 9

ЗУБЧЕНКО А. С., ВАСИЛЬЧЕНКО Г. С., СТАРЧЕНКО Е. Г., НОСОВ С. И. Механические свойства и вязкость разрушения сварных соединений корпуса реактора ВВЭР-1000, № 6

ИЩЕНКО А. Я. Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций, № 9

КАБАЦКИЙ В. И., КАБАЦКИЙ А. В. Влияние модифицирования металла шва на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокопрочных сталей, № 3

КАЛЕКО Д. М. Локальная поверхностная термообработка дуговым разрядом кольцевой формы, № 4

КАРХИН В. А., ИЛЬИН А. С., ПЛОШИХИН В. В., ПРИХODOВСКИЙ А. А. Влияние теплоты плавления алюминиевого сплава на форму и размеры сварочной ванны, № 1

КВАСНИЦКИЙ В. Ф., МАРКАШОВА Л. И. Интенсификация процесса диффузионной сварки жаропрочных сплавов, № 8

КИРЕЕВ Л. С., ШУРУПОВ В. В., ПЕШКОВ В. В., БЕСПЛОХОТНЫЙ Г. П. Влияние материала технологической оснастки на прочностные характеристики титана и его соединений при диффузионной сварке, № 1

КОВАЛЬЧУК В. С. Учет влияния асимметрии цикла на трещиностойкость сталей и сварных соединений при двухчастотном нагружении, № 3

КОНДРАТЬЕВ И. А., РЯБЦЕВ И. А., ЧЕРНЯК Я. П. Исследование свойств наплавленного металла типа мартенситностареющих сталей, № 10

КОНОНЕНКО В. Я., КОРСУН А. О. Структура и механические свойства сварных соединений, выполненных под водой порошковыми проволоками, № 5

КОРОБОВ Ю. С. Оценка сил, действующих на расплавленный металл при электрометаллизации, № 7

КРИВЦУН И. В., ТАЛЕРКО А. Н. Влияние поляризации излучения на поглощение лазерного пучка при сварке с глубоким проплавлением, № 6

КУЗЬМЕНКО О. Г. Поведение частиц некомпактной присадки на границе воздух-шлак при электрошлаковой наплавке, № 10

КУЛИК В. М., САВИЦКИЙ М. М., НОВИКОВА Д. П., КРАСНОЩЕКОВА В. А. Особенности аргонодуговой обработки с подплавлением сварного соединения закаляющейся стали, № 3

КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., ШВЕЦ Ю. В., ДИДКОВСКИЙ А. В. Исследование остаточных напряжений в сварных соединениях рельсов, полученных при контактной стыковой сварке оплавлением, № 9

КУЧУК-ЯЦЕНКО С. И., ХАРЧЕНКО Г. К., ЗАГАДАРЧУК В. Ф., ФАЛЬЧЕНКО Ю. В., МАЗАНКО В. Ф. Формирование структуры соединений при контактной стыковой сварке сопротивлением и оплавлением, № 2

КУЧУК-ЯЦЕНКО В. С., ШВЕЦ В. И., ЧВЕРТКО П. Н., ГОРДАНЬ Г. Н., САХАЦКИЙ А. Г., РЕМЕНЯК И. П. Контактная стыковая сварка дисперсно-упрочненного медного сплава системы Cu- Al_2O_3 , № 11

ЛОБАНОВ Л. М., КОРОТЫНСКИЙ А. Е., ЮМАТОВА В. И., СКОПЮК М. И. Выбор методов комплексной оценки качества сварочного оборудования, № 9

ЛОБАНОВ Л. М., ПОЗНЯКОВ В. Д., МИХОДУЙ О. Л. Влияние остаточных напряжений на технологическую прочность сварных соединений высокопрочной стали 14ХГН2МДАФБ, № 8

МАКСИМОВ С. Ю., ГУРЖИЙ А. А. Моделирование условий зарождения пор в металле шва при мокрой подводной сварке, № 7

МАРКАШОВА Л. И., ЧВЕРТКО П. Н., РЕМЕНЯК И. П., ПОЛОВЕЦКИЙ Е. В., АЛЕКСЕЕНКО Т. А. Особенности формирования структуры соединений стали с алюминием при контактной сварке, № 11

МАХНЕНКО В. И., ГАЙВОРОНСКИЙ А. А., САРЖЕВСКИЙ В. А., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., ПИВТОРАК Н. И. Напряжения при наплавке изделий из высокоуглеродистых сталей типа 65Г и риск образования холодных трещин, № 7

МАХНЕНКО В. И., ЖУДРА А. П., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., ДЗЫКОВИЧ В. И., БЕЛЫЙ А. И. Математическое моделирование процесса получения сферических гранул плавящихся карбидов вольфрама, № 2

МАХНЕНКО В. И., МАКСИМОВ С. Ю., КОРОЛЕВА Т. В. Исследование особенностей переноса водорода при подводной сварке плавлением конструкционных сталей, № 1

