



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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

И. Араты (Япония),  
Н. П. Алешин (Россия),  
И. Гринвяк (Словакия),  
У. Дилтей (Германия),  
Е. А. Дорошкевич (Беларусь),  
П. Зайффарт (Германия),  
А. С. Зубченко (Россия),  
К. Иноуз (Япония),  
К. Мацубути (США),  
Н. И. Никифоров (Россия),  
Б. Е. Патон (Украина),  
Я. Пилиярчик (Польша)

Адрес редакции:

03680, Украина, г. Киев-150,  
ул. Баженко, 11

Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23

Факс: (044) 268 04 86

E-mail: office@paton.kiev.ua

tomik@mac.relc.com

http://www.nas.gov.ua/rwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, В. И. Котляр,  
Г. В. Ольшевская

Электронная верстка:

И. С. Баташева, И. Р. Наумова,  
И. В. Петушкив, Т. Ю. Снегирева

Свидетельство

о государственной регистрации  
КВ 4788 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины изданий  
для публикации трудов  
соискателей ученых степеней

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Белоус В. Ю., Замков В. Н.**

Влияние флюсов на температуру и плотность тока в столбе дуги при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом ..... 3

**Кулик В. М., Савицкий М. М., Новикова Д. П., Васильев В. Г.,  
Гордань Г. Н.** Аргонодуговая обработка сварного соединения стали

30ХГСА ..... 7

**Нестеренко Н. П., Сенченков И. К.** Анализ и классификация

пластинчатых волноводов для ультразвуковой сварки полимеров и  
композитов на их основе ..... 14

**Харламов Ю. А., Борисов Ю. С.** Влияние микрорельефа поверхности

на прочность сцепления с газотермическими покрытиями ..... 19

**Левченко О. Г.** Совершенствование методов и средств защиты от

сварочных аэрозолей ..... 27

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

**Бернадский В. Н.** Тонколистовые сварные составные заготовки «Tailored

Blanks» в автомобилестроении ..... 34

**Киселевский Ф. Н., Долиненко В. В.** Объектно-ориентированное  
программирование систем управления технологическим процессом

сварки ..... 43

**Назаренко О. К., Нестеренко В. М., Непорожний Ю. В.**

Конструирование и электронно-лучевая сварка вакуумных камер ..... 50

**Макаренко Н. А., Грановский А. В., Кондрашов К. А.** Улучшение  
технологических характеристик плазма-МИГ наплавки порошковой

проводкой ..... 53

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**Шаповал А. Н.** Оборудование с системой электроконтактного нагрева

для волочения сварочной вольфрамовой проволоки ..... 56

Патенты в области сварочного производства ..... 58

По зарубежным журналам ..... 59

Новые книги ..... 62

### ХРОНИКА

Практический семинар «Руководителю о системе менеджмента качества» ..... 63

Наши поздравления ..... 65

Памяти В.И.Трефилова ..... 66

Наши соболезнования ..... 67

### РЕКЛАМА

68

Главный спонсор журнала **ОАО «Фирма СЭЛМА»**



# Monthly Scientific-Technical and Production Journal

## Avtomicheskaya Svarka

№ 6 (579)  
june 2001

Published since March, 1948

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

### EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
**B.E.PATON**

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

### THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

I. Arata (Japan),  
N.P.Alyoshin (Russia),  
I.Hrvnak (Slovakia),  
U.Diltey (Germany),  
E.A.Doroshkevich (Belarus),  
P.Seyffarth (Germany),  
A.S.Zubchenko (Russia),  
K.Inoue (Japan),  
K.Masubuchi (USA),  
N.I.Nikiforov (Russia),  
B.E.Paton (Ukraine),  
Ya.Pilyarchik (Poland)

### 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: office@paton.kiev.ua  
tomik@mac.relc.com  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:  
E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,  
G. V. Olshevskaya  
Electron galley  
I.S.Batasheva, I.R.Naumova,  
T. Yu. Snegireva, I.V.Petushkov

## CONTENTS

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**Eroshenko L.E., Prilutsky V.P., Belous V.Yu., Zamkov V.N.** Effect of fluxes on the temperature and current density in arc column during argon-arc tungsten electrode welding ..... 3

**Kulik V.M., Savitsky M.M., Novikova D.P., Vasiljev V.G., Gordan G.N.** Argon-arc treatment of 30KhGSA steel welded joint ..... 7

**Nesterenko N.P., Senchenkov I.K.** Analysis and classification of plate waveguides for ultrasonic welding of polymers and composites on their base ..... 14

**Kharlamov Yu.A., Borisov Yu.S.** Effect of microrelief of surface on strength of adhesion with thermal coatings ..... 19

**Levchenko O.G.** Improvement of methods and means for protection from welding aerosols ..... 27

### INDUSTRIAL

**Bernadsky V.N.** Thin-sheet welded blanks "Tailord blanks" in automobile industry ..... 34

**Kisselevsky F.N., Dolinenko V.V.** Object-oriented programming of systems for welding technological process control ..... 43

**Nazarenko O.K., Nesterenkov V.M., Neporozhniy Yu.V.** Designing and electron beam welding of vacuum chambers ..... 50

**Makarenko N.A., Granovsky A.V., Kondrashov K.A.** Improvement of technological characteristics of plasma-MIG cored-wire surfacing ..... 53

### BRIEF INFORMATION

**Shapoval A.N.** Equipment with a system of electric contact heating for tungsten wire drawing ..... 56

Patents in the field of welding ..... 58

Review of foreign journals ..... 59

New books ..... 62

### NEWS

Practical seminar "About the system of quality management for managers" ..... 63

Our congratulations ..... 65

In memory of V.I.Trefilov ..... 66

Memorial ..... 67

ADVERTISING ..... 68

Journal «Avtomicheskaya Svarka» is published in English under the title  
**«The Paton Welding Journal».**

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact:  
tel.: (380 44) 227 67 57, fax: (380 44) 227 46 77, E-mail: tomik@mac.relc.com

# ВЛИЯНИЕ ФЛЮСОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ И ПЛОТНОСТЬ ТОКА В СТОЛБЕ ДУГИ ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ ТИТАНА ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

**Л. Е. ЕРОШЕНКО, В. П. ПРИЛУЦКИЙ**, кандидаты техн. наук, **В. Ю. БЕЛОУС**, инж., **В. Н. ЗАМКОВ**, д-р техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние фторидов бария, кальция, магния, натрия и алюминия, являющихся основными компонентами сварочных флюсов для аргонодуговой сварки титана, на температуру столба дуги и ее распределение в прианодной области. Установлено, что при дуговой сварке вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса (TIG-F) повышается температура и электропроводность плазмы столба дуги, а форма температурного поля в прианодной области дуги приближается к цилиндрической. Глубокое проплавление, характерное для этого способа сварки, обусловлено более высокими температурой и плотностью тока в дуге вблизи анода.

**Ключевые слова:** аргонодуговая сварка, титан, флюс, спектральная линия, температура столба дуги, электропроводность

Главной отличительной особенностью аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) является высокая плотность тока в анодном пятне [1–3]. Это и определяет технологические преимущества указанного способа сварки — глубокое проплавление, узкие швы, относительно низкую погонную энергию [4–6]. Происходящие в зоне дуги физико-химические процессы, обуславливающие ее контрагирование и, как следствие, повышение плотности тока на аноде, детально рассмотрены в ряде работ [7, 8]. Установлено, что степень сжатия дуги и рост плотности тока в анодном пятне зависят от химического состава флюса и активности его взаимодействия со свариваемым металлом [7, 9]. Однако в литературе отсутствуют экспериментальные данные о влиянии флюсов на температурные параметры столба дуги. Лишь в [10] на основании полученной зависимости между степенью покрепления спектральных линий паров свариваемого металла, глубиной его проплавления и составом флюса высказано предположение, что флюсы влияют на температуру дуги вблизи анода. В то же время именно температура и плотность тока прианодной области являются теми основными па-

раметрами дуги, которые определяют характер и механизм проплавления металла.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния фторидов бария, кальция, магния, натрия и алюминия, являющихся основными компонентами сварочных флюсов для титана, на температуру столба дуги и ее распределение в прианодной области. В качестве анода использовали пластину из технического титана марки ВТ1-0 толщиной 4 мм. Сварку образцов выполняли вольфрамовым электродом марки СВИ-1 диаметром 3 мм с углом заточки 30°. При этом сварочный ток составлял 100 А, скорость сварки — 8 м/ч, установочная длина дуги — 5 мм. Методика определения температуры в дуге и схема экспериментальной установки приведены в [11]. Фотосъемку поперечных спектров дуги начинали на расстоянии 0,1 мм от поверхности анода и продолжали вдоль столба дуги с интервалом 0,25 мм в направлении катода (рис. 1).

Как и в работе [11], радиальные распределения температуры в различных сечениях столба дуги определяли по абсолютной интенсивности свечения континуума аргоновой плазмы и атомных спектральных линий ArI. Переход от радиальных распределений температуры  $T$  к радиальным распределениям электропроводности  $\sigma$  осуществляли по теоретической кривой  $\sigma(T)$ , приведенной в [12]. За

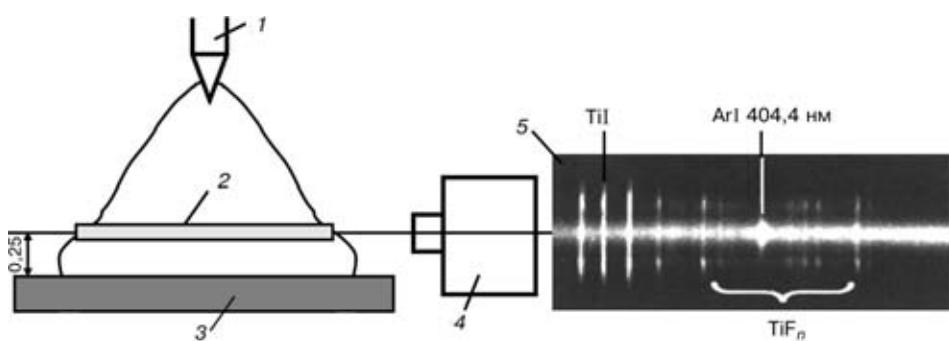


Рис. 1. Схема фотосъемки поперечных спектров столба дуги: 1 — электрод; 2 — исследуемое сечение столба дуги; 3 — титановый анод; 4 — спектограф СТЭ-1; 5 — спектограмма исследуемого участка столба дуги

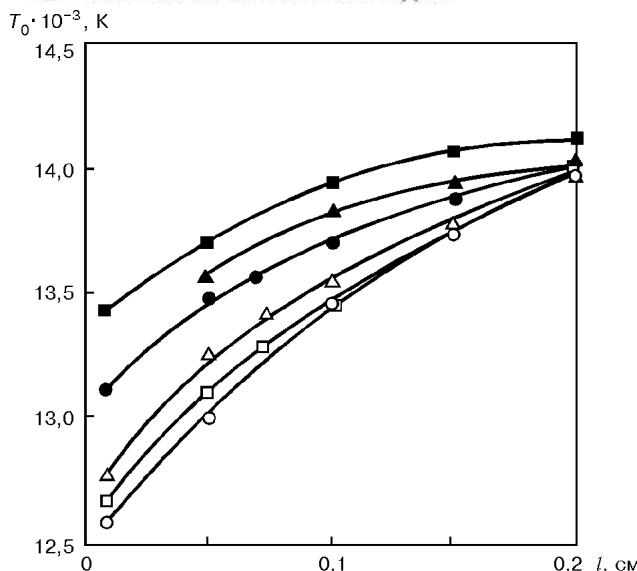


Рис. 2. Распределение температуры по оси столба дуги ( $\circ$  — Ti;  $\square$  —  $\text{BaF}_2$ ;  $\Delta$  —  $\text{CaF}_2$ ;  $\bullet$  —  $\text{MgF}_2$ ;  $\blacktriangle$  —  $\text{NaF}$ ;  $\blacksquare$  —  $\text{AlF}_3$ )

радиус столба дуги принимали значение  $r$ , при котором  $\sigma \approx 0$ . Если поперечные размеры столба аргоновой дуги определять только по свечению непрерывного спектра тормозного и рекомбинационного излучения электронов, то значение диаметра токопроводящего канала может быть занижено. Это

вызвано тем, что при фотографировании спектров дуги излучение континуума регистрируется лишь при температурах выше 8500...10500 К [13], а электропроводность чистой аргоновой плазмы снижается до нулевых значений лишь при  $T \approx 6000$  К [12]. Поэтому график радиального распределения температуры  $T(r)$  по сечению столба дуги строили в два этапа. Вначале определяли радиальное распределение температуры по интенсивности свечения континуума в высокотемпературной области дуги. Затем по интенсивности свечения спектральных линий аргона ArI находили распределение температуры в низкотемпературной области дуги, начиная от участка, где заканчивалось свечение континуума. После этого обе кривые соединяли, совмещая точки по радиусу столба дуги, в которых значения температур, полученные по свечению континуума и линий ArI, совпадали. Однако необходимо подчеркнуть, что для определения аксиального распределения температуры в столбе дуги достаточно знать лишь радиальные распределения интенсивности свечения континуума [11]. Полученные таким образом аксиальные распределения температур (рис. 2) свидетельствуют о том, что при сварке по слою флюса температура в прилегающей к аноду области выше, чем при сварке без флюса. Степень увеличения температуры, как и глубины проплавления [9],

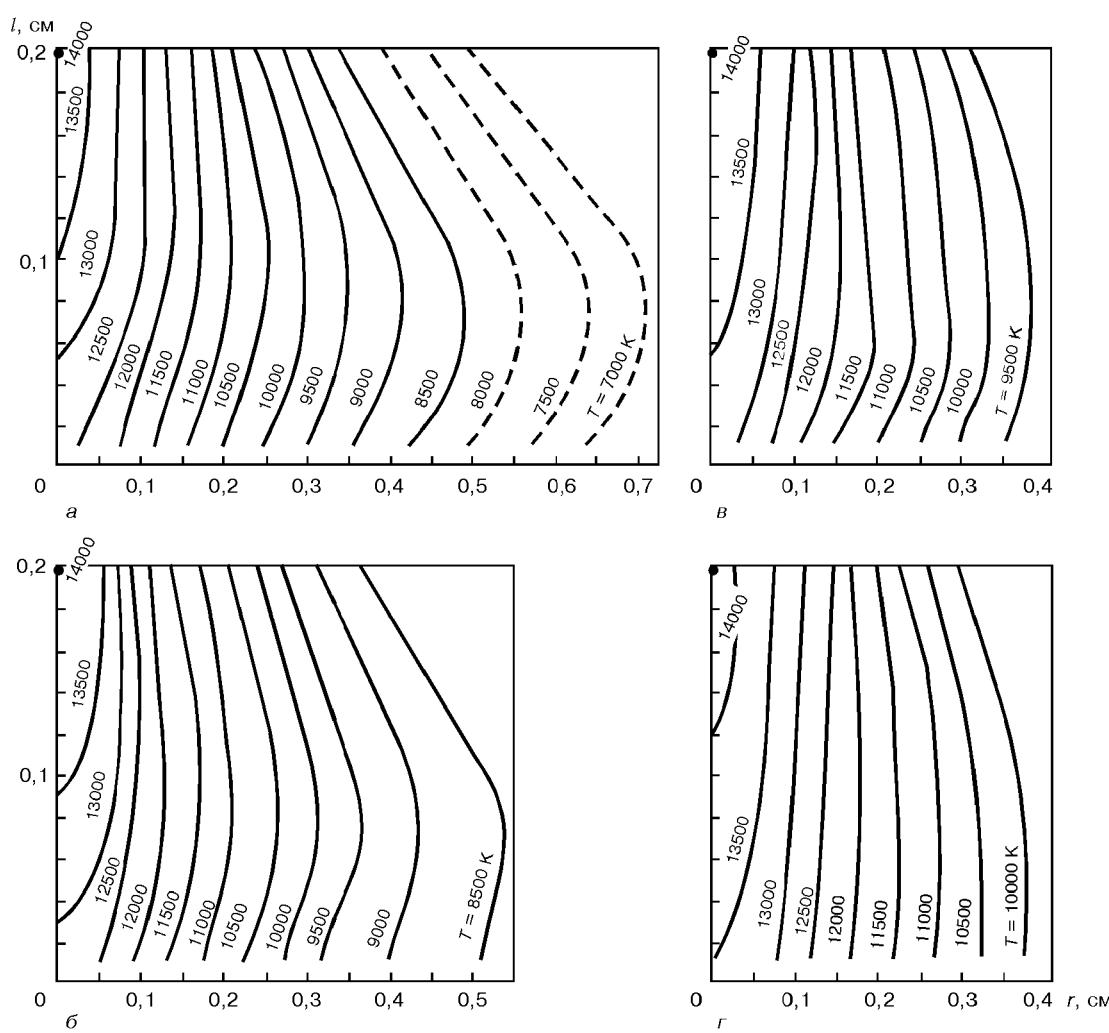


Рис. 3. Температурные поля в столбе дуги при сварке с анодом:  $a$  — Ti;  $b$  — Ti +  $\text{CaF}_2$ ;  $c$  — Ti +  $\text{MgF}_2$ ;  $d$  — Ti +  $\text{AlF}_3$

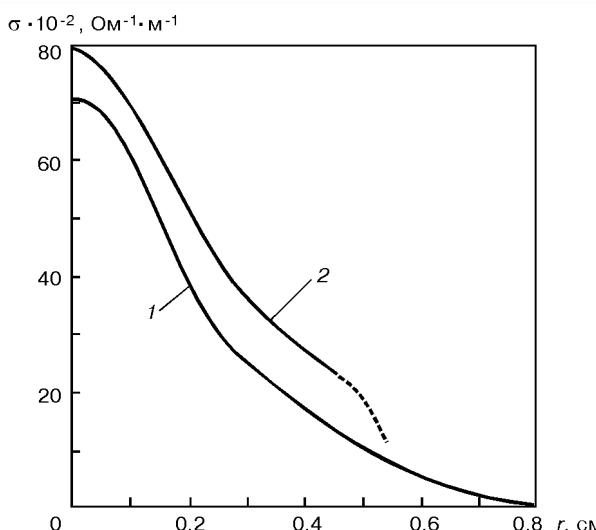


Рис. 4. Радиальное распределение электропроводности в столбе дуги на расстоянии 0,5 мм от анода: 1 — Ti; 2 — Ti + AlF<sub>3</sub>

возрастает в ряду BaF<sub>2</sub> → CaF<sub>2</sub> → MgF<sub>2</sub> → NaF → → AlF<sub>3</sub> и в направлении анода. В такой же последовательности увеличивается и протяженность зоны с более высокой температурой вдоль столба дуги. Результаты этих исследований экспериментально подтверждают, что применение флюсов при сварке вольфрамовым электродом в аргоне повышает температуру плазмы в прианодной области дуги.

Следует отметить, что в спектрах, снятых непосредственно у анода, при использовании в качестве флюса фторида натрия наблюдалось настолько большое количество спектральных линий паров материала анода, что это не дало возможности корректно определить температуру дуги ближе, чем на расстоянии 0,5 мм от поверхности анода. В то же время при сварке без флюса в спектре дуги не наблюдались спектральные линии TiI (в отличие от спектров, полученных при сварке по флюсу). Это свидетельствует об их незначительной концентрации на периферии столба дуги. Анализ теоретической зависимости коэффициента интенсивности излучения атомной линии аргона ArI от температуры  $I(T)$  при наличии примесей паров анода в составе аргоновой плазмы [14, 15] показал, что при массовой концентрации паров анода, например, железа, вплоть до 10 % температуру на периферии столба дуги можно измерять, используя состав беспримесной аргоновой плазмы. Поскольку потенциалы ионизации железа и титана имеют близкие значения (соответственно 7,87 и 6,82 эВ), то эта возможность, по-видимому, сохраняется и для состава плазмы Ar + Ti. Наличие же флюсов в зоне сварки значительно усложняет определение радиальных распределений температуры  $T(r)$  и электропроводности  $\sigma(r)$  на периферии столба дуги. Так, при сварке по флюсу в участках дуги, где температура составляет ~ 8500 ... 9000 К, наблюдалось интенсивное свечение линий TiI и молекулярных полос TiF<sub>n</sub> (см. рис. 1). Максимумы их свечения пространственно совпадают и находятся на расстоянии ≈ 4 мм от оси дуги. Поэтому, начиная с температуры порядка 8500...9000 К, плазма в данном случае перестает быть чисто аргоновой, что не позволяет пользоваться

ся составом беспримесной аргоновой плазмы для корректного определения температуры и соответственно электропроводности в периферийных участках дуги. Учитывая склонность фторидов титана к образованию отрицательных молекулярных ионов [14, 15], можно предположить, что электронная электропроводность в этих участках плазмы резко уменьшается. Поэтому на рис. 3 представлены температурные поля лишь центральной части дуги при сварке по слою CaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub> и AlF<sub>3</sub>. Как видно из рис. 3, а, форма температурного поля столба дуги при сварке без флюса аналогична пространственной форме свечения свободно горящей дуги в аргоне [16]. Она имеет форму конуса, расширяющегося в направлении от катода к аноду. У поверхности последнего наблюдается пространственное сужение столба дуги, обусловленное особенностями теплопередачи от плазмы металлическому аноду. При сварке по флюсу в прианодной области это пространственное сужение и конусность температурного поля уменьшаются (рис. 3, б-г). При этом форма температурного поля приближается к цилиндрической. Степень влияния флюсов как на нее, так и на повышение температуры в столбе дуги (см. рис. 2) и увеличение глубины проплавления зависит от химического состава флюса и усиливается от CaF<sub>2</sub> к AlF<sub>3</sub>. Одновременно в столбе дуги увеличивается и радиус зоны с более высокой температурой. Так, например, на расстоянии 3,5 мм от оси дуги в сечении на расстоянии 0,2 мм от поверхности анода температура плазмы при сварке по флюсу AlF<sub>3</sub> повысилась более чем на 1000 К по сравнению с температурой на таком же участке при сварке без флюса.

Рост температуры в центральных областях столба дуги при сварке по флюсу вызывает соответствующее увеличение электропроводности этих участков плазмы (рис. 4). При этом необходимо отметить, что если при сварке без флюса электропроводящая зона заканчивается на расстоянии ≈ 8 мм от оси дуги, то при сварке по слою таких флюсов, как MgF<sub>2</sub>, NaF и AlF<sub>3</sub>, характер кривой, описывающей распределение электропроводности  $\sigma(r)$ , должен претерпевать резкое изменение уже на расстоянии ≈ 4 мм от оси дуги (при ее длине 5 мм). Именно здесь, как отмечалось выше, наблюдаются максимумы интенсивности свечения молекулярных полос фторидов титана, а, значит, и резкое падение электропроводности плазмы вследствие захвата электронов фторидами титана и образованием отрицательных молекулярных ионов типа TiF<sub>n</sub> [7, 9]. В то же время по условиям экспериментов общая электропроводность столба дуги во всех случаях должна оставаться неизменной. Это связано с тем, что во всех опытах сварочный ток оставался неизменным (100 А), как и напряженность поля в столбе дуги, поскольку она не зависит от наличия флюса в зоне сварки [17].

Таким образом, тот факт, что при сварке по флюсу электропроводность плазмы центральной части столба дуги повышается (рис. 4), а его общая электропроводность остается неизменной, позволяет утверждать, что электропроводящий канал столба дуги при сварке по флюсу сжимается. Его радиус ста-



новится меньше, чем при сварке без флюса. Однако, как отмечалось выше, корректно определить радиальные распределения температуры  $T(r)$  и электропроводности  $\sigma(r)$  в периферийной области столба дуги при сварке по флюсу экспериментальными методами не представляется возможным. Следовательно, нельзя экспериментально определить и радиус электропроводящей зоны столба дуги. Характер распределения электропроводности в периферийной зоне столба дуги условно представлен на рис. 4 штриховой линией.

На основании приближенных расчетов, выполненных по данным рис. 4, можно утверждать лишь то, что при сварке по флюсу  $AlF_3$  электропроводность центральной зоны столба дуги, ограниченной радиусом 0,4 см, на расстоянии 0,5 мм от анода составляет около 75 общей электропроводности дуги и не более 47 % при сварке без флюса.

## Выводы

1. Экспериментально установлено, что при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) повышаются температура и электропроводность плазмы столба дуги, а форма температурного поля в прианодной области дуги приближается к цилиндрической.

2. Глубокое проплавление, характерное для этого способа сварки, обусловлено более высокой температурой и плотностью тока в дуге вблизи анода.

1. Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Распределение плотности тока в анодном пятне при дуговой сварке титана // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 19–22.
2. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 3. — С. 13–15.
3. Плотность тока в анодном пятне при сварке обычных и рафинированных сталей / М. М. Савицкий, В. С. Гвоздецкий, В. И. Скрыпник и др. // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 17–20.

The influence of barium, calcium, magnesium, sodium and aluminium fluorides that are the main components of welding fluxes for argon-arc welding of titanium, on the arc column temperature and its distribution in the near anode region has been studied. It is found that in tungsten electrode argon-arc welding over a layer of flux (TIG-F) the temperature and electrical conductivity of the arc column plasma are increased, and the shape of the temperature field in the near-anode region of the arc is close to the cylindrical one. Deep penetration, typical for this welding process, is due to higher temperature and current density in the arc near the anode.

4. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
5. Савицкий М. М., Кушниренко Б. Н., Олейник О. И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (ATIG-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20–28.
6. Paton B. E., Zamkov V. N., Priloutsky V. P. Le soudage A-TIG du titane et de ses alliages // Soudage et techn. connexes. — 1998. — № 11–12. — P. 23–26.
7. Contraction of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding / B. E. Paton, V. N. Zamkov, V. P. Prilutsky, P. V. Poritsky // The Paton Welding J. — 2000. — № 1. — P. 5–11.
8. Савицкий М. М., Лесков Г.И. Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом // Автомат. сварка. — 1980. — № 9. — С. 17–22.
9. Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Гуревич С. М. Влияние состава флюса на процесс сварки титана неплавящимся электродом // Там же. — 1977. — № 4. — С. 22–26.
10. Исследование свечения паров анода для оценки технологических характеристик дуги в аргоне / Л. Е. Ерошенко, В. Н. Замков, В. С. Мечев, В. П. Прилуцкий // Там же. — 1979. — № 9. — С. 33–35.
11. Аксидальное распределение температуры в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне / Л. Е. Ерошенко, В. П. Прилуцкий, В. С. Белоус, В. Н. Замков // Там же. — 2001. — № 3. — С. 11–14.
12. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Электропроводность электрической дуги в аргоне // Там же. — 1974. — № 7. — С. 13–16.
13. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Радиальное распределение температуры электрической дуги в аргоне // Там же. — 1975. — № 3. — С. 6–9.
14. Месси Г. Отрицательные ионы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 754 с.
15. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1967. — 832 с.
16. Olsen H. N. The electric arc as a light source for quantitative spectroscopy // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 1963. — 3. — P. 305–333.
17. Гуревич С. М., Замков В. Н. Некоторые особенности сварки титана неплавящимся электродом с применением флюсов // Автомат. сварка. — 1966. — № 12. — С. 13–16.

Поступила в редакцию 06.07.2000



УДК 621.791:669.018.295

## АРГОНОДУГОВАЯ ОБРАБОТКА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 30ХГСА

**В. М. КУЛИК**, канд. техн. наук, **М. М. САВИЦКИЙ**, д-р техн. наук, Д. **П. НОВИКОВА**, В. Г. **ВАСИЛЬЕВ**,  
**Г. Н. ГОРДАНЬ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние параметров режима и термического цикла локальной аргонодуговой обработки без расплавления на структуру металла и механические свойства сварного соединения высокопрочной стали. Показано, что в широких пределах скорости обработки дуговые нагревы до температур аустенитизации металла сварного соединения, закалившегося в процессе сварки, обеспечивают повторную закалку, а ниже температур аустенитизации — кратковременный отпуск. После местной аргонодуговой обработки повышается пластичность и ударная вязкость металла сварного соединения, улучшается характер разрушения, уменьшается чувствительность к концентраторам напряжений.

**Ключевые слова:** сварное соединение, дуговая обработка, высокопрочная сталь, нагрев, охлаждение, закалка, отпуск, структура, бейнит, мартенсит, остаточный аустенит, дилатограмма, твердость, механические свойства, фрактограмма

Обеспечение высоких показателей пластичности, ударной вязкости, прочности и трещиностойкости сварного соединения при сварке высокопрочных за-каливающихся сталей является сложной задачей.

Решить ее можно путем снижения скорости охлаждения соединения после сварки за счет предварительного, сопутствующего и последующего подогревов, а также многослойной сварки [1–3], выполнения после сварки печного отпуска с минимальным перерывом или без него, местной обработки сварного соединения токами промышленной и высокой частоты, тепловыделяющими элементами, различного рода излучателями энергии, газовым пламенем, твердым топливом и др. [4]. Однако все эти меры усложняют технологический процесс, повышают трудо- и энергозатраты, снижают производительность, увеличивают стоимость работ, требуют использования специальных, отличных от сварочных, источников тепла, тем самым ограничивая возможность применения подогрева, особенно при изготовлении крупногабаритных конструкций.

Известны примеры использования в качестве источника тепла для сварки и последующей местной обработки сварного соединения электронного луча [5]. При дуговой сварке для такой обработки применяют также плазму, но для этого необходимо специальное оборудование. С помощью аргонодуговой обработки можно улучшать структуру и свойства, повышать долговечность сварных соединений при ударных и циклических нагрузлениях [6]. При этом преимущественно используют обработку с оплавлением металла. Этот же процесс, но без оплавления применяют пока ограниченно, хотя он позволяет осуществлять поверхностную закалку артиллерийских стволов [7], а при небольшой скорости обработки — измельчать структуру металла соединения и повышать ударную вязкость металла шва [8]. От режима дуговой обработки без оплавления существенно зависят значения температуры нагрева, а так-

же характер изменения структуры и свойств отпущеного основного металла [9]. Однако использование этих данных применительно к сварному соединению затруднительно, так как закаленный и отпущенный, литой и катаный металлы имеют свои особенности превращений при нагреве и охлаждении [10]. Связанные с этим трудности возрастают при ATIG-сварке с узким глубоким проплавлением без разделки кромок.

Целью работы являлось определение возможности и особенностей изменения структуры металла сварного соединения, закалившегося в процессе сварки, улучшение его механических свойств, особенно вязкости, с помощью аргонодуговой обработки на разных режимах без расплавления. При этом целесообразно измельчать структуру металла сварного соединения для создания благоприятного соотношения ее составляющих, а также улучшения напряженного состояния металла за счет развития процессов отпуска и самоотпуска.

Исследовали соединения стали 30ХГСА толщиной 3 мм, выполненные аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом без присадочного металла. После сварки металл сварного соединения обладает бейнитно-мартенситной структурой закалки [8]. Поскольку металл шва по химическому составу является близким основному металлу, это дает возможность анализировать превращения, происходящие в нем при дуговой обработке, с помощью известных диаграмм [11, 12], полученных для стали 30ХГСА, которая производится и достаточно широко применяется при изготовлении сварных конструкций в Украине и за рубежом.

Однопроходная сварка и первый проход при двухпроходной сварке выполняли способом ATIG со сквозным проплавлением. При втором проходе, выполненном с поперечными колебаниями электрода амплитудой 5...6 мм и частотой 2...3 Гц без наличия активирующего флюса, происходило подплавление металла шва и прилегающих к нему участков основного металла на глубину 1,0...1,5 мм. Сварка выполнялась на следующих режимах:  $I_1 = 130\ldots180$  А (при первом проходе);  $I_2 = 110\ldots160$  А (при втором проходе);  $v_{cb} = 12\ldots17$  м/ч. Сварные соединения



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### Параметры аргонодуговой обработки сварного соединения

| $v_{\text{обр}}$ , м/ч | $I_{\text{обр}}$ , А | Сторона образца | $T_n$ , °C  | Время охлаждения $\tau$ , с |           |           |           | $w_{6-5}$ , °C/с |
|------------------------|----------------------|-----------------|-------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
|                        |                      |                 |             | до 850 °C                   | до 550 °C | до 370 °C | до 150 °C |                  |
| 4,5                    | 55...60              | Л               | 1200...1330 | 15...25                     | 30...50   | 90...120  | 210...280 | 4...6            |
|                        |                      | О               | 1100...1200 | 14...17                     | 20...30   | 60...80   | 140...180 | 10...12          |
| 12,5                   | 80                   | Л               | 950...1100  | 2...6                       | 10...20   | 40...60   | 160...220 | 8...10           |
|                        |                      | О               | 730...910   | ≤ 1...3                     | 8...12    | 20...40   | 110...150 | 20...22          |
| 37,0                   | 100...105            | Л               | 930...1070  | ≤ 1...2                     | 3...6     | 10...25   | 150...200 | 20...24          |
|                        |                      | О               | 500...650   | —                           | —         | —         | 90...140  | —                |
| 80,0                   | 145                  | Л               | 730...900*  | —                           | < 3*      | 3...10*   | 130...170 | 3...10*          |
|                        |                      | О               | 400...500*  | —                           | —         | —         | 70...120  | —                |

Примечания. 1. Л, О — соответственно лицевая и обратная сторона образца. 2. Значения, отмеченные звездочкой, экстраполированы. 3.  $w_{6-5}$  — скорость охлаждения в интервале температур 600...500 °C.

подвергали по всей ширине 1...5-кратной аргонодуговой обработке без подплавления вольфрамовым электродом на токе  $I_{\text{обр}} = 55...145$  А со скоростью обработки  $v_{\text{обр}} = 4,5...80,0$  м/ч при длине дуги 8...9 мм. Электроду придавались поперечные колебания амплитудой 7...9 мм (большей, чем при сварке) и частотой 2...3 и 3...4 Гц соответственно при  $v_{\text{обр}} = 4,5...42,0$  и 80,0 м/ч. О том, что подплавление не произошло, судили по отсутствию металлической ванны, сохранению внешнего вида поверхности соединения, а также по замерам температур термических циклов дополнительных обработок металла на разных режимах (таблица), о чем частично изложено в работе [9].

Макро- и микроструктуру металла сварных соединений исследовали с помощью микроскопа «Нeofот-32» при 25-, 200-, 400- и 1000-кратных увеличениях после травления шлифов в водных растворах надсернокислого аммония, нитала и пикриновой кислоты. Твердость определяли по шкале  $HRC$  при нагрузке 1500 Н с усреднением пяти показаний, микротвердость — твердомером фирмы «Леко» при нагрузках 500 (для идентификации структурных составляющих) и 2000 (для установления зонального ее распределения) мН. Заметим, что при повышенной нагрузке показания усредняются и разброс их значений снижается. Фазовый состав оценивался по объемным изменениям с помощью вакуумного дифференциального дилатометра Шевенара при нагреве образцов размером 3×3×30 мм, вырезанных из металла шва без механической обработки его лицевой поверхности, а также из основного металла в состоянии поставки (после высокого отпуска). Нагрев проводился до температуры 550 °C со скоростью 150 °C/ч, после чего осуществляли выдержку в течение 1 ч и охлаждение на воздухе. Механические испытания сварных соединений проводили по ГОСТ 699-66 при использовании разрывных плоских спланированных с обратной стороны образцов без и с боковыми выборками по шву, а также ударных образцов с круглым надрезом. Изломы исследовали на растровом микроскопе JSM-T200 фирмы «Джеол» при подаче ускоряющего напряжения 25 кВ и прохождении тока зонда, равного 4 нА.

Аргонодуговая обработка характеризовалась кратковременным (несколько минут) термическим циклом, указанным в таблице. Из нее видно, что

температура нагрева  $T_n$  сварного соединения при этой обработке на приведенных режимах существенно ниже температуры плавления 1460...1520 °C, что также свидетельствует об отсутствии подплавления. Лицевая сторона сварного соединения при  $v_{\text{обр}} = 4,5...37,0$  м/ч нагревается заведомо выше температуры  $A_{c_1}$ , при этом происходит полная аустенитизация металла. В случае  $v_{\text{обр}} = 80,0$  м/ч температура нагрева может не достигать  $A_{c_1}$  (735 °C), превышать  $A_{c_3}$  (850 °C) или находиться в интервале  $A_{c_1}...A_{c_3}$ , что обуславливает отсутствие, неполную или полную аустенитизацию, особенно на периферии зон обработки, вдоль которых располагаются чередующиеся участки, образовавшиеся при различных удельных мощностях дуги и продолжительности ее воздействия. С помощью увеличения тока достигается заведомо полная аустенитизация, а благодаря снижению тока ее можно избежать. С обратной стороны сварного соединения температура нагрева и возможность аустенитизации металла определяются скоростью обработки: при  $v_{\text{обр}} = 4,5$  м/ч аустенитизация металла происходит однозначно; при  $v_{\text{обр}} = 12,5$  м/ч — может происходить или не происходить (температура нагрева близка  $A_{c_1}$  и  $A_{c_3}$ ); в случае  $v_{\text{обр}} \geq 37,0$  м/ч — отсутствует. С увеличением скорости обработки существенно уменьшается продолжительность процесса аустенитизации металла.

В зависимости от температуры нагрева и химического состава (в пределах марочного) стали 30ХГСА, согласно диаграммам из [11, 12], значения температур минимальной устойчивости аустенита диффузационному и промежуточному превращениям близки 650 и 550...400 °C, время охлаждения до указанных температур составляет соответственно не менее 3...10 и 2...10 с, а температура начала мартенситного превращения  $M_n = 320...370$  °C достигается в течение 2...15 с. При этом мартенситное превращение практически отсутствует при  $w_{6-5} = 1,5...2,0$  °C/с и менее, но превалирует при  $w_{6-5} \geq 40,0$  °C/с.

Охлаждение при аргонодуговой обработке происходит в 3...40 раз быстрее (в зависимости от скорости обработки), чем при сварке, после выполнения второго прохода с  $w_{6-5} = 1,5...2,5$  и 3,0...5,0 °C/с соответственно с лицевой и обратной

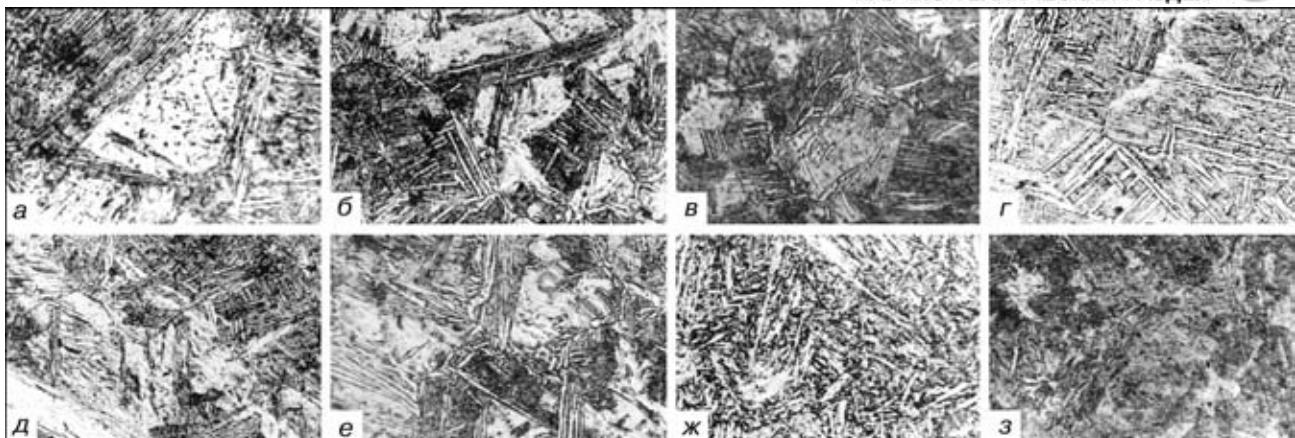


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва с лицевой ( $a\text{--}e$ ) и обратной ( $d\text{--}h$ ) стороны до ( $a, d$ ) и после аргонодуговой обработки со скоростью  $4,5$  ( $b, e$ ),  $12,5$  ( $c, f$ ) и  $37,0$  ( $g, h$ ) м/ч

стороны образца, и при этом формируется структура закалки. Время и скорость охлаждения при обработке таковы (см. таблица), что диффузионное превращение аустенита отсутствует, но возможны следующие превращения: при  $v_{\text{обр}} = 4,5\ldots 12,5$  м/ч — бейнитное; при  $v_{\text{обр}} = 37,0$  м/ч — бейнитное или мартенситное; при  $v_{\text{обр}} = 80,0$  м/ч — преимущественно мартенситное.

Следовательно, при аргонодуговой обработке с нагревом выше температуры  $A_c$  металл лицевой стороны сварного соединения подвергается повторной закалке. С обратной стороны при  $v_{\text{обр}} \leq 12,0$  м/ч она может быть полной или неполной, а при  $v_{\text{обр}} \geq 17,0$  м/ч — отсутствует. Металл, нагреваемый ниже  $A_c$ , подвергается отпуску, максимальная температура которого возрастает с уменьшением скорости обработки.

Время охлаждения лицевой и обратной стороны образца сварного соединения до температуры  $150$  °С, принимаемой за нижнюю границу существенных структурных изменений в металле, составляет соответственно  $130\ldots 280$  и  $70\ldots 180$  с; оно уменьшается с увеличением скорости обработки. При этом время охлаждения от температуры  $320$  °С, когда происходит самоотпуск повторно закалившегося металла, составляет соответственно  $100\ldots 180$  и  $50\ldots 100$  с, а естественное охлаждение до комнатной температуры происходит в течение нескольких минут. Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод, что более полного протекания процессов отпуска и самоотпуска обрабатываемого металла следует ожидать в случае уменьшения скорости обработки.

Микроструктура металла шва и распределения микротвердости в сварном соединении после сварки и аргонодуговой обработки приведены на рис. 1 и 2.