МИХЕЕВ П. П., КНЫШ В. В., ВОЙТЕНКО О. В., БРОДОВЫЙ В. А. Определение расчетных кривых усталости сварных соединений эксплуатируемых металлоконструкций, № 6

Наплавка в ИЭС им. Е. О. Патона, № 10

ОСИН В. В., РЯБЦЕВ И. А. Влияние серы на свойства сплавов на основе железа и перспективы ее использования в наплавочных материалах, № 10

ПАТОН Б. Е. Электрическая сварка мягких тканей в хирургии, № 9

ПАТОН Б. Е., НАЗАРЕНКО О. К., НЕСТЕРЕНКОВ В. М., МОРОЗОВ А. А., ЛИТВИНОВ В. В., КАЗИМИР В. В. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия, № 5

ПЕЕВ А. П., КУЗЬМИН С. В., ЛЫСАК В. И. Распределение температуры в околошовной зоне при сварке разнородных металлов взрывом, № 4

ПИСЬМЕННЫЙ А. С., НОВИКОВА Д. П., ПРОКОФЬЕВ А. С., ПОЛУХИН В. В. Свойства металла при индукционной сваркопайке стали 20, № 12

ПИСЬМЕННЫЙ А. С., ПЕНТЕГОВ И. В., СТЕМКОВСКИЙ Е. П., ШЕЙКОВСКИЙ Д. А., КИСЛИЦЫН В. М. Особенности расчета режимов магнитно-импульсной сварки, № 11

ПИНЧУК Н. И., РЯЗАНЦЕВ Н. К. Влияние первичной структуры литых жаропрочных никелевых сплавов на образование горячих трещин при сварке, № 2

ПОДОЛА Н. В., РУДЕНКО П. М., ГАВРИШ В. С. Применение адаптивного алгоритма для контроля качества сварки в системах управления контактными точечными машинами, № 6

ПОПОВ В. С., БИЛОНИК И. М., БЕРЕЖНЫЙ С. П., СИДОРЕНКО М. В., СЕЛЕЗНЕВ А. А., ПОПОВ В. В. Повышение выносливости металла сварного шва при использовании рафинированного комплексного ферросплава в покрытии электродов УОНИ-13/55, № 5

ПОРИЦКИЙ П. В., ПРИЛУЦКИЙ В. П., ЗАМКОВ В. Н. Влияние защитного газа на контракцию сварочной дуги с вольфрамовым катодом, № 6

ПУЛЬКА Ч. В., ШАБЛИЙ О. Н., ПИСЬМЕННЫЙ А. С. Влияние режимов индукционной наплавки на структуру и свойства наплавленного металла, № 10

РЫЖОВ Р. Н., СЕМЕНЮК В. С., ТИТОВ А. А. Особенности формирования и кристаллизации швов при сварке ТИГ с отклонением дуги магнитным полем, № 4

РЯБЦЕВ И. А., КУСКОВ Ю. М., РЯБЦЕВ И. И., НОВИКОВА Д. П., ГРИГОРЕНКО С. Г., КОСТИН В. А. Вторичное твердение наплавленного металла типа дисперсионно-твердеющей стали системы легирования Fe-C-Ni-Cr-Si-Al-Cu, № 10

САВИЦКИЙ А. М., САВИЦКИЙ М. М., НОВИКОВА Д. П. Влияние скорости сварки и длительности периодического охлаждения

на формирование структуры сварных соединений закаляющихся сталей при дуговой сварке с термоциклированием, № 8

СЕРБИН С. И., КВАСНИЦКИЙ В. В., ГОЛОБОРОДЬКО Ж. Г., МАТВИЕНКО М. В., БУРЯКОВ А. В. Моделирование состава газовой фазы при плазменной резке судокорпусных сталей, № 8

СИДОРЦ В. Н., ЖЕРНОСЕКОВ А. М. Численное моделирование системы источник питания-дуги с плавящимся электродом, № 12

СКУЛЬСКИЙ В. Ю., ЦАРЮК А. К. Проблемы выбора свариваемой стали для высокотемпературных компонентов энергоблоков ТЭС (Обзор), № 3

СОКОЛОВ Г. Н., ЗОРИН И. В., ЦУРИХИН С. Н., ЛЫСАК В. И. Особенности процесса ЭШН композиционным стержнем в малогабаритном секционном кристаллизаторе, № 10

ХОРУНОВ В. Ф., МАКСИМОВА С. В., ИВАНЧЕНКО В. Г. Разработка припоев для пайки жаропрочных сплавов на основе никеля и титана, № 9

ХРОМЧЕНКО Ф. А., КАЛУГИН Р. Н. Расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса сварных соединений паропроводов, № 5

ЧИРИЧ Р., ЧАНТРАК С., РАИЧ К. Анализ механизма соединения и появления вязкого слоя в процессе ротационной сварки трением, № 12