В состоянии после сварки микроструктура металла шва и участка перегрева (УП) ЗТВ представляет собой крупнокристаллическую бейнитно-мартенситную смесь, т. е. является закалочной (рис. 1,  $a, d$ ). По всей толщине шва в микроструктуре металла просматриваются иглы верхнего и нижнего бейнита в светлой матрице мартенсита. Микротвердость  $HV$   $3,8\ldots 5,8$  ГПа металла шва и УП ЗТВ несущественно изменяется по его высоте и имеет большой (2 ГПа) разброс значений. Некоторое уменьшение микротвердости металла УП ЗТВ наблюда-

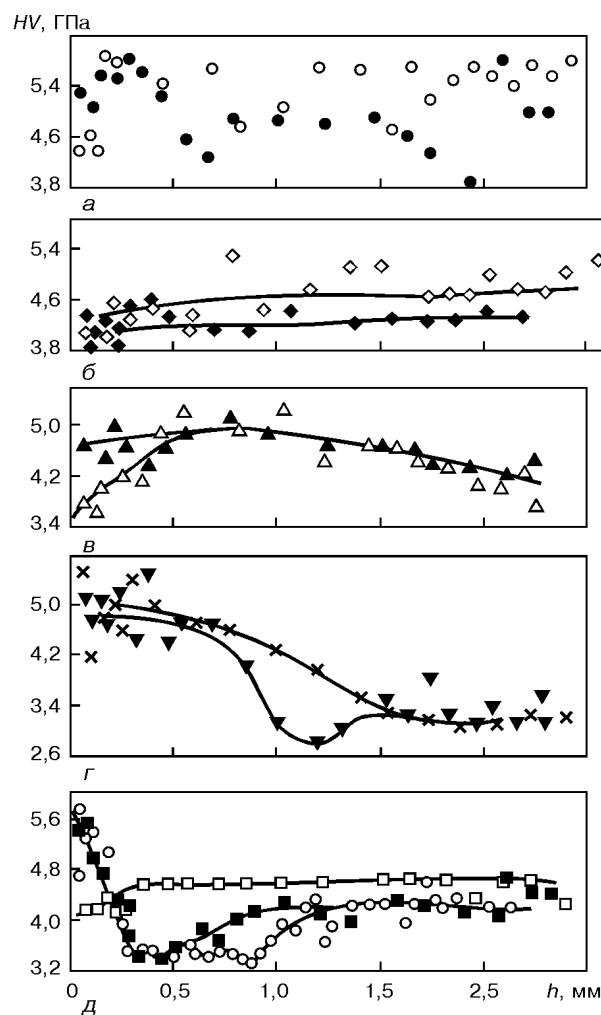


Рис. 2. Распределение микротвердости  $HV$  по высоте  $h$  шва (●, ◆, ▲, ■) и УП ЗТВ (○, □, △, ×, ◇) соединения в состояниях после сварки ( $a$ ) и аргонодуговой обработки со скоростью  $4,5$  ( $b$ ),  $12,5$  ( $c$ ),  $37,0$  ( $d$ ) и  $80,0$  ( $d$ ) м/ч

ется с лицевой стороны образца на глубине до  $0,15$  мм (рис. 2,  $a$ ). Твердость металла шва с лицевой и обратной стороны соответственно составляет  $HRC$   $51,0$  и  $51,9$ , размер аустенитного зерна УП ЗТВ —  $5\ldots 6$  баллов.

После обработки со скоростью  $4,5$  м/ч, сопровождавшейся нагревом всего соединения выше температуры  $A_c$ , микроструктура металла шва и УП

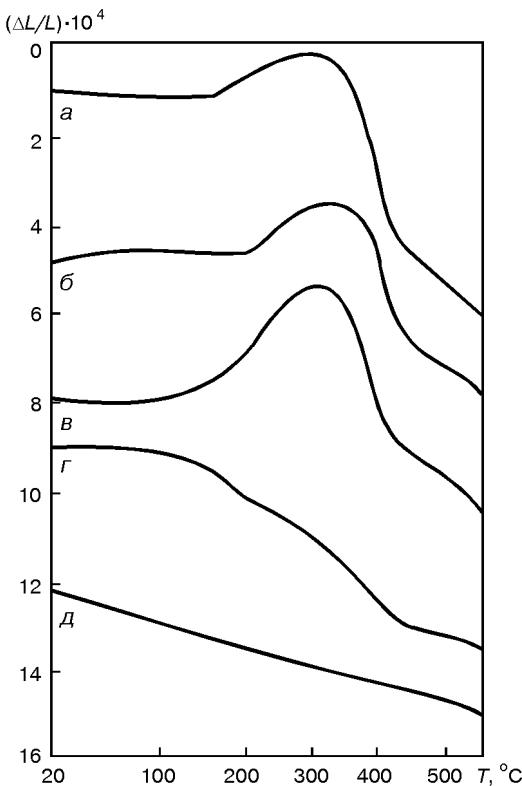


Рис. 3. Дилатограммы металла шва (*а–е*) и отпущенного основного металла (*д*): *а–е* — см. обозначения рис. 1;  $\Delta L/L$  — относительное изменение длины образца

ЗТВ становится измельченной и представляет собой смесь слаботравяющихся участков мартенсита с иглами верхнего бейнита. Микротвердость  $HV$  металла шва по всей высоте равна 3,8...4,6 ГПа, УП ЗТВ с лицевой стороны шва имеет  $HV$  4,0...4,6 ГПа, с обратной —  $HV$  4,6...5,3 ГПа (см. рис. 2, *б*), а твердость шва с лицевой и обратной стороны соответственно равна  $HRC$  39,8 и 42,7, что в целом ниже, чем в состоянии после сварки. Меньшая твердость с лицевой стороны образца обусловлена меньшей скоростью охлаждения при промежуточном превращении аустенита (см. таблицу). Размер аустенитного зерна металла УП ЗТВ имеет тенденцию увеличения до 5 баллов.

После обработки с  $v_{обр} = 12,5$  м/ч микроструктура металла шва и УП ЗТВ имеет вид смеси мартенсита, верхнего и нижнего бейнита (см. рис. 1, *в*, *ж*), который остается в верхней части сварного соединения. При этом количество верхнего бейнита несколько уменьшается, столбчатые кристаллиты измельчены, а дендритная структура металла в результате нагрева преобразовывается в дезориентированную структуру равноосных зерен. В нижней части шва сохраняется крупногольчатость структуры, а в глубокотравяющихся несколько размытых иглах происходит распад, о чем можно судить по возникновению шероховатости, вызванной наличием мелких цементитных частиц. Границы аустенитного зерна УП ЗТВ вытравливаются хуже, его размер составляет 5...6 баллов.

Твердость металла шва, обработанного с  $v_{обр} = 12,5$  м/ч, составляет  $HRC$  48,2 (с лицевой) и 39,4 (с обратной стороны), т. е. понижается по сравнению с исходной (особенно с обратной стороны

образца). Микротвердость металла сварного соединения в целом также уменьшается (см. рис. 2, *в*): в металле шва она равна  $HV$  4,3...5,1 ГПа, в УП ЗТВ —  $HV$  3,5...5,3 ГПа. Наибольшие ее значения отмечаются на глубине 0,5...1,0 мм с постепенным уменьшением в направлении лицевой и обратной поверхностей сварного соединения.

Изменение микроструктуры при сохранении достаточно высокой твердости металла шва с его лицевой стороны вызвано нагревом заведомо выше  $A_{c_3}$  до температур устраниния структурной наследственности [13] с дальнейшей закалкой при охлаждении со скоростью 8...10 °C/c. В металле обратной стороны шва, которая нагревалась до температур, близких  $A_{c_1}$  и  $A_{c_3}$ , изменение его микроструктуры и снижение твердости вызываются резкой интенсификацией процессов отпуска при температурах, близких  $A_{c_1}$ , неполной закалкой из межкритического интервала, повышением температуры  $M_n$  и увеличением времени самоотпуска мартенситной составляющей вследствие повышения температуры начала промежуточного превращения менее стабилизированного аустенита и усиления диффузационного перераспределения в нем углерода.

Последующее увеличение скорости обработки до 37,0 м/ч вызывает измельчение и нарушение игольчатости микроструктуры металла сварного соединения только с лицевой стороны (см. рис. 1, *г*, *з*), где имеет место уменьшение размера аустенитного зерна УП ЗТВ до 7 баллов; микроструктура идентифицируется как смесь мартенсита с нижним бейнитом и небольшим количеством верхнего бейнита. С обратной стороны шва в микроструктуре металла просматриваются серые зернистые иглы верхнего бейнита и отпущенного мартенсита.

Обработанный металл шва приобретает твердость с лицевой стороны  $HRC$  49,9, близкую к исходной в состоянии после сварки, с обратной она составляет  $HRC$  40,6. По высоте сварного шва соединения образуются характерные зоны (см. рис. 2, *г*). Первая зона — повышенной микротвердости  $HV$  4,2...5,4 ГПа — распространяется от лицевой поверхности шва на глубину 0,5...0,8 мм. Вторая зона, где имеет место снижение микротвердости до  $HV$  3,3...3,5 ГПа, располагается на глубине 0,8...1,5 мм; в ее пределах на глубине 1,0...1,3 мм наблюдается провал микротвердости до  $HV$  2,8 ГПа. В третьей зоне — на глубине более 1,5 мм микротвердость изменяется незначительно — в пределах  $HV$  3,1...3,5 ГПа. Следовательно, металл сварного соединения подвергается повторной закалке лишь с лицевой стороны, а с обратной он отпускается. Повышенная (20...24 °C/c) скорость охлаждения повторно закаливающегося металла (см. таблицу) обуславливает относительное увеличение его микротвердости (по сравнению с обработкой при  $v_{обр} = 4,5$  и 12,5 м/ч).

Последующее увеличение скорости обработки сварного соединения до  $v_{обр} = 80,0$  м/ч при полуторакратном повышении тока вызывает уменьшение (до 0,2...0,3 мм) толщины слоя повторно закаливающегося металла сварного соединения в местах пря-



мого воздействия дуги и возрастание его микротвердости до  $HV$  5,3...5,7 ГПа. При этом наблюдается увеличение толщины слоя металла сварного соединения, отпущеного с обратной стороны, и образование провалов микротвердости  $HV$  3,3...3,6 ГПа как в металле шва, так и УП ЗТВ. Эти провалы, по нашему представлению, являются проявлением зонального обезуглероживания металла, нагреваемого до температур, близких  $A_c$ , при межфазном перераспределении углерода. В местах косвенного воздействия дуги на УП ЗТВ, где металл нагревается ниже температур аустенитизации, участки повторной закалки и провала микротвердости отсутствуют, наблюдается только снижение микротвердости металла у поверхности сварного соединения, что является следствием отпуска. Снижения твердости по всей лицевой поверхности сварного соединения можно добиться уменьшением тока и увеличением скорости обработки (последнее менее целесообразно из-за резкого увеличения неравномерности нагрева металла сварного соединения, глубины прогрева и сокращения продолжительности пребывания его в нагретом состоянии). С точки зрения поверхностного упрочнения, допустимо небольшое увеличение тока и снижение скорости обработки для нагрева заведомо выше  $A_c$ .

Проведенные дилатометрические исследования подтверждают факт закалки металла шва после сварки и последующей аргонодуговой обработки с  $v_{\text{обр}} = 4,5$  и  $12,5$  м/ч, что выражается в нарушении монотонности изменения длины образца при нагреве (см. рис. 3, а-в). На дилатограммах фиксируется наличие температурных участков превращения остаточного аустенита в мартенсит с увеличением объема металла. На них накладываются участки карбидного превращения при температуре  $300\ldots400$  °C и участки коагуляции карбидов при температуре  $430\ldots550$  °C. Дилатометрические эффекты превращения остаточного аустенита подтверждают наличие в структуре бейнита.

Аргонодуговая обработка с  $v_{\text{обр}} = 4,5$  и  $12,5$  м/ч увеличивает в металле шва количество остаточного аустенита соответственно на 3,0...3,5 и 7,5 %, а также изменяет температуру начала превращения его в мартенсит соответственно с 170 до 200 и 100 °C. Следует отметить, что при обработке с  $v_{\text{обр}} = 12,5$  м/ч металл шва с обратной стороны подвергается кратковременному отпуску с распадом остаточного аустенита, его количество в повторно закалившемся металле фактически превышает 8 %. Увеличение содержания остаточного аустенита в металле с бейнитно-мартенситной структурой свидетельствует о возрастании доли бейнитной составляющей за счет снижения доли мартенсита [13, 14]. Это подтверждается уменьшением дилатометрического эффекта карбидного превращения.

Как нам представляется, содержание остаточного аустенита после таких обработок увеличивается вследствие снижения устойчивости аустенита по сравнению с аустенитом, сформировавшимся в процессе кристаллизации металла шва, и повышения температуры начала промежуточного превращения. Процесс образования остаточного аустенита стано-

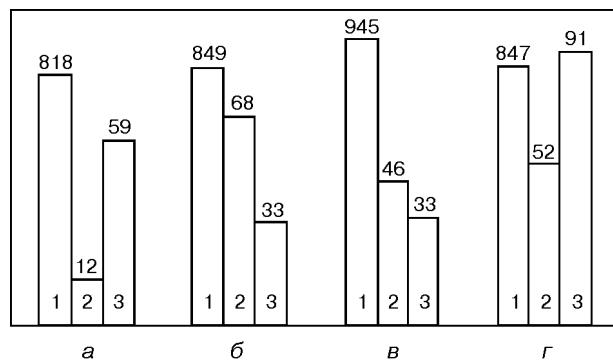


Рис. 4. Механические свойства сварного соединения до и после обработки с  $v_{\text{обр}} = 12,5$  м/ч: 1 —  $\sigma_b^{\text{III}}$  (МПа); 2 —  $a_u^{\text{III}}$  (Дж/см<sup>2</sup>); 3 —  $a_u^{\text{ЗТВ}}$  (Дж/см<sup>2</sup>); а-г — см. обозначения рис. 1

вится более интенсивным с возрастанием скорости обработки с 4,5 до 12,5 м/ч из-за уменьшения температуры нагрева на 230...250 °C и в 4...7 раз времени аустенитизации (см. таблицу). Небольшое повышение доли остаточного аустенита может сопровождаться как дополнительным увеличением в нем содержания углерода, так и повышением его устойчивости; при увеличении доли остаточного аустенита в 2,5...2,7 раза содержание углерода в нем уменьшается, вследствие чего температура начала распада аустенита понижается. Увеличение в закалившемся металле доли пластичных составляющих структуры (бейнита, остаточного аустенита) должно оказывать положительное влияние на повышение пластичности и ударной вязкости сварного соединения высокопрочной стали.

Дилатограмма образца металла шва, обработанного при  $v_{\text{обр}} = 37,0$  м/ч, существенно отличается от описанных выше и во многом подобна дилатограммам отпущеного основного металла (см. рис. 3, г, д). Однако небольшой горизонтальный участок кривой в области температур до 100 °C и ступенька в интервале температур 200...250 °C указывают на присутствие в образце небольшого (около 0,5 %) количества остаточного аустенита. Непосредственно в повторно закаленном металле, толщина слоя которого составляет 1/4...1/3 толщины соединения, содержание остаточного аустенита составляет 1,5...2,0 %. Увеличение на порядок, по сравнению с условиями сварки, скорости охлаждения металла шва (см. таблицу) вызывает снижение температуры промежуточного превращения, уменьшение в 1,5...2,0 раза содержания остаточного аустенита и визуально наблюдаемого верхнего бейнита (см. рис. 1), способствует существенному возрастанию в структуре мартенситно-бейнитной смеси доли мартенситной составляющей [13]. Ослабление процесса бейнитного превращения является предпосылкой для меньшего науглероживания непрекращенной части аустенита, относительного повышения точки  $M_u$  и температуры самоотпуска образуемого мартенсита.

Результаты металлографических и дилатометрических исследований сварных соединений стали 30ХГСА свидетельствуют о том, что при аргонодуговой обработке на различных режимах металл шва и УП ЗТВ претерпевает такие изме-

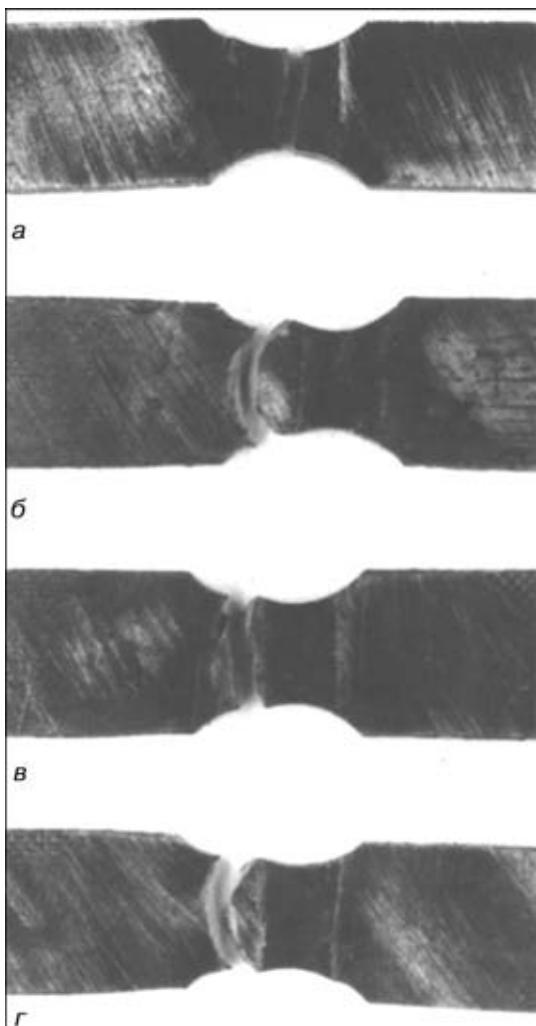


Рис. 5. Сварные образцы после испытаний на разрыв (см. обозначения рис. 1)

нения, вследствие которых возможно улучшение пластичности и ударной вязкости металла.

Результаты механических испытаний сварных соединений в состояниях после сварки и аргонодуговой 1...5-кратной обработки с  $v_{\text{обр}} = 4,5 \dots 80,0 \text{ м/ч}$  приведены на рис. 4 и 5. Высокая прочность закалившегося в процессе сварки металла сварного соединения предопределяет разрыв образцов постоян-

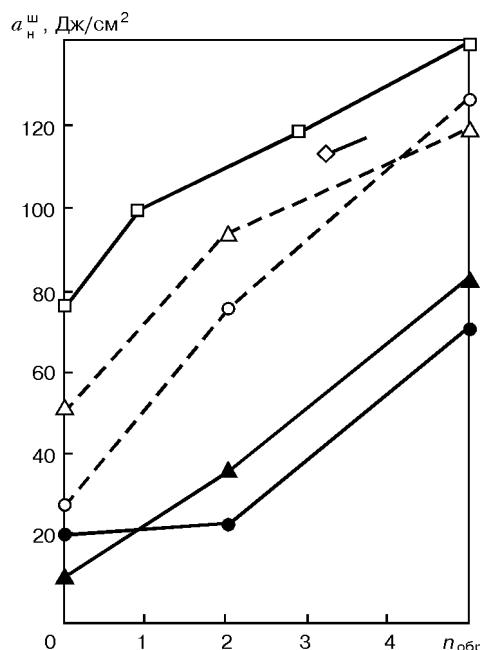


Рис. 6. Влияние кратности  $n_{\text{обр}}$  аргонодуговой обработки с разными скоростями на ударную вязкость  $a_W$  металла одно- ( $\blacktriangle, \bullet$ ) и двухпроходного ( $\square, \diamond, \Delta, \circ$ ) швов:  $\square$  — 42 м/ч;  $\diamond$  — 80,0;  $\Delta, \blacktriangle$  — 6,0;  $\circ, \bullet$  — 17,0 м/ч

ного сечения вне шва по менее прочному основному металлу. Не подвергнутые аргонодуговой обработке образцы с боковыми выборками разрушаются по наименьшему сечению шва с образованием во многих случаях надрывов в металле ЗТВ (см. рис. 4,  $a$ ); при этом  $\sigma_b^w = 760 \dots 818 \text{ МПа}$  (в зависимости от режима сварки). После аргонодуговой обработки на разных режимах разрушение происходит за пределами шва (см. рис. 4,  $b \dots z$ ). Это свидетельствует о более высокой, чем у основного металла, прочности ( $\sigma_b^w > 703 \dots 945 \text{ МПа}$ ) при некотором повышении пластичности, а также о снижении чувствительности металла шва к концентриаторам напряжений.

Ударная вязкость металла сварного соединения закаливающейся стали в состоянии после сварки имеет низкие значения, особенно в центре шва (рис. 5,  $a$  и 6). Она однозначно повышается после аргонодуговой обработки в широких (4,5...80,0 м/ч)

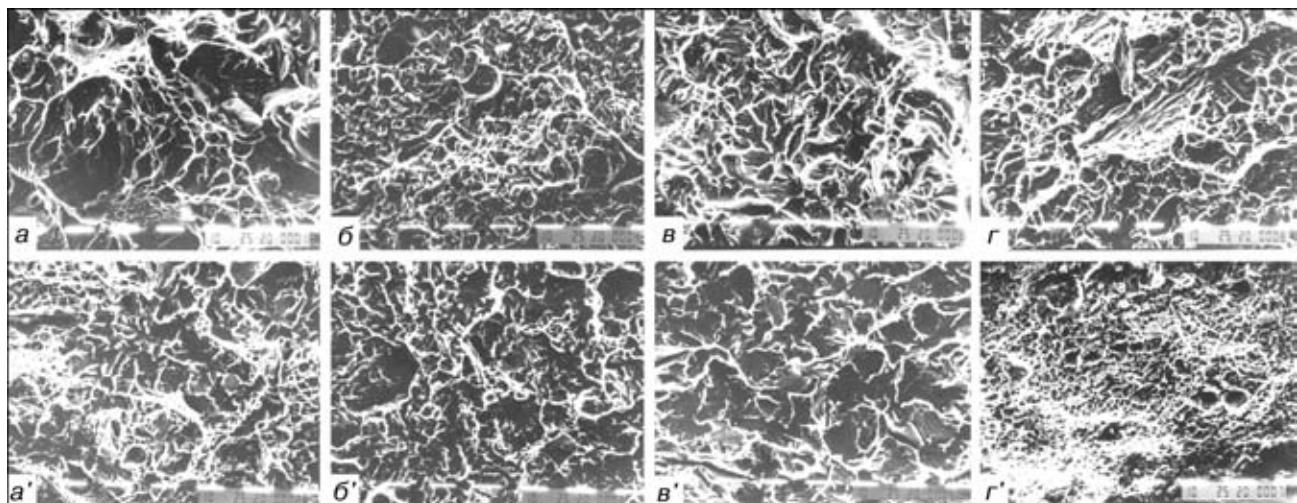


Рис. 7. Фрактограммы излома швов ( $a \dots z$ ) (см. рис. 1) и металла ЗТВ ( $a' \dots z'$ ) при выполнении этих швов



пределах скоростей и возрастает с увеличением их кратности. Обращает внимание то, что при обработке, сопровождающейся отпуском металла ( $v_{\text{обр}} = 37,0 \dots 80,0 \text{ м/ч}$ ), ударная вязкость металла шва имеет высокие значения. Преимущественный отпуск металла УП ЗТВ при  $v_{\text{обр}} = 80,0 \text{ м/ч}$  может быть причиной наибольшего увеличения значений его ударной вязкости.

Положительное влияние аргонодуговой обработки на ударную вязкость хорошо согласуется с результатами фрактографических исследований мест разрушений (рис. 7). Если в состоянии после сварки поверхность разрушения шва крупнокристаллическая с редкими отдельными зонами вязкого разрушения, то после аргонодуговой обработки размеры кристаллитов уменьшаются, а участков пластической деформации становится значительно больше. После аргонодуговой обработки с  $v_{\text{обр}} = 12,5$  и  $37,0 \text{ м/ч}$  на поверхностях разрушения выявляется много фасеток, имеющих вязкий характер разрушения.

Увеличение ударной вязкости и пластичности металла сварного соединения закалившаяся стали косвенно свидетельствуют об уменьшении структурных напряжений и возможности повышения стойкости против образования холодных трещин. Сохранение при этом высокой прочности обеспечивает улучшение несущей способности сварного соединения и повышение его работоспособности при циклических нагрузлениях.

## Заключение

При аргонодуговой обработке без подплавления закалившийся в процессе сварки металл сварного соединения претерпевает повторную закалку в местах нагрева до температуры аустенитизации и отпуск в менее нагретых местах. Характер и полнота превращений, образование и размеры зон повторной закалки и отпуска регулируются током и скоростью обработки. Она позволяет измельчать и преобразовывать структуру металла из литой в зернистую, изменять ее фазовый состав, регулировать твердость различных участков сварного соединения закалившейся стали. С помощью аргонодуговой обработки можно повышать пластичность и удар-

ную вязкость, улучшать характер разрушения, уменьшать чувствительность к концентраторам напряжений при сохранении достаточно высокой прочности соединений. Для повышения положительного эффекта аргонодуговой обработки целесообразно увеличение ее кратности. Можно полагать, что местная обработка дугой, особенно в режиме преимущественного отпуска, позволит упростить, а также частично или полностью исключить проведение промежуточного или последующего печных отпусков.

1. Козлов Р. А. О свариваемости теплоустойчивых сталей // Свароч. пр-во. — 1979. — № 2. — С. 12–15.
2. Макаров Э. А. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
3. Бурский Г. В., Савицкий М. М., Новикова Д. П. Сопротивляемость ЗТВ сварных соединений закаливающихся высокопрочных сталей замедленному разрушению при двухдуговой сварке // Автомат. сварка. — 1998. — № 2. — С. 12–15.
4. Винокуров В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. — М.: Машиностроение, 1968. — 215 с.
5. А. с. 1792035 СССР, МКИ' В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / А. С. Павлов, В. И. Захаров, И. В. Скоробогатов, В. А. Конин. — Опубл. 1996, Бюл. № 7.
6. Аргонодуговая обработка — резерв снижения металлоемкости сварных конструкций / А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко, И. Х. Френкель, И. Л. Корень // Автомат. сварка. — 1980. — № 6. — С. 69–70.
7. Бондаренко Л. И., Пузрин Л. Г. Аргонодуговая поверхностная закалка как средство упрочнения артиллерийских стволов // Там же. — 2000. — № 2. — С. 36–38.
8. Исследование дуговой обработки сварных соединений высокопрочной стали / В. М. Кулик, М. М. Савицкий, Д. П. Новикова, Г. Н. Гордань // Там же. — 1999. — № 5. — С. 19–24.
9. Кулик В. М., Бурский Г. В., Савицкий М. М. Особенности дуговой обработки закаливающихся сталей без расплавления // Там же. — 2000. — № 5. — С. 31–35.
10. Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 1978. — 276 с.
11. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: Справочник. — М.: Металлургия, 1965. — 495 с.
12. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: Атлас. — М.: Наука, 1972. — 220 с.
13. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд.: В 3 т. Т. 2. Основы термической обработки / Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Раухтадта. — М.: Металлургия, 1983. — 368 с.
14. Попов А. А. Фазовые превращения в металлических сплавах. — М.: Металлургиздат, 1963. — 311 с.

Effect of parameters of conditions and thermal cycle of a local arc treatment without melting on changing the metal structure and mechanical properties of the high-strength steel welded joint was studied. It is shown that the arc heating within the wide ranges of treatment rate up to the temperatures of austenization of the welded joint metal, being hardened during welding, causes the repeated hardening, while at the temperatures below the austenization temperatures a short-time tempering is occurred. After the local arc treatment the ductility and impact strength of the welded joint metal are increased, the mode of fracture is improved, the sensitivity to stress raisers is decreased.

Поступила в редакцию 10.07.2000,  
в окончательном варианте 27.10.2000



# АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Н. П. НЕСТЕРЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
И. К. СЕНЧЕНКОВ, д-р физ.-мат. наук (Ин-т механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины)

Предложены классификация и систематизированный подход к выбору пластинчатых волноводов-инструментов для ультразвуковой сварки полимеров и композитов на их основе. Рассмотрены известные и предложены новые типы длинноконтурных инструментов.

**Ключевые слова:** ультразвуковая сварка, полимеры и композиты на их основе, пластинчатые волноводы-инструменты, форма колебаний, классификация

Ультразвуковые колебания, широко используемые в технике, медицине и других областях, характеризуются низкой частотой и высокой мощностью [1, 2]. Схема возбуждения механических колебаний в типичных технологических установках для ультразвуковой сварки (УЗС) приведена на рис. 1. Генератор 1 преобразует электрические колебания стандартной частоты в высокочастотные (20...40 кГц). Преобразователь 2, содержащий пьезоактивные компоненты, трансформирует эти электрические колебания в механические. Бустер 3 и волновод-инструмент (сонотрод) 4 являются пассивными резонансными элементами системы и служат для передачи волновой энергии от преобразователя к объекту технологии — свариваемым деталям 5. Одновременно они выполняют функции усиления амплитуды колебаний и согласования подсистемы генератор — преобразователь с нагрузкой [1].

В установках для УЗС [3] бустеры являются достаточно универсальными элементами. Они имеют форму полуволновых ступенчатых концентраторов. Серийные установки для прессовой УЗС обычно комплектуются набором бустеров с различными коэффициентами трансформации перемещений.

Конфигурации сонотролов определяемые формой сварных швов в конкретных деталях, отличаются многообразием, обусловленным обширной номенклатурой свариваемых изделий. Каждое новое изделие, как правило, требует разработки нового сонотрода. К этим элементам предъявляются два основных требования: наличие резонанса на определенной частоте; резонансная мода движения в зависимости от способа ввода колебаний в изделие должна характеризоваться однородным распределением нормальной или касательной составляющей перемещений на рабочей поверхности. К дополнительным требованиям относятся следующие: заданный коэффициент усиления перемещений, циклическая прочность, отстройка от паразитных частот, низкий уровень виброразогрева и т. п.

Задача проектирования состоит в том, чтобы по заданной форме сварного шва определить конфи-

гурацию сонотрода, обеспечивающую выполнение указанных требований. Решение этой задачи существенно облегчается при наличии достаточно представительной и систематизированной базы эталонных конфигураций, обладающих заданными частотно-модальными характеристиками.

Анализ литературных источников [1, 3, 4] показывает, что многообразные пассивные резонансные элементы акустических систем технологического назначения можно сгруппировать в несколько классов. Принадлежность элементов к тому или иному классу определяется возможностью интерпретации реализующихся в них движений с помощью определенных участков кривых резонансного спектра некоторого тела конечных размеров [5]. Оказывается, что достаточно полный набор движений можно сформировать на основе спектров симметричных мод колебаний прямоугольника.

Позитивный эффект классификации сонотролов обусловливается двумя обстоятельствами. Во-первых, хорошо изученные и систематизированные типы движений в прямоугольнике и цилиндре помогают понять характер движения в элементах и наметить пути их частотно-модального контроля. Во-вторых, содержащаяся в спектрах информация позволяет привлечь к практическому использованию некоторые обладающие полезными свойствами моды колебаний. Формированию системы базовых

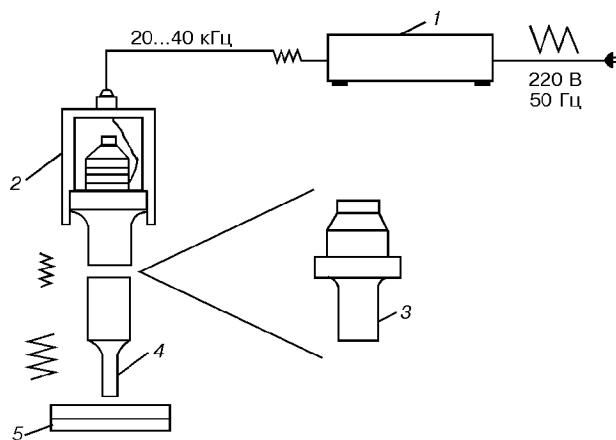


Рис. 1. Схема акустической системы для УЗС полимеров и композитов на их основе (обозначения см. в тексте)

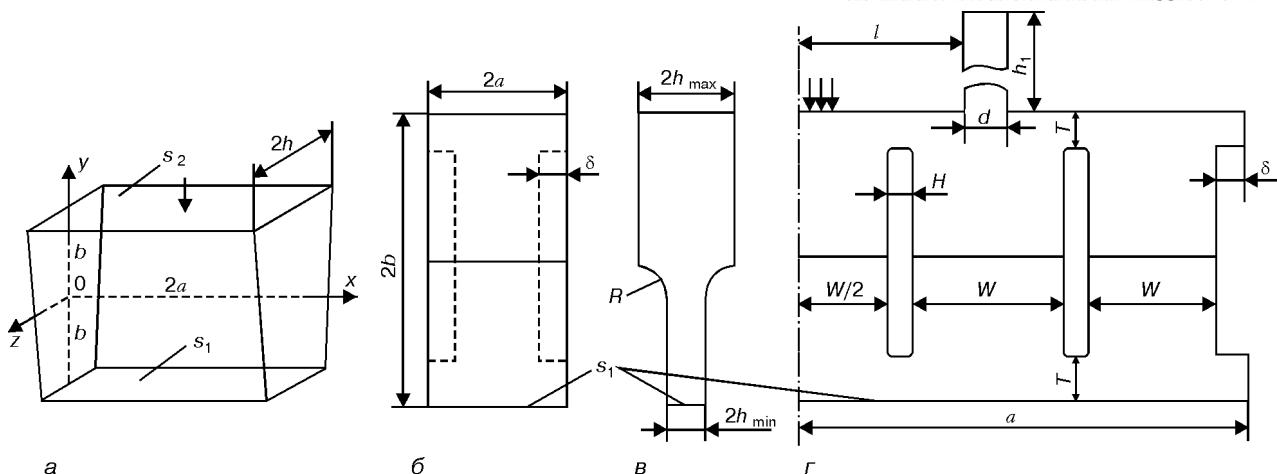


Рис. 2. Формы сплошных (а–с) и щелевых (д) пластинчатых сонотродов

конфигураций пластинчатых сонотродов, а также их классификации и посвящена данная работа.

Для пластинчатых сонотродов (рис. 2) предполагается, что характерный толщинный размер (в направлении оси  $0z$ ) существенно меньше размеров в плане и одновременно меньше характерной длины волны  $\lambda$ . Поскольку на ранних этапах развития ультразвуковой техники акустические системы синтезировались из стержневых элементов, то в качестве  $\lambda$  принято использовать длину продольной волны в тонком стержне для некоторой частоты  $f$ :  $\lambda = (E/\rho)^{1/2}/f$ , где  $E$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность материала.

Задача проектирования сонотрода конкретизируется следующим образом: по заданным значениям длины излучающей кромки (длина сварного шва), резонансной частоты  $f_r$ , коэффициента усиления  $k_i$  нормальных перемещений от некоторой точки  $A$  на  $S_2$  к точке  $B$  на  $S_1$  и коэффициента однородности  $k_h$  (для  $S_1$ ), равных

$$k_i = |u_{yB}/u_{yA}|, \quad k_h = u_{y \min}/u_{y \max}, \quad (1)$$

определить оставшиеся геометрические параметры.

Рассмотрим основные типы пластинчатых сонотродов и методы их модального контроля. Элементы в форме одно связных пластин переменного сечения (рис. 2, б, в) при  $2a \leq \lambda/3$  и при  $2a \geq \lambda/3$  обеспечивают квазипоршневое с однородностью  $k_h \geq 0,8$  и усилением  $k_i \approx h_{\max}/h_{\min}$  перемещение рабочей кромки  $S_1$ . Коэффициент  $k_h$  быстро уменьшается при  $2a \leq \lambda/3$ , а при  $2a \geq \lambda/2$  появляются две узловые точки распределения  $u_y$  на кромке  $S_1$ . Однако боковые выемки, показанные штриховыми линиями на рис. 2, б, позволяют повысить степень однородности до  $k_h \geq 0,95$  для  $\lambda/3 \leq 2a \leq \lambda/2$  при незначительном (менее 3...4 %) изменении резонансной частоты. Возможности указанного метода быстро исчерпываются при дальнейшем увеличении ширины. В более протяженных ( $2a > \lambda/2$ ) элементах планарные моды колебаний с квазипоршневым распределением  $u_y$  на поверхности  $S_1$  формируются с помощью ряда узких щелей (рис. 2, д), перпендикулярных излучающей кромке [4, 6]. Этим достигается декомпозиция продольных и поперечных планарных движений, а искомая мода формируется из синфазных продольных (обычно полуволновых) мод ансамбля межщелевых сегментов шириной  $W \leq$

$\leq \lambda/3$ , т. е. по существу является мультипродольной. Такие формы имеют достаточно высокий для технологических приложений уровень однородности распределения перемещений  $u_y$  на поверхности  $S_1$ . Влияние параметров  $W$ ,  $S$ ,  $T$  и  $\delta$  на модальные характеристики достаточно сложное. Результаты численного и экспериментального исследований позволили установить, что для каждой конфигурации пластины существуют оптимальные значения указанных параметров, которые максимизируют коэффициент  $k_h$ . Эти значения изменяются в следующих пределах:

$$W \approx \lambda/5... \lambda/4, \quad H \approx \lambda/24, \quad T \approx \lambda/12... \lambda/9.$$

Для пластин длиной  $\lambda/2 < 2a < 3\lambda/2$  однородность распределения перемещений может быть повышена с помощью боковых выемок ( $\delta > 0$ ) или выступов ( $\delta < 0$ ). Описанные выше методы при  $2a > 3\lambda/2$  недостаточны. Повысить значение  $k_h$  позволяет метод дополнительных малых колебательных систем (ДМКС) [6]. Сущность его заключается в присоединении к верхней (нерабочей) кромке сонотрода малых колебательных систем, например стержней, которые повышают однородность распределения  $u_y$  на рабочей кромке  $S_1$ . Обычно длина стержня изменяется в пределах  $\lambda/4 < h_1 < \lambda/2$ . Параметры и расположение стержней являются предметом задачи оптимизации по критерию максимума  $k_h$  [7].

Вместе с тем возможности щелевых волноводов ограничены. Во-первых, при  $2a > 2\lambda$  техника ДМКС становится очень сложной как в методологическом, так и вычислительном аспектах. Во-вторых, щели понижают изгибную жесткость элемента, что существенно уплотняет спектр паразитных планарных изгибных мод в окрестности частоты мультипродольной (рабочей) моды. В-третьих, наличие щелей вызывает концентрацию напряжений и является основной причиной усталостного разрушения таких элементов.

Принципиально новый класс протяженных сонотродов предложен в [8]. В этих элементах резонансное движение с квазипоршневым перемещением на их длинных сторонах формируется на основе симметричной моды толщинного резонанса бесконечного слоя. Как и в случае щелевых элементов,

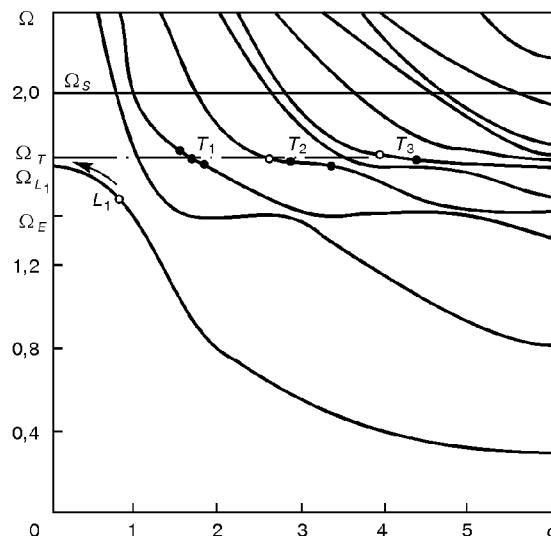


Рис. 3. Характерные участки ветвей частотного спектра симметричных мод

установлена возможность существенного повышения однородности перемещений на длинных кромках методом ДМКС. Конкретизация геометрии сонотрода может рассматриваться как задача оптимального многокритериального проектирования. Развитию этого направления посвящены работы [9, 10].

Типы колебаний в рассмотренных сонотродах могут быть соотнесены с модами колебаний, отвечающими определенным участкам ветвей резонансного спектра симметричных колебаний прямоугольника со сторонами  $|x| \leq a$ ,  $|y| \leq b$  в условиях плоского напряженного состояния. Такой спектр для коэффициента Пуассона  $\nu = 0,34$  приведен на рис. 3. Здесь  $\Omega$  — безразмерная частота, равная  $2\omega b / (\pi C_2)$ ;  $\omega$  — круговая частота колебаний;  $C_2$  — скорость сдвиговой волны, равная  $\sqrt{G/\rho}$ ;  $G$  — модуль сдвига;  $c = a/b$ .

В рассматриваемой частотной области (рис. 3) можно выделить четыре характерные частоты. Для участка  $L_1$  частота  $\Omega_{L_1} = \sqrt{2(1 + \nu)} \approx 1,63$ , что соответствует полуволновому резонансу стержня. Анализ показывает, что распределения резонансных перемещений и напряжений в полуволновых и волновых пластинчатых сонотродах (см. рис. 2, б, в) идентичны модам на участках  $L_1$  и  $L_2$  первых двух ветвей спектра прямоугольника. Эти же участки кривых являются основой формирования мультипродольных мод в пластинчатых и кубообразных щелевых сонотродах. Частота  $\Omega_E \approx 1,43$  серии нижних плато отвечает краевой моде, характеризующейся локализацией кинематических и динамических параметров в окрестности угловых точек [5]. Краевые моды в пластинчатых сонотродах пока не нашли применения. Четвертая частота  $\Omega_T = \sqrt{2(1 - \nu)(1 - 2\nu)} \approx 1,73$  — это частота второй серии плато  $T_1, T_2, \dots$ , вдоль которых реализуется квазитолщинная мода колебаний. Характерные особенности этой моды позволяют создать сонотробы большой протяженности с безузловым распределением нормальных перемещений на рабочей поверхности. Так, центру плато  $T_1$  отвечает значение  $c = 1,5$ ,

#### Типы пластинчатых сонотролов

| Тип колебания | Тип сонотрода              | Конфигурация |
|---------------|----------------------------|--------------|
| $L$           | $L_k$                      |              |
|               | $pmL_k^{(\alpha)}$         |              |
|               | $pmL_k^{(\alpha) (\beta)}$ |              |
| $T$           | $T_k^{(\alpha)}$           |              |
| $B$           | $pB_k$                     |              |

$T_2 = 2,9$ , а  $T_3 = 4,0$ . При этом, например, выражение  $2a \geq 2\lambda$  соответствует плато  $T_3$ . Однако с увеличением номера плато спектр сгущается, что усложняет отстройку от лежащих рядом толщинно-сдвиговых и изгибных мод. Наиболее привлекательным с этой точки зрения выглядит второе плато  $T_2$ .

Элементы на изгибных модах используются для тангенциального ввода колебаний в нагрузку в случае неэффективности нормального ввода, например, при УЗС металлов или тонких пленок [11, 12].

Основываясь на модальном критерии и учитывая приведенные выше рассуждения, можно предложить классификацию и маркировку сонотролов, которые представлены в таблице. Тип элемента определяется модой движения — продольной (мультипродольной), толщинной или изгибной и обозначается соответственно буквами  $L$ ,  $T$  и  $B$ . Нижний индекс резервируется за номером ветви или плато



частотного спектра. Для продольных мод он показывает количество полуволн, которые укладываются по высоте элемента. Щелевые сонотроды на мультипродольной моде идентифицируются как  $pmL_k$ . Буква  $p$  указывает на то, что эти элементы ограничены плоскими поверхностями. Количественная информация об их длине, определяющей размер сварного шва, дается верхними индексами.