ШЕЙКО П. П., ЖЕРНОСЕКОВ А. М., ШИМАНОВСКИЙ Ю. О. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с автоматической стабилизацией параметров режимов, № 1

ЮЩЕНКО К. А., САВЧЕНКО В. С., ЗВЯГИНЦЕВА А. В. Влияние термобработки и степени легирования на структурные изменения никелевых сплавов, № 7

ЮЩЕНКО К. А., САВЧЕНКО В. С., СТАРУЩЕНКО Т. М. Роль сегрегации кислорода при сварке сплавов типа инвар, № 12

ЮЩЕНКО К. А., САВЧЕНКО В. С., ЧЕРВЯКОВ Н. О., ЗВЯГИНЦЕВА А. В. Характер образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов, № 8

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

БАСОВ Г. Г., ТКАЧЕНКО А. Н., ТКАЧЕНКО С. А., КОРСУНОВ К. А. Воздушно-плазменная резка при изготовлении деталей локомотивов на ОАО «ХК «Лугансктепловоз», № 2

БЕРНАДСКИЙ В. Н., МАКОВЕЦКАЯ О. К. О вкладе сварки в экономику США, № 3

БЛАЩУК В. Е. Титан: сплавы, сварка, применение, № 3

ВАЛИЦ К. А., ПАСЕЧНИК С. Ю. Повышение склонности наплавленной стали 110Г13Л к деформационному упрочнению, № 11

ВЕРЕЩАГО Е. Н., КВАСНИЦКИЙ В. Ф., РОМАНОВСКИЙ Г. Ф., ПРОСЯНОВ О. Ф. Разработка новой высокодинамичной машины для термической резки, № 8

ВОРОПАЙ Н. М. Особенности процессов дуговой точечной сварки в защитных газах (Обзор), № 7

ВУ ДЖ. Б. С., ПАВЛЕНКО А. В. Износо- и коррозионностойкие сплавы на основе кобальта для наплавки, № 10

ГУЛАКОВ С. В., ЧИГАРЕВ В. В., ИВАНОВ В. П., ПСАРЕВА И. С., ЛАВРЕНТИК О. А. Совершенствование технологии наплавки деталей металлургического оборудования (Обзор), № 10

ДОБРУШИН Л. Д. Современное состояние и перспективы развития сварки взрывом и высокоскоростным ударом (Обзор), № 9

ДРАГАН С. В., КВАСНИЦКИЙ В. В., РОМАНЧУК Н. П., СОЛОНИЧЕНКО Ю. В., ГОЛОБОРОДЬКО Ж. Г. Технологи-

ческие процессы сварки и резки в судостроении Украины (Обзор), № 8

ДРЮС П., СТАРКЕ Г., ХАККЕЛЬ М., КРЕМЕР-ВАСМУХТ С. Автоматическая восстановительная наплавка штамповой оснастки, № 7

ЕМЕЛЬЯНОВ О. А., ШЕПОТЬКО В. П., ПИХОТА Ю. В., ЛУБЕНЕЦ С. В., БУРЕНКО А. Г. Усталостные повреждения сварных крановых мостов, № 5

ЖАДКЕВИЧ А. М. История возникновения, технологические особенности и технические возможности первых способов пайки, № 11

ЖАДКЕВИЧ А. М. Источники газопламенного нагрева для пайки, № 12

ЖАДКЕВИЧ М. Л., БОНДАРЕВ А. А., КОРСУН О. Н., НАЗАРЕНКО С. В., ПОЛИЩУК М. А., МИНЕЦ А. Ф., НОВИКОВ В. И., ДИДЕНКО С. И., ОЛЕКСЕЕНКО В. А., БЕСКОРСКИЙ М. В. Электронно-лучевая сварка пакетов турбинных лопаток из сталей 08X16H13M2B и 18X11MНФБШ, № 4

ЖУДРА А. П., ВОРОНЧУК А. П., ВЕЛИКИЙ С. И., ФОМАКИН А. А. Новое оборудование для наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей, № 10

ЗАМКОВ В. Н., ВРЖИЖЕВСКИЙ Э. Л., ТОПОЛЬСКИЙ В. Ф., ПЕТРИЧЕНКО И. К. Влияние галогенидных флюсов на пористость швов титанового сплава ВТ6, выполненных ЭЛС, № 11

Зарубежный опыт: Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус», № 12

Зарубежный опыт: Новые высокопроизводительные технологии сварки фирмы «Фрониус», № 7

КАРАСЕВ М. В., ВЫШЕМИРСКИЙ Е. М., БЕСПАЛОВ В. И., РАБОТИНСКИЙ Д. Н., ЗАХАРОВ И. М., БЕЛЯЕВ А. Е., ПАВЛЕНКО Г. В., СОЛЯНИК В. В. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах, № 12

КАРАСЕВ М. М., РАБОТИНСКИЙ Д. Н., ПАВЛЕНКО Г. В., СОРОКА В. Л., ШОЛОХОВ М. А. Новые разработки НПО «СЭЛМА-ИТС» для дуговой сварки в защитных газах, № 5