Пластинчатые элементы толщиной  $2h_{\max} \leq \lambda/2$  имеют один ряд щелей, и для них используется один индекс  $\alpha$ , который определяет количество полуволн, содержащихся в длине элемента  $\alpha = 2a/(\lambda/2)$ . Кубообразные тела с  $2h_{\max} \geq \lambda/2$  имеют две серии пересекающихся щелей. Для конкретизации их толщинного размера используется второй верхний индекс  $\beta = 2h_{\max}/(\lambda/2)$ . При этом элемент ориентируется таким образом, чтобы выполнялось неравенство  $\alpha \geq \beta$ .

Для полноты классификации определим сонотроды типа  $S$  с характеристиками толщинно-сдвигового резонансного слоя. Подобные движения реализуются в центральных частях третьей серии пластина, которая формируется в окрестности частоты  $\Omega_S = 2,0$  при  $c \geq 10$ . Для  $S$ -моды характерно преобладание касательной компоненты движения на длинных гранях прямоугольника. Это качество оказывается полезным при длинноконтурной сварке жестких или тонколистовых изделий. Отметим, что эта часть спектра изучена недостаточно.

Приведенная выше классификация призвана упростить первый этап проектирования сонотрода — определения его типа и базовой конфигурации. Сущность второго этапа заключается в ее модификации с целью удовлетворения комплексу частотно-модальных ограничений. Он содержит значения резонансной частоты  $f_r$ , интервалы ее отстройки  $\Delta f^+$  и  $\Delta f^-$ , коэффициенты  $k_i$ ,  $k_h$  и т. п. Наконец, третий этап включает оценку усталостной прочности и температуры диссипативного разогрева сонотрода. Выполнение последних двух этапов предусматривает использование методов численного моделирования.

Сонотроды функционируют в режиме интенсивных колебаний. Поэтому в общей математической модели процесса необходимо учитывать физическую нелинейность материала, вибрационный разогрев и зависимость свойств материала от температуры. Постановка задачи для пластинчатых (в плоскости  $xOy$ ) тел переменной толщины  $h = h(x, y)$  дана в [13, 14]. Она включает уравнения механики и термодинамики:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ij,j}^* + \omega^2 \rho^* \tilde{u}_i^* &= 0, \quad \tilde{\varepsilon}_{ij}^* = \frac{1}{2} (\tilde{u}_{i,j}^* + \tilde{u}_{j,i}^*), \\ \tilde{\sigma}_{ij}^* &= 2\tilde{G}^* \left( \tilde{\varepsilon}_{ij}^* + \frac{\tilde{\nu}}{1-2\tilde{\nu}} \tilde{\varepsilon}_{kk}^* \delta_{ij} \right), \quad i, j, k = x, y, \\ c_v^* \dot{\theta}_{,i} &= (k^* \theta_{,i})_j - 2\hat{\alpha}_1 (\theta - \theta_c) + D^*, \quad D^* = \frac{\omega}{2} (\tilde{\sigma}_{ij}^* \tilde{\varepsilon}_{ij}^* - \tilde{\sigma}_{ij}^* \tilde{\varepsilon}_{ij}^*), \end{aligned} \quad (2)$$

границные условия

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ij}^* n_j &= \tilde{f}_i^* \text{ на } l \\ -k^* \theta_{,i} n_i &= \alpha_2^* (\theta - \theta_c) \end{aligned} \quad (3)$$

и начальное условие

$$\theta = \theta_0 \text{ при } t = 0. \quad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{G}^* &= h\tilde{G}, \quad \rho^* = h\rho, \quad k^* = hk, \\ c_v^* &= hc_v, \quad \tilde{f}_i^* = h\tilde{f}_i, \quad \hat{\alpha}_1 = \alpha_1 (1 + h_{,x}^2 + h_{,y}^2)^{1/2}, \\ \tilde{\varepsilon}_{ij}^* &= \frac{\tilde{\nu}}{1+\tilde{\nu}} \frac{(1-\tilde{\Delta})}{(1-2\tilde{\Delta})}; \quad \tilde{\Delta} = \frac{\rho h^2 \tilde{\nu} \omega^2}{24(1-\tilde{\nu})\tilde{G}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Причем  $\tilde{G}$  и  $\tilde{\nu}$  — комплексные модули сдвига и коэффициент Пуассона, равные  $\tilde{G} = G' + iG''$ ;  $\tilde{\nu} = \nu' - \nu''$ ;  $\tilde{u}_i$ ,  $\tilde{\sigma}_{ij}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_{ij}$  — амплитуды компонент вектора перемещений, тензоров напряжений и деформаций;  $k$ ,  $c_v$  — коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи;  $\tilde{f}_i$  — амплитуда компонент вектора напряжений на контуре  $l$ ;  $\theta_0$  — начальная температура;  $\theta_c$  — температура окружающей среды;  $\theta_{,x} = \partial\theta/\partial x$ ,  $\dot{\theta} = \partial\theta/\partial t$ .

Физическая нелинейность описывается зависимостью модуля сдвига от интенсивности амплитуд напряжений

$$\begin{aligned} \tilde{G} &= \tilde{G}(\omega, \theta, \sigma_u), \\ \sigma_u &= \frac{1}{2^{-1/2}} (|\tilde{\sigma}_{xx}|^2 + |\tilde{\sigma}_{yy}|^2 + |\tilde{\sigma}_{xy}|^2 + 6|\tilde{\sigma}_{xy}|^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

Задача решается итерационным методом переменных параметров упругости в сочетании с методом конечных элементов [14, 15]. Уравнения колебаний и теплопроводности, дискретизированные с помощью указанного подхода, приводятся к системам линейных алгебраических уравнений

$$(\tilde{C} - \omega^2 M) \tilde{U} = \tilde{F}, \quad \chi \dot{\tilde{Q}} = -\xi \tilde{Q} + \tilde{D}. \quad (6)$$

Здесь  $\tilde{C}$ ,  $M$  — матрицы жесткости и масс;  $\tilde{U}$ ,  $\tilde{Q}$  — векторы узловых перемещений и температуры;  $\chi$ ,  $\xi$  — матрицы теплоемкости и теплопроводности;  $\tilde{F}$ ,  $\tilde{D}$  — векторы возбуждающих сил и тепловых поступлений. Уравнение теплопроводности интегриру-

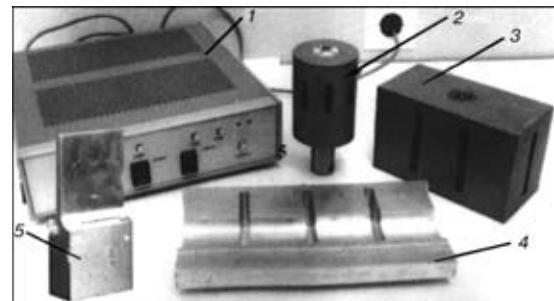


Рис. 4. Общий вид ультразвукового генератора (1), пьезопреобразователя (2), волноводов (3–5)



ется методом конечных разностей по времени. Диссипация энергии учитывается в тепловом источнике  $D$ .

В расчетах, связанных с частотно-модальными характеристиками, можно ограничиться линейно-упругим изотермическим приближением уравнений (2)–(4). При исследовании виброразогрева и усталостной прочности необходимо решать задачу в общей постановке.

Для выбора рациональной конфигурации используется метод проб и ошибок. В ряде случаев удается реализовать оптимизационные процедуры [9, 10]. Роль методов оптимального проектирования возрастает при расчете длинноконтурных, многоступенчатых и существенно трехмерных сонотродов [16], обладающих высокой структурной чувствительностью. Однако их практическое применение сдерживается необходимостью мощных компьютеров и нетехнологичностью получаемых конфигураций. Рабочие частоты указанных элементов лежат в плотном спектре, поэтому основная задача, решаемая на этапе конкретизации их геометрии, состоит в отстройке от паразитных частот. Для ее успешного решения необходимо достичь четких представлений о том, как изменение геометрии тела влияет на частоты рабочей и смежных паразитных мод.

В целом же проблема проектирования выходит за рамки расчета сонотрода как изолированного элемента системы. Подобная идеализация приемлема лишь для расчета его собственных характеристик и холостых режимов. Амплитуды и фазы перемещений, деформаций и напряжений в технологическом цикле определяются такими факторами, как взаимодействие с изменяющейся во времени нагрузкой, ширина полосы и тип автоподстройки частоты возбуждающего генератора и др. Эти факторы являются определяющими при оценке усталостной прочности и виброразогрева элементов.

На основе приведенного подхода в Институте электросварки и Институте механики НАН Украины были спроектированы и изготовлены ультразвуковой генератор (рис. 4), пьезопреобразователь и ряд сонотролов для УЗС конкретных изделий из полимеров и композитов на их основе. В соответствии с предложенной схемой сонотролы (в порядке слева направо) относятся соответственно к следующим классам:  $L_1$ ,  $pmL_1^{(2,3)}$  и  $pmL_1^{(1,35), (0,70)}$ .

Круг очерченных выше вопросов изучен еще недостаточно. Их исследование и определит, по-видимому, направление работ в данной области на ближайшую перспективу.

## Выводы

1. Многообразные сонотролы, которые используются в технологических установках для УЗС полимеров и композитов на их основе, можно классифи-

цировать по модальному принципу. Типы реализуемых в них движений — продольные, толщинные и т. п. — могут быть соотнесены с характерными участками ветвей частотных спектров прямоугольника. По расположению этих участков относительно частоты краевого резонанса типы сонотролов определяются как низко- и высокочастотные.

2. Предложена маркировка пластинчатых сонотролов, отражающая тип движений, волновые размежевы, а также типы конвертируемых или распределляемых мод. Выделены основные этапы проектирования сонотролов: определение типа и базовой конфигурации; ее модификация в соответствии с комплексом частотно-модальных ограничений; оценка усталостной прочности и виброразогрева.

1. Теймин И. И. Ультразвуковые колебательные системы. — М.: Машгиз, 1959. — 332 с.
2. Физика и техника мощного ультразвука: В 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии // Под ред. Л. Д. Розенберга. — М.: Наука, 1970. — 668 с.
3. Болков С. С., Орлов Ю. Н., Черняк Б. Я. Сварка пластин ультразвуком. — М.: Химия, 1974. — 364 с.
4. Andoh E., Kagawa Y. Finite element simulation of a ultrasonic vibrator for plastic welding // Proc. of IEEE Ultrasonic symp. — San-Francisco, 1985. — Р. 563.
5. Гринченко В. Т., Мелешко В. В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. — Киев: Наук. думка, 1981. — 284 с.
6. Adachi R., Ucha S. Modal vibration control of large ultrasonic tool with the use of wave-trapped horns // J. Acoust. Soc. Jap. — 1990. — **87**, № 1. — Р. 208–214.
7. Жук Я. А. Модальный контроль планарных колебаний многосвязных пластин // Тр. XVIII науч. конф. молодых ученых Ин-та механики АН Украины (Киев, 18–21 мая 1993 г.). — Киев, 1993. — Ч. 2. — С. 44–48. — Деп. в ГНТБ Украины 16.08.93, № 1765-У93.
8. Жук Я. А., Козлов В. И., Сенченков И. К. Новый класс волноводов, применяемых при ультразвуковой сварке пластмасс // Акуст. журн. — 1996. — **42**, № 4. — С. 517–521.
9. Богомолов С. И., Симпсон Э. А. Оптимальное проектирование концентраторов ультразвуковых колебаний // Там же. — 1981. — **27**, № 4. — С. 491–499.
10. Симпсон Э. А. Многокритериальные задачи оптимизации механической части ультразвуковых установок // Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 222–230.
11. Силин Л. Л., Баландин Г. Ф., Коган М. Г. Ультразвуковая сварка. — М.: Машгиз, 1962. — 252 с.
12. Меркулов Л. Г. Теория ультразвуковых концентраторов // Акуст. журн. — 1959. — **3**, № 3. — С. 230–238.
13. О возможностях уточненного метода расчета планарных колебаний пластинчатых тел / И. К. Сенченков, Е. И. Бессапова, В. И. Козлов, С. Н. Якименко // Прикл. механика. — 1991. — **27**, № 11. — С. 69–77.
14. К расчету планарных колебаний и виброразогрева пластин переменной толщины / И. К. Сенченков, В. И. Козлов, С. Н. Якименко, Н. П. Нестеренко // Там же. — 1992. — **28**, № 5. — С. 64–69.
15. Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5 т. Т. 1. Термоупругость / И. К. Мотовиловец, В. И. Козлов. — Киев: Наук. думка, 1987. — 264 с.
16. Shuju L., Fucheng Z., Xiaonk G. Three dimensional coupled vibrations of block like resonators // Acta Acoust. — 1991. — **16**, № 2. — Р. 91–97.

A classification and systematized approach to selection of the plate wave-guides used as tools for ultrasonic welding of polymers and composites on their basis have been proposed. The known types of long-contour tools have been considered and new types have been suggested.

Поступила в редакцию 25.07.2000



УДК 621.793.7

# ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ С ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Ю. А. ХАРЛАМОВ, д-р техн. наук (Вост.-укр. нац. ун-т, г. Луганск),

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

Проанализированы современные представления о роли параметров микрорельефа поверхности основы в формировании газотермических покрытий. На основе анализа экспериментальных данных предложена аналитическая модель для выбора оптимальных параметров микрорельефа напыляемых поверхностей.

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, струйно-абразивная обработка, поверхность, абразив, рельеф, напыляемая частица, сцепление

Технология газотермического напыления покрытий (ГТНП) включает три основных этапа: подготовку поверхности напыляемого изделия, напыление и обработку напыленного покрытия. Одной из важнейших характеристик качества покрытий является прочность сцепления с основным материалом изделия, высокий уровень которой достигается не только при оптимальных условиях напыления, но и за счет соответствующей подготовки напыляемой поверхности (удаление загрязнений и активация поверхности основы для устранения барьеров, препятствующих контакту напыляемых частиц и поверхностного слоя основы). Основные технологические приемы активации связаны с получением шероховатого микрорельефа поверхности основы, ее деформированием для создания напряженного состояния и предварительным нагревом. Наиболее часто применяют струйно-абразивную обработку (САО) — самую простую и экономичную при подготовке поверхностей как простой, так и сложной формы. Шероховатость поверхности основы влияет на прочность сцепления посредством изменения интенсивности физико-химического взаимодействия контактирующих материалов частицы и основы. Обычно это связывают с изменением схемы напряженного состояния поверхностного слоя, лучшим прогревом микровыступов и концентрацией напряжений в устье микропадин. До настоящего времени обоснованных рекомендаций по выбору параметров шероховатости поверхностей под газотермическое напыление не существует.

**Современное состояние теории и практики подготовки поверхности к газотермическому напылению.** Подготовка поверхности является одним из наиболее ответственных этапов в процессе получения газотермических покрытий (ГТП). Обоснованию требований к ней и соответствующим технологическим рекомендациям посвящены разделы национальных стандартов по ГТНП [1–3], а также многочисленные публикации и исследования [4–18]. Однако до настоящего времени эти рекомендации и результаты исследований носят противоре-

чивый характер [19]. Прежде всего следует отметить отсутствие достаточно обоснованных требований к параметрам микрорельефа поверхности, подготовленной к ГТНП. Так, по данным работ [20, 21], для достижения максимальной прочности сцепления ГТП необходимо обеспечить оптимальное отношение параметра шероховатости поверхности к среднему размеру напыляемых частиц. В статье [22] показано, что максимальная прочность сцепления достигается при определенной шероховатости поверхности основы, получаемой при САО с оптимальным удельным расходом абразива. По другим данным, условием для достижения максимальной прочности сцепления является определенная длительность обработки поверхности абразивом [23]. С увеличением удельной энергии абразива при САО прочность сцепления ГТП возрастает, а затем появляется тенденция к ее снижению [24].

Как показано в работе [13], при напылении алюминия на поверхность, подготовленную САО различной дробью и абразивными частицами, в большинстве случаев максимальной прочности сцепления достигают при угле атаки поверхности газоабразивным потоком, равном 90°. Для всех видов абразивных частиц несферической формы с уменьшением угла наклона струи частиц к обрабатываемой поверхности зафиксировано снижение прочности сцепления. Наибольшая прочность сцепления получена при обработке металлической поверхности оксидом алюминия. Уменьшение прочности сцепления выявлено при использовании абразивов в следующей последовательности: шлак оксида меди—новая остроугольная дробь—использованная остроугольная дробь—изношенная остроугольная дробь—круглая дробь. Это можно объяснить специфической ролью формы абразивных частиц в характере взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Остроугольные частицы, по-видимому, формируют более благоприятный для образования прочного сцепления ГТП с основой микрорельеф поверхности. При ударе такой частицы воспроизводятся элементарные акты микрорезания со снятием микростружек и образование новых участков поверхностей. При соударении с закругленными и сферическими частицами происходит пластическое деформирование (смятие) микроучастков поверхности изде-

© Ю. А. Харламов, Ю. С. Борисов, 2001

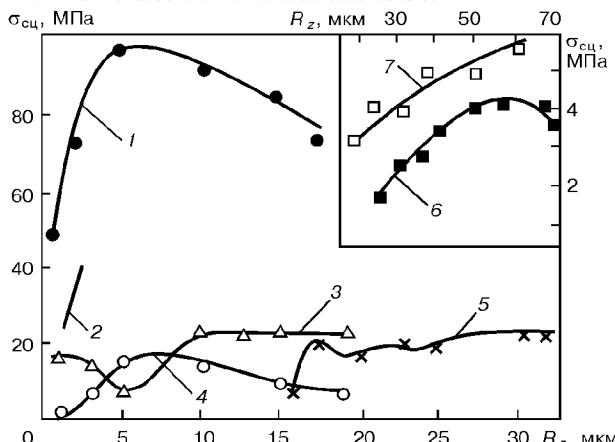


Рис. 1. Влияние высоты неровностей поверхности основы на отрывную прочность сцепления  $\sigma_{\text{cu}}$  ГТП: 1 — сверхзвуковое газонапыление сплава WC-Co с размером частиц  $d_p = 10 \dots 40 \text{ мкм}$ , твердость основы HV 300...800, производительность 19...76 г/мин,  $v_0 = 280 \dots 340 \text{ м/с}$  [25]; 2 — плазменное напыление порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $d_p = 20 \text{ мкм}$ ), основа — сталь [14]; 3 — плазменное напыление порошка никеля ПНЭ-1 ( $d_p = 50 \dots 63 \text{ мкм}$ ) на сталь 45,  $v_0 = 160 \text{ м/с}$  [10-12]; 4 — то же,  $v_0 = 70 \text{ м/с}$  [27-29]; 5 — плазменное напыление порошка железа, плакированного никелем ( $d_p = 20 \dots 120 \text{ мкм}$ ), расход порошка 50 г/мин, скорость перемещения плазмотрона 1,2 м/мин,  $S_m = 50 \dots 300 \text{ мкм}$ , САО колотой дробью 0,3...1,5 мм [23]; 6, 7 — плазменное напыление порошка хромоникелевой шпинели  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  на основу соответственно из сплава Д16АТ и стали X18H10T после САО чугунной крошкой [4]

лия. Однако остроугольные частицы быстро разрушаются и их использование может привести к внедрению осколков в обрабатываемую поверхность и к недопустимому во многих случаях загрязнению поверхности, а также снижению прочности сцепления.

Однако в ряде случаев соответствие между нормальным углом обдувки поверхности газообразивной струей и получением максимальной прочности сцепления не соблюдается. При обработке круглой дробью имеется неярко выраженный максимум в диапазоне 50...60° [13]. Показано, что при напылении плакированным порошком карбида вольфрама (WC + C-Cr-Fe-B-Si-Ni) максимальная прочность сцепления ГТП с основой достигается при угле атаки газообразивной струи в процессе САО, равном 75°.

Экспериментальные данные о влиянии высоты неровностей  $R_z$  микрорельефа поверхности основы на прочность сцепления ГТП, определяемую способом отрыва [14, 23, 25-28] (рис. 1), свидетельствуют об их неоднозначности и, по-видимому, о недостаточности этого параметра для оценки оптимального микрорельефа поверхности, подготовленной к ГТП.

Более четко выраженные зависимости прочности сцепления, определяемой способом сдвига, от среднеарифметического отклонения профиля  $R_a$  (рис. 2) получены в работах [29, 30]. Прочность сцепления при различных способах предварительной обработки поверхности основы, но при одинаковой шероховатости почти неизменна. В этих работах показано, что основное и значимое влияние на прочность сцепления оказывают следующие параметры шероховатости:  $R_p$  — высота сглаживания (расстояние от линии выступов до средней линии);  $R_{\max}$  — наибольшая высота неровностей профиля;

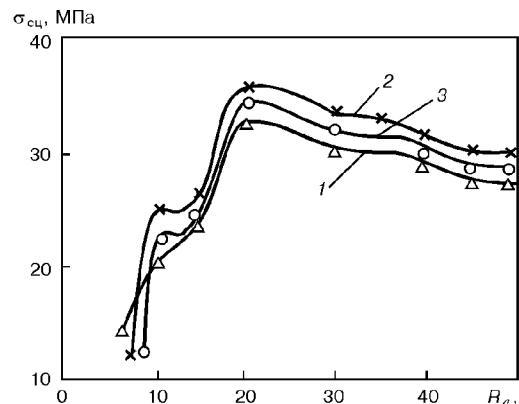


Рис. 2. Влияние  $R_a$  поверхности основы из стали Ст3 на  $\sigma_{\text{cu}}$  (при сдвиге) плазменных покрытий из порошка СНГН 55 при разной подготовке основы: 1 — точение; 2 — обдувка чугунной дробью; 3 — обдувка стальной крошкой;  $S_m = 340 \dots 640 \text{ мкм}$  [29, 30]

$R_a$  — среднеарифметическое отклонение профиля;  $S_m$  — средний шаг неровностей. Однако авторы не приводят каких-либо экспериментальных зависимостей прочности сцепления от значений параметров  $R_p$ ,  $S_m$ . Наличие оптимальной шероховатости для достижения высокой прочности сцепления объясняется оптимальностью объема впадин микрорельефа, обеспечивающего необходимую усадку напыленного слоя при охлаждении. Влияние высоты сглаживания  $R_p$  можно объяснить также тем, что этот параметр характеризует соотношение объемов выступов и впадин в шероховатом слое напыляемой поверхности и является более приемлемым для оценки условий взаимодействия частиц с основой.

Таким образом, авторы работ [29, 30] впервые отмечают недостаточность критериев шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  для оценки роли микрорельефа поверхности основы в образовании прочного сцепления ГТП с основой. В других исследованиях многие авторы также указывали на важную роль топографии поверхности, подготовленной к напылению, в механизме формирования ГТП. Как правило, получение максимальной прочности сцепления связано с определенными параметрами микрорельефа для определенных сочетаний напыляемого материала, технологических режимов напыления и материала основы. Однако влияние этих факторов в достаточной мере еще не оценено.

В публикации [31] изучено формирование плазменных покрытий из порошков сплава никеля с размером частиц 40...50 и 80...90 мкм на нержавеющей стали 316 с различной контролируемой исходной подготовкой поверхности (электроэррозионной обработкой, царапанием, шлифованием и фрезерованием). Напыление производили на поверхность с регулярной двухмерной топографией в виде периодически расположенных выступов и канавок. Оказалось, что механизм формирования покрытия существенно зависит как от топографии поверхности, так и размера напыляемых частиц. На деформирование и растекание напыляемых частиц существенно влияют наклон боковых поверхностей выступов микрорельефа поверхности основы. Покрытие формируется преимущественно в канавках. На выступах образуется слой относительно меньшей толщины.

Как показано в работах [32, 33], деформирование и растекание напыляемых частиц на шероховатой поверхности зависит от топографии поверхности и прежде всего от шага неровностей. Впадина между смежными выступами должна быть достаточно широкой, чтобы позволить частице деформироваться до максимально возможного диаметра диска. В противном случае, она должна затекать в смежную впадину. Если диаметр деформированной частицы существенно меньше шага неровностей, при соударении о боковые поверхности выступов малые частицы будут растекаться в направлении dna впадины и разбрызгиваться. Эксперименты показывают, что для уменьшения разбрызгивания диаметр деформированной частицы (диска)  $D$  должен быть в пределах  $0,25s < D < s$ , где  $s$  — шаг неровностей.

Считают [10], что главная цель САО — получить достаточную шероховатость поверхности, чтобы обеспечить механическое сцепление напыляемых частиц с основой. Рассматриваются два возможных случая: напыляемая частица при соударении с микровыступом деформирует его и способствует образованию якорного сцепления; при попадании напыляемой частицы во впадину между смежными выступами формируется механическое сцепление по типу клина.

Распространено также мнение, согласно которому главная цель САО заключается в очистке поверхности, что, однако, получить при САО надлежащим образом невозможно. Органические загрязнения легко удаляются органическими растворителями, а неорганические и тонкие оксидные пленки устраняются САО, химическими и механическими способами. По данным работы [34], другой эффект шероховатости связан с облегчением разрушения оксидных пленок на выступах микронеровностей при соударении с напыляемыми частицами.

Шероховатость поверхности ( $R_a$ ) возрастает с уменьшением модуля упругости материала основы. При угле обдувки  $90^\circ$  поверхности газоабразивной струей достигается несколько большее значение  $R_a$ , но и большее загрязнение поверхности осколками абразивных зерен, чем при угле обдувки  $45^\circ$  [10].

В публикации [35] показано, что традиционные параметры микрорельефа поверхности не могут быть достаточными для оценки образования сцепления частиц с основой при ГТНП. Более надежной в этом случае является фрактальная размерность. Ее значение для поверхностей, подвергнутых САО, составляет примерно 1,04. При обдувке поверхности газоабразивной струей под углом  $75^\circ$  достигается максимальное значение фрактальной размерности 1,07, в то время как средняя шероховатость поверхности остается почти постоянной (независимо от угла обдувки). При угле САО  $75^\circ$  достигается максимальная прочность сцепления. Можно предположить, что при таком угле обдувки получается и более благоприятная форма лунок.

При САО одну из определяющих ролей в формировании микрорельефа поверхности играют форма и размеры абразивных частиц [19, 36, 37]. Аналогичный эффект зафиксирован в случае эрозии, вызываемой при ударе твердых частиц. Причем вы-

тесненный из кратера металл течет в направлении падения частицы [38]. При ударе частицы о металлическую поверхность возникающая пластическая деформация имеет направленный характер [39]. Материал из лунки вытесняется в сторону проекции вектора скорости частицы. Таким образом, при ударе абразивной частицы под углом образуются более продолговатые, но менее глубокие лунки.

Экспериментальные данные о влиянии размера  $D_a$  абразивных частиц на прочность сцепления ГТП (рис. 3), определяемую способом отрыва, показывают явную зависимость последней от размера абразивных частиц, используемых для САО поверхности основы. Следует, однако, учитывать, что микрорельеф поверхности основы не является единственным фактором, определяющим абсолютное значение прочности сцепления. Особенно наглядно это видно из сравнения прочности сцепления алюминиевых покрытий, полученных соответственно электродуговым 6 и газопламенным 7 напылением при прочих равных условиях.

Таким образом, имеющиеся рекомендации по назначению параметров шероховатости основы под ГТНП являются эмпирическими и относятся к определенным технологическим условиям. Обычно применяемые критерии  $R_a$ ,  $R_z$  не являются достаточными для назначения оптимальной шероховатости поверхности, подготовленной к ГТНП. Поэтому представляется необходимым более детально рассмотреть взаимодействие частиц с шероховатой поверхностью.

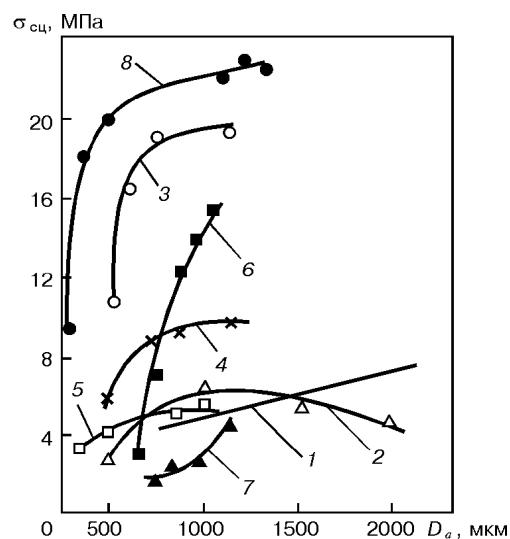


Рис. 3. Влияние размера абразивных частиц, используемых для САО, на  $\sigma_{\text{сц}}$  ГТП: 1 — газопламенное стальное покрытие на стальной основе,  $D_a = 75 \dots 100 \text{ мкм}$  [40]; 2 — плазменное покрытие из порошка сплава NiCrBSi с  $d_p = 50 \dots 100 \text{ мкм}$  на стальной основе [37]; 3 — газопламенное покрытие из порошка сплава NiCrBSi с  $d_p = 45 \dots 126 \text{ мкм}$  на медной основе [37]; 4 — плазменное покрытие из порошка диоксида циркония на основе из сплава Бр.Х0.8; толщина покрытия  $\delta = 0,3 \dots 0,4 \text{ мм}$  при толщине подслоя из сплава ВЖ98, равной  $0,1 \dots 0,15 \text{ мм}$  [41]; 5 — газопламенное проволочное покрытие из никелевого сплава ВЖ98, толщина покрытия  $\delta = 0,15 \text{ мм}$  [42]; 6 — электрометаллизационное покрытие из никеля с толщиной покрытия  $\delta = 0,1 \text{ мм}$  [43]; 7 — газопламенное покрытие из никеля с толщиной покрытия  $\delta = 0,1 \text{ мм}$  [43]; 8 — плазменное покрытие из порошка железа, покрытое никелем с  $d_p = 20 \dots 120 \text{ мкм}$  на основе из стали 45, толщина покрытия  $S_m = 50 \dots 300 \text{ мкм}$  [23].

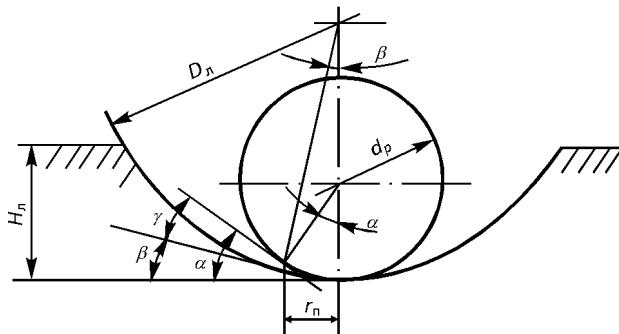


Рис. 4. Схема соударения напыляемой частицы с впадиной микрорельефа поверхности основы

**Расчетная оценка рациональных параметров микрорельефа напыляемой поверхности.** При анализе физико-химического взаимодействия материалов в процессе формирования ГТП обычно рассматривают соударение напыляемой частицы с идеально гладкой плоскостью [44]. В то же время наличие косвенных экспериментальных данных обуславливает потребность в разработке аналитических методов оценки роли микрорельефа поверхности основы в термомеханическом взаимодействии с напыляемыми частицами.

В работах [45–47] рассмотрены модели деформирования и растекания напыляемых частиц на шероховатой поверхности основы. Однако они охватывают случаи, когда размеры микронеровностей существенно меньше размеров напыляемых частиц. Выступы микронеровностей моделируются конусами, пирамидами, полусферами, цилиндрическими стержнями, глухими отверстиями. При этом учитывается влияние этих факторов на коэффициент трения между поверхностью основы и растекающейся частицей. В реальных же условиях напыления размеры микронеровностей основы и размеры напыляемых частиц сопоставимы.

Рассмотрим особенности микрорельефа поверхностей, получаемых при различных методах обработки. После точения от резца остается непрерывный след, обычно в виде резьбовой нарезки. При малых подачах, когда угол подъема витка незначительный, радиус впадины соответствует радиусу закругления вершины резца. В связи со значительными напряжениями, возникающими в процессе резания, образуются надрывы в виде поперечных трещин. Аналогичный микрорельеф поверхности основы формируется при строгании, растачивании и других видах обработки лезвийным инструментом. При шлифовании образуются прерывистые следы в виде отдельных штрихов от резания (царапания) единичными абразивными зернами. Радиус впадины надреза весьма мал и соответствует радиусу заострения абразивного зерна (обычно около 2...10 мкм). Из-за возникновения высоких локальных температур возможно образование микротрещин в плоскости, поперечной следу обработки. После САО следы от воздействия абразивных частиц (дроби) расположены хаотично, а форма лунок приблизительно соответствует форме и размерам абразивных частиц. Сопоставление вероятных размеров напыляемых частиц с формой и размерами не-

ровностей поверхности, получаемых при обработке резанием, показывает возможность моделирования соударения частиц как с плоскостью, так и с выступами и впадинами микрорельефа. Однако наиболее вероятны процессы соударения при попадании частиц во впадины микрорельефа основы.

В зоне контакта жидкой частицы с плоскостью можно выделить три характерных участка [48] с различной природой активируемости: центральный круговой *A* — последовательное воздействие ударного и напорного давлений; средний кольцевой *B* — воздействие напорного давления волнами Рэлея и контактным трением растекающегося материала частицы; периферийный кольцевой *C* — волнами Рэлея и контактным трением. Площадь участка *A* не превышает 2,5 % общей площади контакта, участка *B* — 30 %. Поэтому прочностные и другие механические свойства покрытий в значительной мере определяются условиями активирования поверхности основы на участке *C*, а следовательно, свойствами формируемых межчастичных границ в ГТП.

Рассмотрим случай аксиального соударения жидкой частицы со сферической лункой основы диаметром  $D_l$  (рис. 4). Радиус пятна  $r_n$  контакта частицы с лункой в начальный момент растекания [49] следующий:

$$r_n = d_p v_0 / 2C_p,$$

где  $d_p, v_0$  — соответственно диаметр и скорость частицы;  $C_p$  — скорость звука для материала частицы.

Скорость кумулятивной струи, образующейся при соударении частицы с плоскостью [50], составляет

$$v_c = v_0 / \sin \gamma + v_0 / \tan \gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — угол между соударяемыми поверхностями на расширяющейся границе контакта.

В рассматриваемом случае (рис. 4)

$$\gamma = \alpha - \beta; \sin \alpha = 2r_n / d_p = v_0 / C_p; \sin \beta = 2r_n / D_l = d_p v_0 / D_l C_p.$$

После преобразований получим

$$\sin \gamma = \sin(\alpha - \beta) = (v_0 / C_p) \{ [1 - (d_p / D_l)^2 (v_0 / C_p)^2]^{0.5} - \\ - (d_p / D_l) [1 - (v_0 / C_p)^2]^{0.5} \}. \quad (2)$$

Преобразуем выражение (2) к виду

$$v_c = v_0 / \sin \gamma + v_0 (1 - \sin^2 \gamma) / \sin \gamma. \quad (3)$$

Расчеты по формулам (2) и (3) показывают увеличение скорости кумулятивной струи при соударении жидкой частицы со сферической впадиной в несколько раз по сравнению с ударом частицы о плоскость. Поэтому наиболее благоприятным для образования прочных покрытий является микрорельеф исходной поверхности основы в виде плотно расположенных лунок с радиусом профиля, превышающим радиус напыляемых частиц. Большая по сравнению с начальной скоростью удара скорость растекания частиц соответствует более интенсивной активации поверхности основы. Кроме того, обеспечивается натекание растекающегося слоя материала частицы на боковые поверхности впадины, а

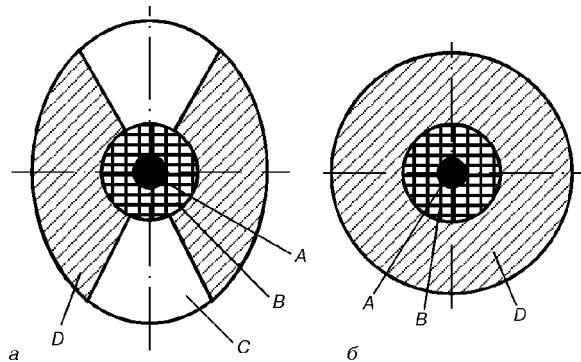


Рис. 5. Зоны контакта напыляемой частицы с впадинами микрорельефа основы в виде риски (а) и лунки (б)

тем самым и расширение области воздействия напорного давления на поверхность основы. Аналогичный эффект проявляется при соударении частицы с боковой поверхностью лунки.

Для соударения частицы с впадиной в виде риски (канавки) в зоне контакта могут быть выделены характерные участки, активируемые воздействием ударного давления  $A$ , ударного и напорного давлений  $B$ , контактным трением и относительно слабым напорным давлением, возникающим при натекании материала частицы на наклонную боковую поверхность впадины  $C$ , контактным трением и относительно высоким напорным давлением, появляющимся при натекании материала на боковые поверхности впадины  $D$  (рис. 5, а). Если же впадина имеет форму лунки в виде сферы или параболоида (рис. 5, б), то участок типа  $C$  с относительно слабым напорным давлением отсутствует. Таким образом, переход от гладкой к шероховатой поверхности увеличивает относительную площадь контакта, активируемую напорным давлением. Причем на участке типа  $D$  напорное давление  $P_n = \rho_n v_c^2 \sin \phi$ , где  $\phi$  — угол встречи струйки с боковой поверхностью лунки. Поскольку при высоких скоростях частиц ( $v_0 \leq 500$  м/с) относительная скорость растекания  $v_c/v_0$  достигает 3...6, на участках типа  $D$  при больших значениях  $\phi$  может развиваться высокое напорное давление  $P_n^D >> P_n$ . Поэтому одним из направлений повышения прочности сцепления ГТП является подбор оптимальных параметров микрорельефа поверхности основы.

Очевидно, что для образования прочного сцепления площадь поверхности контакта деформированной частицы с основой должна быть приблизительно равна площади шарового сегмента, моделирующего впадину. Тогда из геометрических соотношений (рис. 4)

$$\pi D_{\text{л}}^* H_{\text{л}} = \pi d_c^2 / 4, \quad (4)$$

где  $D_{\text{л}}^*$  — оптимальный диаметр лунки;  $H_{\text{л}}$  — глубина лунки.

Следовательно,

$$D_{\text{л}}^* = d_c^2 / 4H_{\text{л}}.$$

Диаметр деформированной в виде диска частицы может быть определен по формуле из работы [50]

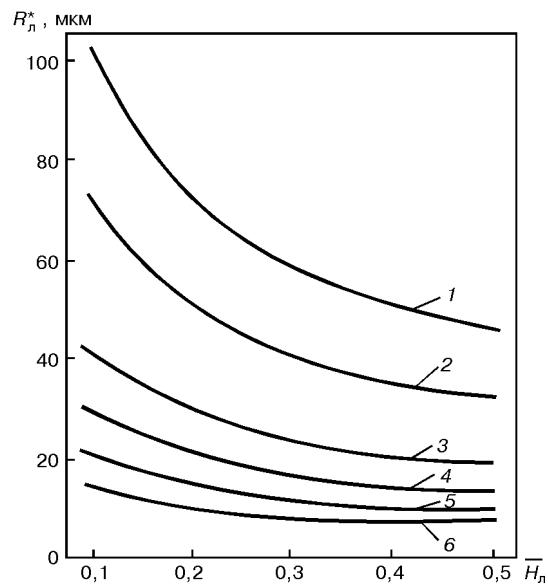


Рис. 6. Зависимость оптимального радиуса сферической лунки от ее относительной глубины: 1 —  $d_p = 50$  мкм,  $h = 0,1$ ; 2 — 50 мкм, 0,2; 3 — 20 мкм, 0,1; 4 — 20 мкм, 0,2; 5 — 10 мкм, 0,1; 6 — 10 мкм, 0,2

$$d_c/d_p = 1,3 [\rho (v_i/\mu)]^{0,2},$$

где  $\rho$  — плотность материала частицы;  $v_i$  — скорость соударения;  $\mu$  — вязкость расплавленного материала частицы.

Как было показано ранее, диаметр частицы, деформированной на плоскости до формы цилиндрического диска, при известных исходном диаметре сферической частицы и толщине диска может быть определен по формуле, приведенной в работе [48]

$$d_c = 2d_p / (\bar{h}_p)^{0,5},$$

где  $\bar{h}_p$  — степень деформации частицы, равная  $h_p/d_p$ ;  $h_p$  — толщина деформированной частицы. Тогда

$$R_{\text{л}}^* = D_{\text{л}}^*/2 = d_p^2 / 12\bar{h}_p H_{\text{л}}. \quad (5)$$

Представим, что

$$H_{\text{л}} = \bar{H}_{\text{л}} D_{\text{л}}^* = 2\bar{H}_{\text{л}} R_{\text{л}}^*, \quad (6)$$

где  $\bar{H}_{\text{л}} = H_{\text{л}}/D_{\text{л}}^*$  ( $\bar{H}_{\text{л}}$  — оптимальная относительная глубина лунки).

После подстановки выражения (6) в уравнение (5) получим

$$R_{\text{л}}^* = d_p^2 / (6\bar{h}_p \bar{H}_{\text{л}})^{0,5}.$$

Расчетные данные (рис. 6) показывают, что необходимый для выполнения соотношения (4) радиус лунки  $R_{\text{л}}^*$  уменьшается по мере увеличения ее относительной глубины, причем наиболее интенсивно при  $\bar{H}_{\text{л}} \leq 0,3$ .

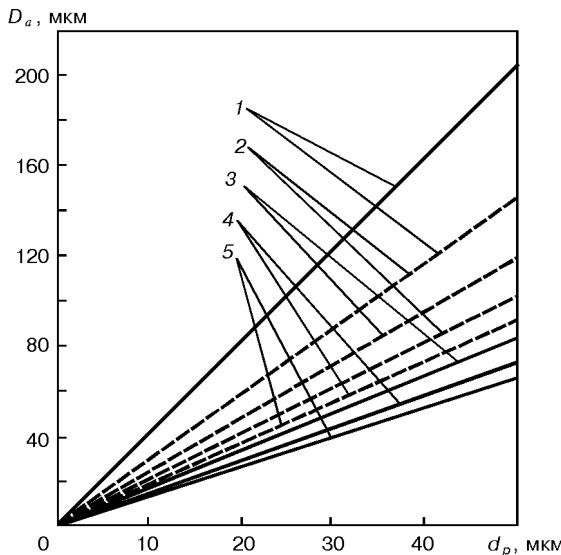


Рис. 7. Зависимость оптимального  $D_a$  от  $d_p$  при  $\bar{H}_l = 0,1$  (1); 0,2 (2); 0,3 (3); 0,4 (4); 0,5 (5); здесь и на рис. 8 сплошная линия – для  $h_p = 0,1$ ; штриховая – для  $h_p = 0,2$

Полагая, что радиус лунки соответствует диаметру абразивной частицы, можно определить ее оптимальный диаметр:

$$D_a = d_p / (6h_p \bar{H}_l)^{0.5}.$$

По мере увеличения относительной глубины лунок оптимальный диаметр абразивных частиц уменьшается (рис. 7). При заданном размере абразивных частиц, когда  $D_a > d_p$ , можно определить оптимальную глубину лунок

$$\bar{H}_l = d_p^2 / 6h_p D_a^2.$$

Для определения относительной глубины лунок удобно пользоваться графиками их зависимости  $\bar{H}_l$  от диаметра напыляемых частиц  $d_p$  (рис. 8). Относительная глубина лунок, образующихся от удара абразивных частиц, как правило, не должна превышать 0,5. Поэтому целесообразно для достижения высокой прочности сцепления покрытий с заданным размером напыляемых частиц выбирать минимально возможный диаметр абразивных частиц при  $\bar{H}_l \rightarrow 0,5$ .