КИСИЛЕВСКИЙ Ф. Н., ШАПОВАЛОВ Е. В. Оптические генераторы световой плоскости для средств технического зрения систем автоматизации дуговой сварки, № 6

КОВАЛЕНКО В. С., КОЛПАКОВ В. В. Использование web-технологий для повышения конкурентной способности предприятий машиностроения Украины, № 7

КОНОНЕНКО В. Я. Разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области подводной сварки и резки, № 3

КОРЖ В. Н., ПОПИЛЬ Ю. С. Влияние углеводородных добавок на структуру водородно-кислородного пламени и распределение температуры по длине факела, № 11

КОРОТЫНСКИЙ А. Е. Улучшение энергетической эффективности резонансных сварочных источников, выполненных на основе модульных структур, № 2

КРАСИЛЬНИКОВ С. Г., ГУЛИДА В. П., ЮЩЕНКО К. А., ЛЫЧКО И. И. Сотрудничество НКМЗ и ИЭС им. Е. О. Патона в области электрошлаковой сварки в тяжелом машиностроении, № 9

КУЗЬМЕНКО В. Г., ГУЗЕЙ В. И. Гидратация флюсов с локально измененным химическим составом зерен, № 6

КУСКОВ Ю. М., КУЗЬМЕНКО О. Г., ЛЕНТЮГОВ И. П. Электрошлаковая переработка металлоотходов и использование полученных полуфабрикатов в наплавочном производстве, № 10

КУЧУК-ЯЦЕНКО В. С., САХАЦКИЙ А. Г., НАКОНЕЧНЫЙ А. А. Контактная сварка гибких серебряно-медных токоподводящих шин, № 1

ЛАНКИН Ю. Н., ТЮКАЛОВ В. Г., МОСКАЛЕНКО А. А., ГЕРАСИМЕНКО А. М., БОНДАРЕНКО О. П., КОВТУНЕН-

КО В. А., КУЗЬМЕНКО Д. Ю., МАРЫШЕВ П. В., ЧАБАН Г. Н. Применение электрошлаковой сварки при ремонте корпуса доменной печи на ОАО «КГМК «Криворожсталь», № 5

ЛЕБЕДЕВ В. А. Методики выбора параметров импульсной подачи электродной проволоки, № 6

ЛЕБЕДЕВ В. А., КУЗЬМИН И. С., НОВГОРОДСКИЙ В. Г., ТКАЧЕНКО В. А. Устройство для однокнопочного регулирования режимов работы сварочного полуавтомата, № 5

ЛЕБЕДЕВ В. К. Тенденции развития источников питания и систем управления (по материалам патентов США), № 1

ЛЕБЕДЕВ Ю. М., МАРТЫНЕНКО В. А. Применение дуги с неплавящимся угольным электродом при поверхностной обработке сталей с низкой прокаливаемостью, № 8

ЛЕСКОВ Г. И., ПУСТОВОЙТ С. В. Прибор для регистрации колебаний сварочной ванны, № 3

МИКИТИН Я. И., ОКУЛ В. И., ДУХ С. В., ИЛЮШЕНКО В. М. Оборудование ОАО «КЗЭСО» для дуговой и электрошлаковой сварки, № 9

НАЙДА В. Л., МОЗЖУХИН А. А., ЛОБАНОВ О. Ф. Новое поколение оборудования для автоматизированного ультразвукового контроля сварных труб, № 9

ПАТОН Б. Е., БОНДАРЕВ А. А. Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций, № 11

ПАТОН Б. Е., ЛЕБЕДЕВ В. А., ПИЧАК В. Г., УРУМБАЕВ Б. Я., ХУДОЙНАЗАРОВ А. А., САИДОВ А. Н. Применение полуавтоматов блочно-модульной конструкции типа ПШ107 для сварки, наплавки и резки сталей и алюминия, № 2

ПАТОН Б. Е., ЧЕПУРНОЙ А. Д., САЕНКО В. Я., МЕДОВАР Л. Б. Перспективы производства сварных толстостенных биметаллических корпусов сосудов высокого давления, № 1

ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ Е. Ф. Плазменно-порошковая наплавка износ- и коррозионностойких сплавов в арматуростроении, № 10

ПОЗНЯКОВ В. Д., КИРЯКОВ В. М., ДЕМЧЕНКО Ю. В., КЛАПАТЮК А. В. Восстановление подвижной щеки дробилки, № 6

ПОПОВ С. Н., АНТОНЮК Д. А. Перспективы использования новых методов дистанционного образования инженерных кадров в сварочном производстве, № 11

ПОСТОЛАТИЙ Н. И. Приближенный расчет индуктивности дросселя сварочной цепи постоянного тока, № 12

РЫЖОВ Р. Н., КУЗНЕЦОВ В. Д., МАЛЫШЕВ А. В. Применение шестиполусной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом, № 2