Влияние глубины микровпадин и размера абразивных частиц на прочность сцепления ГТП подтверждается экспериментальными данными Н. Катца и Е. Линника [40]. Для различных сочетаний материалов покрытия и основы существуют оптимальные значения глубины впадин и диаметра абразивных частиц, при которых достигается максимальная прочность сцепления.

При подготовке изделий к ГТП после САО образуется полностью новый микрорельеф поверхности. Для его описания необходимо учитывать форму и взаимное расположение лунок на ней. Размещение лунок можно представить как пуассоновское поле точек, характеризующих самые глубокие точки лунок. При этом плотность поля определяется

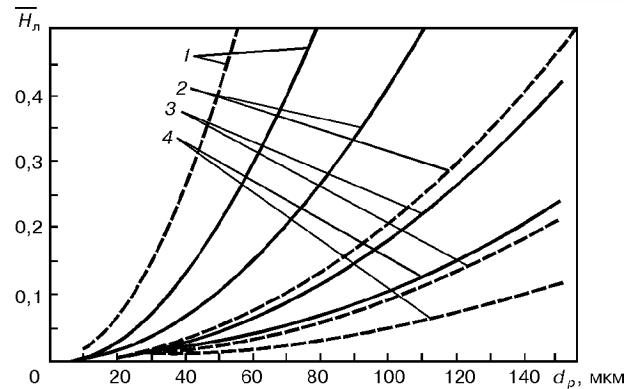


Рис. 8. Зависимость оптимальной  $\bar{H}_l$  от  $d_p$  при  $D_a = 100$  (1); 200 (2); 300 (3); 400 (4) мкм

количеством точек, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности [51]. Принимаем следующие допущения.

Для обработки используются монодисперсные сферические абразивные частицы.

При одинаковых размерах частиц повторный удар по лунке вызывает незначительное изменение ее формы и размеров.

Новая лунка на поверхности образуется, если центр удара частицы проектируется за пределами уже имеющегося отпечатка.

Будем также считать, что лунки расположены плотно на обработанной поверхности (рис. 9). Согласно геометрическим соотношениям радиус лунки в плане следующий:

$$R_{\text{опт}} = [R_l^2 - (R_l - H_l)^2]^{0.5} = (2R_l H_l - H_l^2)^{0.5} = \\ = [H_l (D_l - H_l)]^{0.5} = D_l [\bar{H}_l (1 - \bar{H}_l)]^{0.5},$$

а шаг между лунками в поперечном направлении составляет

$$S_{\text{пп}} = (4R_{\text{опт}}^2 - R_{\text{опт}}^2)^{0.5} = (6R_l H_l - 3H_l^2)^{0.5} = \\ = [3H_l (D_l - H_l)]^{0.5} = D_l [3\bar{H}_l (1 - \bar{H}_l)]^{0.5};$$

в продольном направлении

$$S_{\text{пп}} = 2R_{\text{опт}} = D_{\text{опт}} = 2[H_l (D_l - H_l)]^{0.5} = 2D_l [\bar{H}_l (1 - \bar{H}_l)]^{0.5}.$$

Определим вероятность попадания напыляемых частиц в лунку

$$P = \sum F_l / F,$$

где  $\sum F_l$  – суммарная площадь проекций лунок на обработанной поверхности;  $F$  – площадь обработанной поверхности. Для упрощения методики вычисления этой величины выделим на обработанной поверхности элементарную геометрическую фигуру в виде равностороннего шестиугольника, охватывающего лунку. В свою очередь в этой лунке выделим треугольник, охватывающий промежуточный участок, между смежными лунками (рис. 9). Соотношение площадей необработанного участка поверхности и частей трех лунок, входящих в этот треугольник, будет определять искомую величину  $P$ , которую можно представить в виде

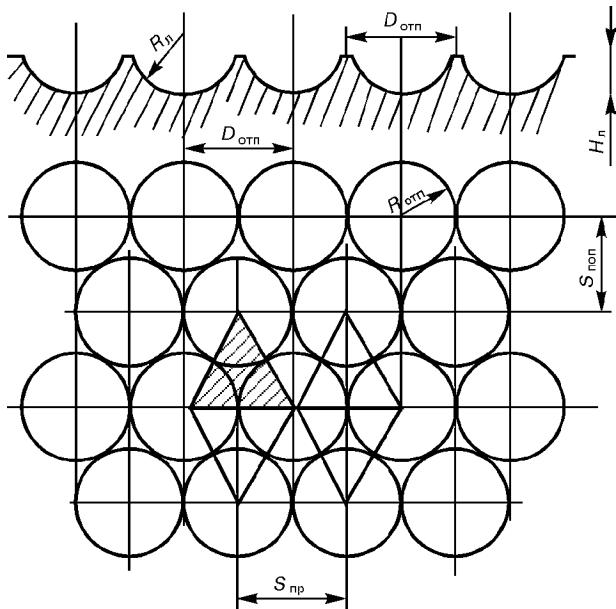


Рис. 9. Модель микрорельефа поверхности основы

$$P = F_1 / F_2,$$

где  $F_1$  — площадь трех секторов лунок, входящих в треугольник;  $F_2$  — площадь элементарного треугольника.

Как видно из геометрических соотношений (рис. 9), эти площади равны

$$F_1 = \pi D_{\text{отп}}^2 / 8; F_2 = 0,433 D_{\text{отп}}^2.$$

Тогда искомая вероятность попадания напыляемых частиц в лунки составляет

$$P = F_1 / F_2 = 0,907.$$

Таким образом, вероятность попадания напыляемых частиц в лунки при их плотном расположении весьма высока. Однако даже при попадании напыляемой частицы в центр необработанного участка он полностью перекрывается напыляемой частицей и подвергается воздействию напорного давления.

## Выводы

1. Параметры микрорельефа поверхности, подготовленной к газотермическому напылению, оказывают превалирующее влияние на прочность сцепления покрытий с основой.

2. Особенности геометрии и параметры микрорельефа поверхности основы в значительной мере определяют площадь и интенсивность механической активации этой поверхности в зоне контакта с напыляемыми частицами.

3. Для струйно-абразивной подготовки поверхностей предпочтительно использовать сферические абразивные частицы приблизительно одинакового диаметра, соответствующего диаметру напыляемых частиц.

4. Для достижения высокой прочности сцепления и плотной границы контакта покрытия с основой диаметр абразивных частиц должен превышать таковой напыляемых частиц в 1,5...3,0 раза, причем тем больше, чем меньше относительная глубина лунок, рекомендуемая в пределах от 0,1 до 0,5.

5. Необходимо развивать методы подготовки поверхности, обеспечивающие формирование микрорельефа поверхности основы в виде плотно расположенных лунок с оптимальными значениями глубины, согласованными с размерами напыляемых частиц, и приблизительно осесимметричной формой в плане. Последнему условию соответствует форма шестигранника, обеспечивающая возможность полного покрытия поверхности.

6. Необходимо развивать подходы фрактальной геометрии к прогнозированию и оценке микрорельефа поверхности, подготовленной к газотермическому напылению, позволяющие отразить процессы образования, эволюции и динамические свойства этих поверхностей, в том числе при образовании покрытия, поскольку традиционные методы исчерпали свои возможности для достаточно полного описания таких сложных объектов.

1. *Thermal spraying. Practice, theory, and application* // American Welding Society, Inc. — Miami, Florida, 1985. — 184 p.
2. *Schweißtechnische Richtlinien. Thermisches Spritzen*. — Berlin: Veb Verlag Technik, 1983. — 48 s.
3. *PTM-2-87. Подготовка поверхности деталей к нанесению газотермических покрытий. Типовой технологический процесс*. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. — 24 c.
4. *Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation* // M. Metalli, A. Grimaud, A. C. Leger, Lu J. Fauchais // *J. of Thermal Spray Technology*. — 1997. — № 6. — P. 217–227.
5. *Zaat J.M. Thermal spraying* // *Ann. Rev. Mater. Sci.* — 1983. — Vol. 13. — P. 9–42.
6. *Kitahara S., Hasui A. A Study of the bonding mechanism of sprayed coatings* // *J. Vac. Sci. Technol.* — 1974. — **11**, № 4. — P. 747–753.
7. *Bergmann C. P. Preheating of substrate as adherence agent of plasma sprayed coatings* // *Thermal Spraying '93* (May, 1993, Duesseldorf). — Duesseldorf: DVS, 1993. — P. 114–118.
8. *Funk W., Goebe F., Manz M. The influence of substrate temperature on the bond strength of plasma sprayed oxide ceramics* // *Proc. of 1st Plasma-technik symp. (Lucern, May, 1988)*. — Wohlen, 1988. — P. 59–66.
9. *Metalli M., Fauchais P., Grimaud A. Influence of substrate roughness and temperature on alumina coatings adhesion-cohesion* // *Surface and Coating Technol.* — 1996. — **81**, № 2–3. — P. 275–286.
10. *Wigren J. Grit blasting as surface preparation before plasma spraying* // *Proc. of 1st NTSC (Orlando, Sept., 1987)*. — Orlando, 1988. — P. 99–104.
11. *Beauvais C. Surface preparation, introduction, surface treatment* // *J. Techniques de l'Ingénieur. Metallurgie*. — 1982. — № 5. — P. 1435.
12. *Dupras J. J., Garnier G. Chemical decreasing, surface treatment* // *Ibid.* — P. 1450.
13. *Apps R. L. The significance of surface preparation in the flame spraying of metals* // *The Chemical Eng.* — 1974. — № 292. — P. 769–773.
14. *Modeling and measurement of adhesive strength of thermal spray coatings* // S. Amada, H. Yamada, S. Yematsu, Y. Satoh // *Proc. of 13th ITSC (Orlando, May–June, 1992)*. — Orlando, 1992. — P. 915–920.
15. *Amada S., Yamada Y. Introduction of fractal dimension to adhesive strength of plasma sprayed coatings* // *11th Intern. symp. plasma chemistry*. — Loughborough, 1993. — Vol. 1. — P. 150–155.
16. *James D. H. A Review of experimental findings in surface preparation for thermal spraying* // *J. of Mech. Work. Technol.* — 1984. — Vol. 10. — P. 221–232.
17. *Yankee S. J., Salsbury R. L., Pletka B. J. Quality control of hydroxylapatite coatings: the surface preparation stage* // *Proc. of 4th NTSC (Pittsburgh, May, 1991)*. — Pittsburgh, 1991. — P. 475–481.
18. *Metalli M. Influence of roughness and temperature of substrates on adhesion* // *Cohesion and residual stresses of plasma sprayed alumina coatings: Thesis University of Technology of Compiegne (France, 18 Dec., 1992)*. — Compiegne, 1992. — P. 41–42.



19. Теория и практика газопламенного напыления покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашико, Е. Д. Манойло и др. — Минск: Навука і тэхніка, 1993. — 295 с.
20. Голего Н. Л., Панамарчук В. Г. О влиянии шероховатости материала с титановой основой на прочность сцепления плазменных никелевых покрытий // Физ.-хим. механика материалов. — 1974. — № 6. — С. 32–35.
21. Яковлев Г. М., Королько А. А., Ивашико В. С. Влияние шероховатости поверхности на качество напыляемого слоя // Машиностроение и приборостроение. — 1977. — Вып. 9. — С. 15–17.
22. Медведев Ю. А., Морозов И. А. О влиянии шероховатости и степени наклена на прочность сцепления плазменных покрытий // Физика и химия обработки материалов. — 1975. — № 4. — С. 27–30.
23. Строганов А. И., Дробышевский А. С., Гоц А. Б. Влияние шероховатости стальной подложки на прочность сцепления с плазменным покрытием // Порош. металлургия. — 1982. — № 10. — С. 91–95.
24. Ивашико В. С. Прочность сцепления покрытий из самофлюсирующихся твердых сплавов. // Машиностроение. — 1979. — Вып. 2. — С. 103–105.
25. Matsubara Y., Tomiguchi A. Surface texture and adhesive strength of high velocity oxy-fuel sprayed coatings for rolls of steel mills // Proc. of 13th ITSC (Orlando, May–June, 1992). — Orlando, 1992. — P. 637–641.
26. Куприянов И. Л., Геллер М. А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 176 с.
27. Верстак А. А., Куприянов И. Л., Ильющенко А. Ф. Особенности взаимодействия напыляемых частиц с шероховатой поверхностью основы // Свароч. пр-во. — 1987. — № 2. — С. 5–6.
28. Верстак А. А., Куприянов И. Л., Ильющенко А. Ф. Влияние режима струйно-абразивной обработки поверхностей изделий на адгезию газотермических покрытий // Автомат. сварка. — 1987. — № 8. — С. 69–70.
29. Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. — М.: Машиностроение, 1979. — 176 с.
30. Рыжов Э. В., Чистоплян А. Ф., Харченков В. С. О прочности сцепления покрытия, наносимого напылением, со стальной основой // Вест. машиностроения. — 1973. — № 12. — С. 32–35.
31. Application of lattice gas models to plasma spraying / V. Guiport, E. Cochelin, F. Borit et al. // Surface Eng. — 1998. — 14, № 5. — P. 400–404.
32. Sobolev V. V. Morphology of splats of thermally sprayed coatings // Proc. of the 15th Intern. thermal spray conf. (Nice, 25–29 May, 1998). — Nice, 1998. — P. 507–510.
33. Gawne D. T., Griffiths B. J., Dong G. Splat morphology and adhesion of thermally sprayed coatings // Proc. of 14th ITSC (Kobe, May 1995). — Kobe, 1995. — Vol. 2. — P. 779–784.
34. James D. H. Overview of experimental findings in surface preparation for thermal spraying // J. of Mech. Work. Technol. — 1984. — № 10. — P. 221–232.
35. Amada S., Hirose T. Influence of grit blasting pre-treatment on the adhesion strength of plasma sprayed coatings: fractal analysis of roughness // Surface and Coatings Technol. — 1998. — № 102. — P. 132–137.
36. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. — Киев: Техника, 1989. — 177 с.
37. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. — Киев: Наук. думка, — 1987. — 544 с.
38. Рафф А. У., Видерхон С. М. Эрозия при ударе твердых частиц // Эрозия. — М.: Мир, 1982. — С. 80–139.
39. Клейс И. Об изнашивании металлов в абразивной струе // Тр. Таллин. политехн. ин-та. Сер. А. — 1959. — № 168. — С. 27.
40. Катц Н. В., Линник Е. М. Электрометаллизация. — М.: Сельхозгиз, 1953. — 234 с.
41. Никифоров Г. Д., Китаев Ф. И., Цидулко А. Г. Прочность сцепления покрытий из окислов, напыленных плазменной струей // Вопр. технологии производства летательных аппаратов. — Куйбышев, 1970. — Вып. 41. — С. 135–143.
42. Endeh M., Shinmen S. Influences of principal factors of pretreatment on surface roughness of mild steel substrate and adhesive strength of Zn sprayed coating. — Florida, 1976. — P. 492–502. — (Prep. of papers for eighth Intern. thermal spraying conf., Florida, May, 1976).
43. Havrda M., Pitter J., Lastovkova O. Possibilities of lowering the costs for preliminary surface treatment by grit blasting under electrometallized coatings // Ibid. — P. 503–512.
44. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. — М.: Наука, 1977. — 184 с.
45. Sobolev V. V., Guilemany J. M., Martin A. J. Influence of surface roughness on the flattening of powder particles during thermal spraying // J. of Thermal Spray Technology. — 1996. — Vol. 5(2). — P. 207–214.
46. Fukanuma H. Mathematical modeling of flattening process on rough surfaces in thermal spray // Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems: Proc. of the 9th NTSC (7–11 Oct., 1996, Cincinnati, Ohio). — Cincinnati, 1996. — P. 647–656.
47. Finite elements modeling of liquid particle impacting onto flat substrates / Z. G. Feng, G. Montavon, Z. Q. Feng et al. // Proc. of the 15th Intern. thermal spray conf. (25–29 May 1998, Nice). — Nice, 1998. — P. 395–400.
48. Харламов Ю. А. О моделировании процесса соударения частиц с поверхностью при газотермическом нанесении покрытий // Физика и химия обработки материалов. — 1990. — № 4. — С. 84–89.
49. Харламов Ю. А. Очистка подложек от поверхностных пленок в процессе напыления порошков // Порош. металлургия. — 1983. — № 11. — С. 41–47.
50. Madejski J. Solidification of droplets on a cold surface // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1976. — Vol. 19. — P. 1009–1013.
51. Аракелян А. А. Шероховатость поверхности при струйно-абразивной обработке // Технология, организация и экономика машиностроит. пр-ва. — 1985. — № 7. — С. 5–8.

Modern concepts of the role of the base surface microrelief parameters in formation of thermal coatings have been analyzed. Analysis of experimental data has served as a basis for suggesting an analytical model for selection of the optimal parameters of the microrelief of the surfaces being sprayed.

Поступила в редакцию 02.10.2000,  
в окончательном варианте 27.10.2000



УДК 621. 791: 658.34.2:628.831

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ СВАРОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

**О. Г. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен обзор работ, проведенных в Институте электросварки, которые посвящены вопросам защиты сварщиков от вредного воздействия сварочных аэрозолей. Обоснована необходимость комплексного подхода, т. е. сочетания технологических и санитарно-технических мероприятий с применением эффективных средств индивидуальной защиты органов дыхания сварщиков.

**Ключевые слова:** сварочные аэрозоли, технологические рекомендации, фильтровентиляционные агрегаты, средства индивидуальной защиты органов дыхания сварщиков, компьютерная информационно-поисковая система, гигиенические характеристики сварочных аэрозолей

Труд сварщиков характеризуется наличием ряда опасных и вредных производственных факторов, являющихся неотъемлемым следствием сварочного процесса. Среди них наибольшую угрозу для здоровья сварщиков представляет сварочный аэрозоль (СА), от которого до настоящего времени сварщик защищен очень слабо. Об этом свидетельствуют результаты медицинских обследований, показывающие, что среди профессиональных заболеваний сварщиков Украины и других стран СНГ примерно 80 % составляют бронхологические заболевания, вызванные воздействием СА [1]. Имеются также данные о том, что действие СА на органы дыхания может повышать риск развития онкологических заболеваний [2]. Дальнейшее развитие сварочного производства требует улучшения условий труда рабочих-сварщиков. Работа в этом направлении ведется во всех промышленно развитых странах. В Украине принято соответствующее законодательство по охране труда, категорически запрещающее проведение различных видов работ, в том числе и сварочных, в условиях, не соответствующих нормативным требованиям.

Меры, направленные на оздоровление условий труда сварщиков, которые проводились ранее, не дали заметных положительных результатов. Проблема создания здоровых и безопасных условий труда сварщиков по-прежнему остается актуальной. В первую очередь подлежат решению задачи защиты органов дыхания сварщиков от воздействия СА. Для этого необходим более радикальный подход.

Как показывает мировой и отечественный опыт, сочетание технологических и санитарно-технических мероприятий по устранению вредного действия СА, а также применение средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) сварщиков составляют основу системы мероприятий по защите сварщиков и окружающей среды от воздействия СА.

Первое направление этой системы (технологическое) заключается в снижении уровня выделения СА в воздух путем совершенствования процесса, выбора технологии и способа сварки, вида и марки

сварочного материала, защитного газа и режима сварки. Второе (санитарно-техническое) состоит в локализации и нейтрализации СА путем применения современных эффективных средств местной вентиляции. Третье направление заключается в применении СИЗОД нового поколения, позволяющих защищать органы дыхания сварщиков в различных производственных условиях.

В зависимости от условий труда, а также от требований к качеству сварного соединения необходимо использовать либо комплекс этих мероприятий, либо некоторые из них. Благодаря реализации всего указанного комплекса мероприятий практически решены подобные проблемы сварочного производства в развитых зарубежных странах. Во многих европейских странах на основе подробных исследований химического состава и уровней выделения СА составлены специальные каталоги и компьютерные базы данных, позволяющие выбирать наиболее благоприятные в гигиеническом отношении сварочные материалы и режимы сварки.

Для защиты от СА применяются эффективные средства местной вентиляции известных фирм «Plimo Vent», «Nederman», ESAB, «Kemper» и др.; СИЗОД (маски сварщика с системой подачи чистого воздуха в зону дыхания) фирм «Racal», «Nederman», «Hornell Speedglas, Inc.» и др. В России налажено серийное производство современных средств местной вентиляции (для рабочих мест сварщиков) фирмами «СовПлим», «Экоюорус-Вент» и др.

В Украине в последнее десятилетие улучшение условий труда сварщиков также осуществлялось по трем отмеченным выше направлениям.

Реализация первого направления, т. е. разработка технологических методов снижения выделения СА, возможна на основе глубокого изучения процессов их образования. Для двух других направлений эти сведения также являются исходными при разработке соответствующих способов и средств нейтрализации СА.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины выполнены исследования процессов образования СА и разработаны рекомендации по снижению и нейтрализации их выделений при дуговой сварке. Для этого потребовалось изучить закономерности образования СА при дуговой сварке [3], выполнить обзор технологических рекомендаций по снижению выде-

© О. Г. Левченко, 2001



лений СА [4], разработать классификацию СА, образующихся при различных способах сварки [5], создать компьютерную информационно-поисковую систему гигиенических характеристик СА и способов сварки, при которых они образуются [6], и на этой основе предложить методы и средстванейтрализации СА.