САМОХИН М. С., МЯЛЬНИЦА Г. Ф., КРЕЩЕНКО В. А., САМОХИН С. М., ДОБКИНА Ю. Г. Технологические особенности аргодуговой сварки и пайки при ремонте литых лопаток из сложнелегированных высокохромистых никелевых сплавов, № 4

САРАЕВ Ю. Н., БЕЗБОРОДОВ В. П., ПОЛЕТИКА И. М., ТЮТЕВ А. В., НИКОНОВА И. В., КИРИЛОВА Н. В., СЕВАСТЬЯНОВ С. П. Улучшение структуры и свойств сварных соединений нефте-, газопроводных труб большого диаметра, № 12

СКУЛЬСКИЙ В. Ю., ЦАРЮК А. К. Новые теплоустойчивые стали для изготовления сварных узлов тепловых энергоблоков (Обзор), № 4

СОКОЛОВ Г. Н. Свойства наплавленного металла, используемого для упрочнения металлургического инструмента, № 10

СОМ А. И. Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов на базе литых карбидов вольфрама, № 10

СПЫНУ Г. А., БЕРНАДСКИЙ В. Н. Промышленные роботы и их классификация, № 5

ХОРУНОВ В. Ф., МАКСИМОВА С. В., СТЕФАНОВ Б. В., КАРАЧЕНЦЕВ Г. Г., ЗАДИРАКА В. Ю. Применение газопламенной пайки при изготовлении узлов охладителей пива, № 1

ШАБЛИЙ О. Н., ПУЛЬКА Ч. В., ПИСЬМЕННЫЙ А. С., ШАРИК М. В. Усовершенствование конструкций индукторов для индукционной наплавки тонких элементов деталей машин, № 4

ЩЕТИНИН С. В., СТЕПАНОВ К. К., ЗАВАРИКА Н. Г. Наплавка погружных барабанов агрегата цинкования, № 2

ЮЩЕНКО К. А. Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов, № 9

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

АСТАХОВ Е. А. Влияние детонационных покрытий на механические свойства изделий, № 6

Диссертации на соискание ученой степени, № 1–5, 11,

ЖЕРНОСЕКОВ А. М. Влияние вылета электрода на параметры шва при импульсно-дуговой сварке сталей, № 8

ЖУДРА А. П., КРИВЧИКОВ С. Ю., ПЕТРОВ В. В. К вопросу выбора боросодержащих шихтовых материалов для сердечника порошковой проволоки, № 4

ЗАГОРНИКОВ В. И. ЭЛС корпуса пламенной трубы стационарной газовой турбины, № 1

ЗАДОРОВИЧ Ю. Г., ЗОРИН М. И. Оценка механической прочности сварного пьезопреобразователя, № 7

Информация пресс-службы ИЭС. Европейская программа NOMAD по созданию роботизированной ячейки для высокопроизводительной сварки специализированных конструкций, № 1

КАЛЫНОВ В. Н., ПЕТРЕНКО А. Н. Износостойкость наплавочных сплавов с повышенной долей карбидов титана, № 12

МАКСИМОВ С. Ю. Подводная мокрая сварка стали 17Г1С с предварительной обработкой кромок взрывом, № 3

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ЕЛКИН А. А., КУРБАТОВ Ю. Ф., ВАСИЛЬЕВ А. С. О непрерывном мониторинге хранилищ жидкого аммиака, № 2
Новые книги, № 1, 3, 4, 7, 8, 12
Новости «Фрониуса», № 12

ОРЛОВ Л. Н., ГОЛЯКЕВИЧ А. А., НОВИКОВА Д. П., ПЕЛЕСКО В. Н., СИМОНЕНКО В. В. Порошковые проволоки для сварки и заварки дефектов литых сталей 110Г13Л, № 1

Патенты в области сварочного производства, № 2–8, 10, 11
ПЕНТЕГОВ И. В. Обобщение формулы К. К. Хренова для определения температуры плазмы сварочной дуги, № 8
По зарубежным журналам, № 1–7, 10–12

Разработано в ИЭС, № 5, 11
РЫЖОВ Р. Н., КОЖУХАРЬ В. А., МАКСИМОВ С. Ю., ПРИЛИПКО Е. А. Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств швов при подводной мокрой сварке, № 11

СТРИЖАКОВ Е. Л., ХАХИН Н. А., БАЦЕМАКИН М. Ю., ХОХЛОВ Д. С. Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки, № 2

Универсальные установки для воздушно-плазменной резки и электродуговой сварки, № 5

ЦЫБУЛЬКИН Г. А. Оценка крутизны статической характеристики дуги по результатам косвенных измерений, № 6

ХРОНИКА

Буштету Ю. П. — 75, № 7

II Восточноукраинская научно-техническая конференция «Сварка, литье и родственные процессы», № 2

Жданову И. М. — 75, № 7

Информация, № 1–12

К 90-летию со дня рождения Подгаецкого, № 2

К 150-летию со дня рождения Н. Г. Славянова, № 5

Кравцову Т. Г. — 70 лет, № 10

Кривцу И. В. — 50 лет, № 10

Куцаку В. С. — 60, № 2

Международная выставка и конференция в Катовице, № 1

Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», № 11

Международные и национальные мероприятия в области сварки и родственных технологий в 2004 г., № 1

Международный семинар «Современное сварочное оборудование и процессы сварки в промышленности», № 11

Молодые ученые Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — призеры III конкурса «Интеллектуальный потенциал молодых ученых — городу Киеву», № 2

Наши поздравления, № 3–7, 9

Обсуждение проблемы остаточного ресурса сварных конструкций (на встрече ученых НАН Украины с журналистами), № 1
11-я Международная специализированная выставка «Сварка-2004», № 8

Открытие мемориальной доски Е. О. Патону в Тбилиси, № 3

Памяти Бондаренко О. П., № 7

Памяти Копиленко Е. А., № 8

Памяти Ларионова В. П., № 4

Памяти Мосенкиса Ю. Г., № 10

Памяти Троицкого В. И., № 10

Памяти Шигаева Т. Г., № 6

Памяти Яровинского Х. Л., № 8

Поздравляем!, № 10

Посещение делегацией специалистов и ученых Республики Корея ИЭС им. Е. О. Патона, № 7

Посещение министром науки, исследований и технологий Исламской республики Иран г-ном Джафаром Тоуфигом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, № 5

57-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки, № 9

Смирнову В. В. — 75, № 7

3-я Международная специализированная выставка «Россварка-2003», № 3

WELDEX/Россварка-2004 (г. Москва), № 12

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Алексеев И. И., № 7
Алексеев Т. А., № 11
Антонов Д. А., № 11
Антонов С. Л., № 2
Астахов Е. А., № 6, 11

Басов Г. Г., № 2
Бацамакин М. Ю., № 2
Безбородов В. П., № 12
Белый А. И., № 2
Белоус В. Ю., № 4
Беляев А. Е., № 12
Бережный С. П., № 5
Бернацкий В. Н., № 3, 5
Бескорский М. В., № 4
Бесплохотный Г. П., № 1
Билоник И. М., № 5
Блащук В. Е., № 3
Бондарев А. А., № 4, 8, 11
Бондаренко О. П., № 5
Борисов Ю. С., № 1
Бродовой В. А., № 6
Буренко А. Г., № 5
Бурыков А. В., № 8
Бушма А. И., № 5
Быковский О. Г., № 6

Валиц К. А., № 11
Васильев А. С., № 2
Васильченко Г. С., № 6
Великованенко Е. А., № 2, 7, 9
Великий С. И., № 10
Верещаго Е. Н., № 8
Войтенко О. В., № 6
Ворончук А. П., № 10
Воропай Н. М., № 5, 7
Врижжевский Э. Л., № 11
Ву Дж. Б. С., № 10
Вышемирский Е. М., № 12

Гавриш В. С., № 6
Гайворонский А. А., № 7
Герасименко А. М., № 5
Голобородько Ж. Г., № 8 (2)
Головко В. В., № 3, 4, 7
Голякевич А. А., № 1
Гордань Г. Н., № 11
Грабин В. Ф., № 3, 4, 7
Грецкий Ю. Я., № 2
Григоренко Г. М., № 3, 4
Григоренко С. Г., № 10
Гузей В. И., № 6
Гулаков С. В., № 10
Гулида В. П., № 9
Гуржий А. А., № 7

Демченко В. Ф., № 10
Демченко Ю. В., № 6
Дзыкович В. И., № 2
Диденко С. И., № 4
Дидковский А. В., № 9
Добкина Ю. Г., № 4
Добрушин Л. Д., № 9
Драган С. В., № 8
Дрюс П., № 7
Дух С. В., № 9

Дядин В. П., № 4

Елкин А. А., № 2
Емельянов О. А., № 5
Ермолаев Г. В., № 8
Ершов А. В., № 6

Жадкевич А. М., № 11, 12
Жадкевич М. Л., № 4
Жерносеков А. М., № 1, 8, 12
Жудра А. П., № 2, 4, 10

Заварика Н. Г., № 2
Загадарчук В. Ф., № 2
Загорников В. И., № 1
Задерий Б. А., № 6
Задирака В. Ю., № 1
Задорожный Ю. Г., № 7
Зайцева Н. В., № 4
Замков В. Н., № 2, 4, 5, 6, 9, 11
Захаров И. М., № 12
Захаров С. М., № 4
Зацерковный А. С., № 1
Звягинцева А. В., № 7, 8
Зельниченко А. Т., № 5
Зорин И. В., № 10
Зорин М. И., № 7
Зубченко А. С., № 6

Иванов В. П., № 10
Иванченко В. Г., № 9
Илюшенко В. М., № 9
Ильин А. С., № 1
Ищенко А. Я., № 9

Кабакцкий А. В., № 3
Кабакцкий В. И., № 3
Казимир В. В., № 5
Калек Д. М., № 4
Калугин Р. Н., № 5
Кальянов В. Н., № 12
Карасев М. В., № 5, 12
Караченцев Г. Г., № 1
Кархин В. А., № 1
Квасницкий В. В., № 8 (2)
Квасницкий В. Ф., № 8 (2)
Киреев Л. С., № 1
Кирилова Н. В., № 12
Кирияков В. М., № 6
Кисилевский Ф. Н., № 6
Кислицын В. М., № 11
Клапачук А. В., № 6
Кныш В. В., № 6
Коваленко В. С., № 7
Ковальчук В. С., № 3
Ковтуненко В. А., № 5
Кожухарь В. А., № 11
Козлитина С. С., № 10
Колпаков В. В., № 7
Кондратьев И. А., № 10
Кононенко В. Я., № 3, 5
Корж В. Н., № 11
Коробов Ю. С., № 7
Королева Т. В., № 1
Король В. Н., № 2
Коротынский А. Е., № 2, 9

Корсун А. О., № 5
Корсун О. Н., № 4
Корсунов К. А., № 2
Костин В. А., № 3, 4, 7, 10
Котенко С. С., № 6
Красильников С. Г., № 9
Краснощечкова В. А., № 3
Кремер-Васмух С., № 7
Крещенко В. А., № 4
Кривцун И. В., № 1, 5, 6
Кривчиков С. Ю., № 4
Кузнецов В. Д., № 2
Кузьменко В. Г., № 6
Кузьменко Д. Ю., № 5
Кузьменко О. Г., № 10 (2)
Кузьмин И. С., № 5
Кузьмин С. В., № 4
Кулик В. М., № 3
Курбатов Ю. Ф., № 2
Кусков Ю. М., № 10 (2)
Кучук-Яценко В. С., № 1, 11
Кучук-Яценко С. И., № 2, 9

Лабарткава А. В., № 8
Лаврентик О. А., № 10
Ланкин Ю. Н., № 5
Лебедев В. А., № 2, 5, 6
Лебедев В. К., № 1
Лебедев Ю. М., № 8
Лентюгов И. П., № 10
Лесков Г. И., № 3
Литвинов В. В., № 5
Лобанов Л. М., № 8, 9
Лобанов О. Ф., № 9
Лубенец С. В., № 5
Лукашенко А. Г., № 12
Ляховая И. В., № 4
Лысак В. И., № 4, 10
Лычко И. И., № 9

Мажейка А. И., № 5
Мазанко В. Ф., № 2
Маковецкая О. К., № 3
Максимов С. Ю., № 1-4, 7, 11
Максимова С. В., № 1, 9
Мальшев А. В., № 2
Марышев П. В., № 5
Манченко А. Н., № 12
Маринченко А. Е., № 6
Маркашова Л. И., № 8, 11
Маркович С. И., № 5
Мартыненко В. А., № 8
Матвиенко М. В., № 8
Махненко В. И., № 1, 7
Медовар Л. Б., № 1
Микитин Я. И., № 9
Минцев А. Ф., № 4
Михеев П. П., № 6
Миходуй О. Л., № 8
Мозжухин А. А., № 9
Моляр А. Г., № 2
Морозов А. А., № 5
Москаленко А. А., № 5
Мяльница Г. Ф., № 4

Назаренко О. К., № 5
Назаренко С. В., № 4, 8
Найда В. Л., № 9

Наконечный А. А., № 1
Недосека А. Я., № 2
Нестеренков В. М., № 5
Никонова Н. В., № 12
Новгородский В. Г., № 5
Новиков В. И., № 4
Новикова Д. П., № 1, 3, 8, 10, 12
Носов С. И., № 6

Окул В. И., № 9
Олексенко В. А., № 4
Орлов Л. Н., № 1
Осин В. В., № 10

Павленко А. В., № 10
Павленко Г. В., № 5, 12
Паламарчук Б. И., № 12
Пасечник С. Ю., № 11
Патон Б. Е., № 1, 2, 5, 9, 11
Пащин Н. А., № 12
Пеев А. П., № 4
Пелешко В. Н., № 1
Пентегов И. В., № 8, 11
Переплетчиков Е. Ф., № 10
Петренко А. Н., № 12
Петриченко И. К., № 11
Петров В. В., № 4
Пешков В. В., № 1
Пивторак Н. И., № 7
Пинчук Н. И., № 2
Письменный А. С., № 4, 10-12
Пихота Ю. В., № 5
Пищак В. Г., № 2
Плошихин В. В., № 1
Подоба Н. В., № 6
Позняков В. Д., № 6, 8
Полетика И. М., № 12
Полищук Е. П., № 6
Полищук М. А., № 4
Половецкий Е. В., № 11
Полухин В. В., № 12
Попиль Ю. С., № 11
Попов В. В., № 5
Попов В. С., № 5
Попов С. Н., № 11
Порицкий П. В., № 6
Постолатий Н. И., № 12
Прилипка Е. А., № 11
Прилуцкий В. П., № 4, 6, 9
Приходовский А. А., № 1
Прокофьев А. С., № 12
Просянов О. Ф., № 8
Псарева И. С., № 10
Пулька Ч. В., № 4, 10
Пустовойт С. В., № 3

Работинский Д. Н., № 5, 12
Раич К., № 12
Рассамахин Б. М., № 8
Ременяк И. П., № 11 (2)
Розынка Г. Ф., № 7, 9
Романовский Г. Ф., № 8
Романчук Н. П., № 8
Руденко П. М., № 6
Рыжов Р. Н., № 2, 4, 11
Рябцев И. А., № 10 (3)
Рябцев И. И., № 10

Рязанцев Н. К., № 2

Савицкий А. М., № 8
Савицкий М. М., № 3, 8
Савченко В. С., № 7, 8, 12
Саенко В. Я., № 1
Саидов А. Н., № 2
Самохин М. С., № 4
Самохин С. М., № 4
Сараев Ю. Н., № 12
Саржевский В. А., № 7
Сахацкий А. Г., № 1, 11
Севастьянов С. П., № 12
Селезнев А. А., № 5
Семенюк В. С., № 4
Сербин С. И., № 8
Сидоренко М. В., № 5
Сидорец В. Н., № 12
Симоненко В. В., № 1
Скопюк М. И., № 9
Скульский В. Ю., № 3, 4
Соколов Г. Н., № 10 (2)
Солониченко Ю. В., № 8

Соляник В. В., № 12
Сом А. И., № 10
Сорока В. Л., № 5
Спыну Г. А., № 5
Старке Г., № 7
Старченко Е. Г., № 6
Старущенко Т. М., № 12
Стемковский Е. П., № 11
Степанов К. К., № 2
Стефанив Б. В., № 1
Стрижаков Е. Л., № 2

Талерко А. Н., № 6
Тарасов Г. В., № 8
Терновой Е. Г., № 8
Титов А. А., № 4
Ткаченко А. Н., № 2
Ткаченко В. А., № 5
Ткаченко С. А., № 2
Топольский В. Ф., № 2, 11
Тюкалов В. Г., № 5
Тютев А. В., № 12
Урumbaев Б. Я., № 2

Фальченко Ю. В., № 2
Фомакин А. А., № 10
Хаккель М., № 7
Харченко Г. К., № 2
Хахин Н. А., № 2
Хизниченко Ю. Н., № 8
Хорунов В. Ф., № 1, 9
Хохлов Д. С., № 2
Хромченко Ф. А., № 5
Худойназаров А. А., № 2

Царюк А. К., № 3, 4
Цурихин С. Н., № 10
Цыбульский Г. А., № 6

Чабан Г. Н., № 5
Чантрак С., № 12
Чвертко П. Н., № 11 (2)
Чепурной А. Д., № 1
Червяков Н. О., № 8
Черняк Я. П., № 10
Чигарев В. В., № 10

Чирич Р., № 12

Шаблий О. Н., № 4, 10
Шаповалов Е. В., № 6
Шарик М. В., № 4
Шейко П. П., № 1
Шейковский Д. А., № 11
Шепотыко В. П., № 5
Швец В. И., № 8, 11
Швец Ю. В., № 9
Шимановский Ю. О., № 1
Шолохов М. А., № 5
Шурупов В. В., № 1

Щетинин С. В., № 2

Юматова В. И., № 9
Ющенко К. А., № 6-9 (2), 12

Яременко М. А., № 2

Организаторы:
Министерство промышленности и энергетики РФ,
Министерство экономического развития и торговли РФ,
Правительство Нижегородской области,
Российское Научно-техническое Сварочное Общество,
Нижегородский государственный технический университет,
ВЗАО "Нижегородская Ярмарка"



Выставка 21-24 июня 2005 года

СВАРКА-2005

- Оборудование и оснастка для контактной сварки;
- Оборудование для специализированных способов сварки;
- Машины и оборудование для дуговой сварки и резки, источники питания, приспособления и инструменты;
- Оборудование для плазменной обработки металлов;
- Машины и оборудование для газовой сварки, вспомогательный инструмент;
- Оборудование, приспособления и инструменты для сварки в среде защитного газа;
- Оборудование для подготовки поверхности;
- Автоматические системы управления для сварочных процессов, роботы и робототехнические комплексы;
- Измерение, контроль, испытания, обработка данных;
- Средства защиты сварщиков и охрана окружающей среды;
- Научное и информационное обеспечение.



Россия, 603086 г. Нижний Новгород, ул. Совнаркомовская, 13
Тел. (8312) 77-54-96, 77-55-89; факс (8312) 77-55-86, E-Mail: kaa@yarmarka.ru levin@yarmarka.ru