При разработке технологических рекомендаций по совершенствованию гигиенических характеристик процессов дуговой сварки учитывали опыт предыдущих исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона [7]. Поэтому, принимая во внимание положительные результаты, полученные применительно к ручной сварке покрытыми электродами, основным объектом наших исследований были механизированные способы сварки, занимающие второе место по объему применения после сварки покрытыми электродами. Результаты указанных исследований, как показал опыт, могут использоваться для улучшения условий труда и в случае применения других способов дуговой сварки.

**Методики исследований.** Исследования количества выделений и химического состава твердых составляющих СА (ТССА) проводили по общепринятым и утвержденным Минздравом методикам [8–10] на специальных стендах, приспособленных для конкретных способов сварки.

Изучение фильтрационных характеристик зернистых материалов, применяемых для очистки воздуха от СА, выполняли по методике, разработанной в Физико-химическом институте защиты окружающей среды и человека Минобразования и НАН Украины (ФХИЗОСиЧ) совместно с ИЭС им. Е. О. Патона, на специальном стенде. Образующийся при сварке в специальной камере аэрозоль пропускали через колонку с фильтрующим материалом и аэродинамические трубы для отбора проб СА. Эффективность фильтра определяли путем замеров концентрации ТССА и газов, отбираемых до и после фильтрации.

Для оценки количества выделений СА, кроме обычно применяемых показателей (интенсивности образования СА, г/мин, и удельного выделения, г/кг), [8] использовали также два новых (коэффициент интенсивности образования СА, г/(кВт·ч) и коэффициент удельного выделения СА, г/(кВт·кг)) [11]. Эти показатели учитывают основные параметры режима сварки, влияющие на выделение СА, и позволяют более объективно производить гигиеническую оценку сварочных материалов и способов сварки.

Вместе с тем, для оценки токсичности СА или степени воздействия на организм при определенном способе сварки использовали показатели воздухообмена общеобменной вентиляции, т. е. объем воздуха, который необходимо подавать в производственное помещение, чтобы разбавить вредные вещества СА до предельно допустимой концентрации (ПДК). Воздухообмен вентиляции выражали в метрах кубических на килограмм сварочного материала, как принято в отечественной практике, и в метрах кубических в час (в единицу времени) согласно методике Международного института сварки.

Исходным показателем, определяемым экспериментально, является лишь интенсивность образования СА, все остальные рассчитывают. Поэтому для обработки огромного количества данных, полученных при различных способах сварки, совместно с программистами ИЭС им. Е. О. Патона разработана компьютерная информационно-поисковая система баз данных гигиенических характеристик СА, получившая название «ECO-WELD» [6]. Она состоит из трех баз данных: для покрытых электродов; сварочных материалов, предназначенных для механизированной сварки (проволок сплошного сечения, порошковых, активированных для сварки в защитных газах, а также самозащитных и наплавочных лент) и для сварочных флюсов. В каждой из них учтены свои особенности и факторы, влияющие на уровень, химический состав и токсичность СА. Исходными данными, вводимыми в эту систему, являются уровень выделений и химический состав СА. Остальные, необходимые для всесторонней гигиенической оценки показатели, выводятся на экран монитора и распечатываются. Кроме того, в зависимости от марки сварочного материала информационная система выдает рекомендации о необходимых средствах защиты сварщиков и окружающей среды, основанные на разработанной нами гигиенической и химической классификации СА и способах сварки, при которых они образуются. Главными достоинствами предлагаемой компьютерной системы в научном плане являются, во-первых, возможность с ее помощью производить сравнительную гигиеническую оценку различных сварочных материалов и выдавать рекомендации по защите от СА, а во-вторых, возможность обстоятельного анализа влияния всех факторов сварочного процесса на гигиенические показатели, в том числе и требуемый объем воздухообмена вентиляции.

**Выбор способа сварки (сварочного материала).** С помощью нашей информационно-поисковой системы оценивали влияние способа сварки, вида сварочного материала и класса легирования основного металла на объема воздухообмена вентиляции. Результаты сравнительной гигиенической оценки способов сварки по минимальным и максимальным значениям объема воздухообмена для различных марок сварочных материалов (таблица) свидетельствуют о том, что требуемый объем воздухообмена вентиляции для всех способов сварки увеличивается, во-первых, с повышением степени легирования стали, что объясняется наличием в СА токсичных веществ первого и второго классов опасности (ГОСТ 12.1.005–88) — соединений канцерогенного шестивалентного хрома и никеля, соединений марганца, растворимых и нерастворимых фторидов, фтористого водорода и тетрафтористого кремния. В то же время объем воздухообмена вентиляции зависит и от способа сварки: максимальный при сварке покрытыми электродами, меньше при применении порошковых, затем активированных проволок, еще меньше при сварке проволоками сплошного сечения в защитных газах и минимальный при автоматической сварке под флюсом (таблица). Более точное сравнение зависит от конкретной марки сварочного материала. Причиной повы-



## Требуемый объем воздухообмена вентиляции в зависимости от способа сварки и применяемых сварочных материалов

| Класс стали        | Способ сварки и сварочные материалы           | Требуемый объем воздухообмена вентиляции, м <sup>3</sup> /кг |
|--------------------|---|--|
| Высоколегированные | РДС электродами с покрытием:                  |  |
|                    | основным                                      | 11800...89000  |
|                    | рутилово-основным                             | 13900...76000  |
|                    | рутиловым                                     | 4200...35000   |
|                    | Порошковой проволокой                         | 5200...70200   |
|                    | Проволокой сплошного сечения в защитных газах | 1300...28300   |
|                    | АДС под флюсом:                               |  |
|                    | плавленым                                     | 80...1350  |
|                    | керамическим                                  | 70...530   |
| Легированные       | РДС электродами с покрытием:                  |  |
| теплоустойчивые    | основным                                      | 7400...39000   |
|                    | рутилово-основным                             | 3700...3900  |
|                    | Порошковой проволокой                         | 3100...6100  |
|                    | Проволокой сплошного сечения в защитных газах | 1100...5850  |
|                    | АДС под флюсом:                               |  |
|                    | плавленым                                     | 90...570   |
|                    | керамическим                                  | 400...550  |
| Углеродистые и     | РДС электродами с покрытием:                  |  |
| низколегированные  | основным                                      | 2200...24000   |
|                    | рутилово-основным                             | 2400...11700   |
|                    | кислым  | 6200...11500   |
|                    | ильменитовым (кисло-рутиловым)                | 4000...9800  |
|                    | рутиловым                                     | 2400...9500  |
|                    | целлюлозным                                   | 3000...3600  |
|                    | кисло-целлюлозным                             | 4100...4200  |
|                    | Порошковой проволокой                         | 2300...21500   |
|                    | Активированной проволокой                     | 2100...6500  |
|                    | Проволокой сплошного сечения в защитных газах | 1100...5900  |
|                    | АДС под флюсом:                               |  |
|                    | плавленым                                     | 30...570   |
|                    | керамическим                                  | 30...550   |

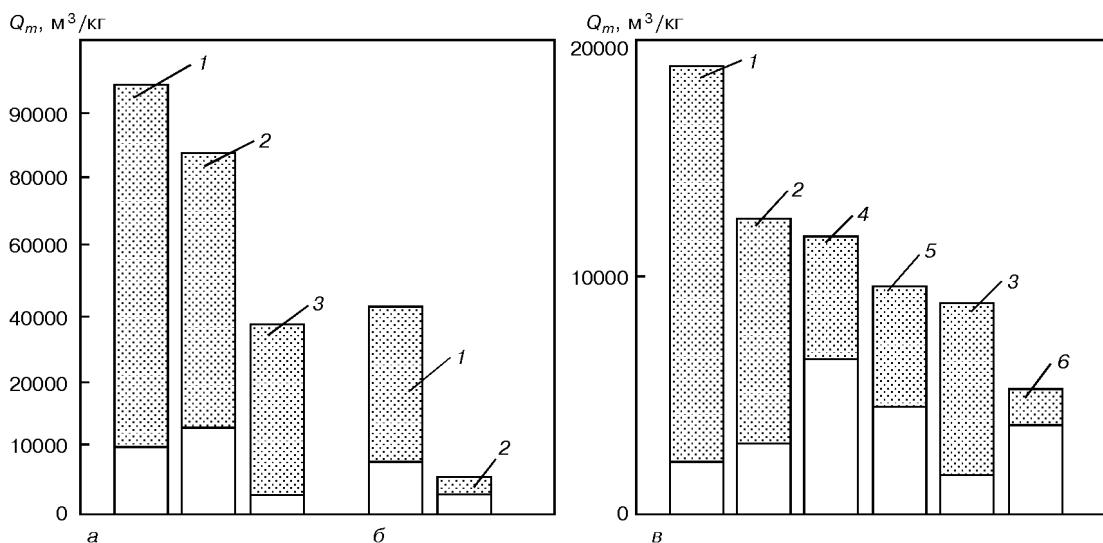


Рис. 1. Влияние вида покрытия электрода на объем воздухообмена  $Q_m$  вентиляции при сварке покрытыми электродами: *а* — высоколегированные; *б* — легированные; *в* — углеродистые стали; 1 — основное; 2 — рутилово-основное; 3 — рутиловое; 4 — кислое; 5 — ильменитовое; 6 — целлюлозное покрытия; здесь и на рис. 2, 3 заштрихованные части диаграмм — пределы изменения объемов воздухообмена для различных марок сварочных материалов

шенной токсичности СА, образующихся при сварке порошковыми проволоками, по сравнению с проволоками сплошного сечения, является наличие в них, кроме марганца, фторидов (флюорита и кремнефтористого натрия). Именно их присутствие в СА повышает требуемый объем воздухообмена вентиляции. Что касается покрытых электродов, то ток-

сичность СА определяется видом покрытия электрода: максимальная токсичность зафиксирована у аэрозолей, выделяющихся при применении электродов с основным покрытием, из-за наличия в них фторидов, которая, однако, снижается при введении в покрытие рутила (рис. 1). Целлюлозное покрытие является источником большого количес-

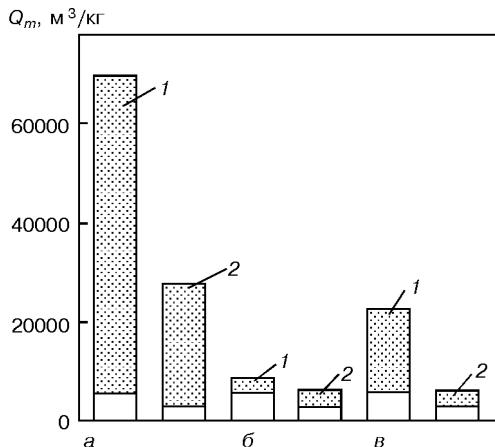


Рис. 2. Влияние вида сварочной проволоки на объем воздухообмена вентиляции: а — высоколегированные; б — легированные; в — углеродистые и низколегированные стали; 1 — порошковая проволока; 2 — проволока сплошного сечения

тва аэрозоля вследствие сгорания целлюлозы с выделением угарного и углекислого газов, водорода и паров воды, который, однако, содержит незначительное количество веществ, определяющих его токсичность.

При механизированной сварке любых типов сталей больше СА образуется при сварке порошковой проволокой. Наибольшую токсичность имеют СА, образующиеся при сварке высоколегированных сталей (рис. 2). Это объясняется наличием в них шестивалентного хрома в виде хроматов калия и натрия, образующихся при взаимодействии хрома с соединениями калия и натрия, обычно присутствующими в сердечнике проволоки. Естественно, при сварке проволокой сплошного сечения хроматы калия и натрия в СА отсутствуют. Поэтому проволоки сплошного сечения имеют существенные преимущества перед порошковыми.

При сварке под флюсом объем воздухообмена вентиляции совсем незначительный (таблица) несмотря на наличие в СА большого количества марганца и фторидов. Это объясняется влиянием на выделение СА защитного слоя флюса, который, кроме своего прямого назначения, выполняет также роль зернистого фильтра, на котором осаждается выделяющийся из сварочной ванны аэрозоль. При использовании керамического флюса уровень выделения СА несколько ниже (рис. 3), поскольку размеры зерен керамического флюса мельче и являются более эффективным фильтром, чем плавленый флюс.

Сравнительная гигиеническая оценка конкретных марок сварочных материалов с целью выбора наиболее благоприятных в гигиеническом отношении осуществляется путем сопоставления показателей требуемого объема воздухообмена при работе с ними. Предложенная компьютерная система при этом является инструментом для проведения таких сравнений.

**Регулирование состава СА.** Исследование химического состава ТССА показало его существенное отличие от расчетного (по закону Коновалова) состава насыщенного пара над расплавом [12]. Это обусловлено тем, что при электродуговом процессе

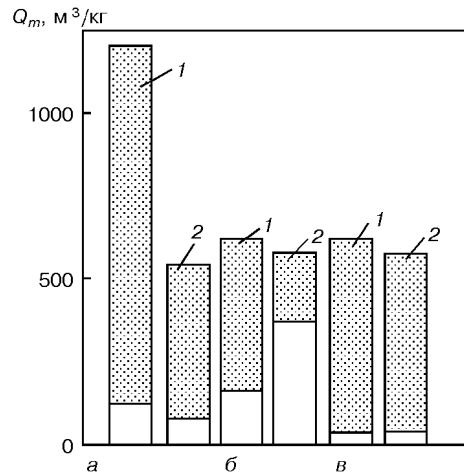


Рис. 3. Влияние вида флюса на объем воздухообмена вентиляции: а — высоколегированные; б — легированные; в — углеродистые и низколегированные стали; 1 — плавленый; 2 — керамический флюс

ТССА образуется в результате не только равновесного, но и взрывного испарения вследствие разрушения металлической перемычки между электродом и сварочной ванной, а также из-за быстрой эрозии верхних слоев поверхности в сжатых областях дуги, что приводит к резкому снижению содержания летучего марганца в ТССА.

Учет отмеченного явления позволил уменьшить содержание марганца в ТССА, а также снизить интенсивность его выделения при сварке импульсным модулированным током вместо непрерывного [13] более чем в два раза. Это объясняется сокращением общей мощности дуги за счет пауз в подаче тока, которые снижают общую энергию дуги, характерную для сварки непрерывным током и приводящую в ряде случаев к перегреву и испарению металла. Интенсивность образования СА и содержание в нем марганца уменьшаются также со снижением тока и напряжения импульсов, а также с увеличением их длительности. Поэтому выбор оптимального режима модуляции тока позволяет уменьшить выделение ТССА без снижения производительности сварки [11].

**Выбор режимов сварки.** При изучении влияния режимов сварки на выделение ТССА зафиксировано, что зависимости уровней их выделений от сварочного тока имеют сложный вид с максимумом и минимумом [4, 14]. Исследования формы проплавления основного металла с помощью макрошлифов позволили установить, что минимальное выделение ТССА соответствует максимальной глубине сварочной ванны, т. е. максимальному погружению дуги в основной металл [15].

Результаты исследований зависимостей уровней выделений СА от режима сварки и диаметра сварочной проволоки показали, что выделение ТССА снижается с уменьшением диаметра сварочной проволоки. Для каждого диаметра проволоки существуют определенные значения сварочных токов, при которых интенсивность выделения аэрозоля максимальная, а также область токов, обеспечивающая минимальное выделение аэрозоля. В ходе исследований зависимости интенсивности образования компонентов газообразной составляющей (ГССА) —monoоксида углерода и оксидов азота — от режима



сварки выявлено, что при максимальном погружении дуги в основной металл и уменьшении площади контакта сварочной дуги с окружающим дугу воздухом и защитным газом происходит их минимальное образование.

Результаты этих исследований позволили прийти в выводу, что уровень выделений СА определяется системой факторов, заключающихся в том, что интенсивность образования СА определяется, во-первых, мощностью дуги, т. е. режимом сварки, составами сварочного материала и защитной атмосферы, которые в свою очередь определяют вид переноса электродного металла и уровень его разбрызгивания, также влияющих на уровень выделения СА. Поэтому управление переносом электродного металла посредством выбора оптимальных составов сварочных материалов, защитного газа, применение сварки модулированным током и регулирование ее режима позволяют уменьшить выделение СА.

При выборе оптимальных составов сварочных материалов и режимов сварки необходимо руководствоваться системой состав–режим сварки, поскольку для каждой марки сварочных материалов существуют определенные режимы сварки, при которых выделяется минимальное количество аэрозоля [16]. Нами разработана система прогнозирования уровня выделений ТССА, необходимая при разработке и совершенствовании сварочных материалов и технологий [11, 12].

**Санитарно-технические мероприятия.** Технологические рекомендации позволяют снизить уровень выделений СА лишь в определенных пределах и во столько же раз уменьшить объем воздухообмена вентиляции, а следовательно, и затраты на вентиляцию. Однако, как правило, следя лишь технологическим рекомендациям, не всегда можно достичь снижения содержания вредных веществ до ПДК при существующих системах вентиляции. Необходимо также использовать другие санитарно-технические средства, наиболее эффективными из которых являются автономные фильтровентиляционные агрегаты (ФВА), предназначенные для улавливания выделяющегося при сварке аэрозоля с места его образования, очистки от него воздуха и возврата в то же помещение. По сравнению с общеобменной вентиляцией эти установки значительно эффективнее и позволяют получать существенный экономический эффект за счет снижения затрат на вентилирование и обогрев производственных помещений.

При невозможности применения ФВА и неэффективности существующих систем вентиляции следует использовать СИЗОД, наиболее эффективными и удобными в пользовании из которых являются маски сварщика с системой принудительной подачи очищенного воздуха в зону дыхания (под щиток).

Для разработки таких средств вентиляции и индивидуальной защиты органов дыхания, а также их правильного назначения в зависимости от способа сварки необходимо иметь данные о химических составах аэрозолей, образующихся при различных способах сварки. Причем применение ФВА с универсальными фильтрами, улавливающими как ТССА,

так и ГССА, не всегда целесообразно. Поэтому для создания высокоэффективных ФВА нового поколения и выбора соответствующих фильтрующих материалов нами выполнены исследования составов СА, образующихся при различных способах сварки. При этом учитывали, что ФВА и СИЗОД должны очищать воздух не только от ТССА, но и от токсичных газообразных компонентов СА (фтористый водород, тетрафтористый кремний, монооксид углерода, оксиды азота и озон), наличие которых в определенных комбинациях характерно для тех или иных способов сварки. Нами предложена классификация СА по химическому составу и способов сварки, при которых они образуются [5]. Для каждого класса определены способы нейтрализации СА и очистки от них воздуха. Поскольку для очистки от ТССА в основном применяют механическую фильтрацию на тканевых фильтрах, возможную лишь при некоторых способах сварки, например электродами с бесфтористым покрытием, то следовало найти новые фильтрующие материалы для нейтрализации газов. С этой целью исследовали фильтрационные характеристики различных зернистых материалов. В результате был предложен новый фильтрующий материал на основе природного минерала алюмосиликата — закарпатского цеолита-клиноптилолита [17]. Новый фильтрующий материал очищает воздух от монооксида углерода путем его каталитического окисления до диоксида, т. е. превращает вредный угарный газ в безвредный углекислый газ.

Разработаны средства защиты органов дыхания сварщиков и окружающей среды нового поколения для различных способов сварки и условий практически от всех классов СА: передвижные ФВА «Темп-2000» [18], «Мрія-1М» [19], зернистый фильтр [20], стационарная фильтровентиляционная система на основе ФВА «Темп-2000» [19], переносной вентиляционный агрегат «Шмель-2500» [21, 22].

ФВА «Темп-2000» и стационарная фильтровентиляционная система на его основе, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с МНТЦ «Темп», благодаря вентиляционному блоку специальной конструкции обеспечивают высокую эффективность улавливания СА, более длительный срок использования фильтрующего элемента и удобную очистку фильтра. Повышение срока службы фильтра обеспечивается путем применения ротационного осаждения крупных частиц аэрозоля специальным устройством, а более мелких — тканевым рукавным фильтром. Очистка фильтра от ТССА осуществляется автоматически в момент включения и выключения агрегата за счет резкого перепада давлений [18].

Усовершенствован известный ФВА «Мрія-1», разработанный в ФХИЗОСиЧ совместно с ИЭС им. Е. О. Патона. В качестве второй ступени фильтра для улавливания газов (монооксида углерода и оксидов азота) в нем использован наш фильтрующий элемент из модифицированного клиноптилолита [17].

Совместно с ФХИЗОСиЧ разработан одноступенчатый зернистый фильтр с использованием кли-



ноптилолита для очистки воздуха от ТССА и ГССА. Регенерация фильтра осуществляется путем резкого механического встряхивания фильтрующих элементов клиновым подъемно-падающим механизмом [20].

Для удаления СА из труднодоступных рабочих мест и замкнутых объемов (трюмов судов и т. п.) совместно с СКТБ ФХИ им. А. В. Богатского НАН Украины разработан малогабаритный переносной вентиляционный агрегат «Шмель-2500» [21], особенностью которого является наличие специального электрического блока-выпрямителя, понижающего напряжение от 220 до 12 В, что позволяет использовать данный агрегат в особо опасных условиях.

**Средства индивидуальной защиты органов дыхания.** Для условий, где использование средств вентиляции затруднено, разработаны следующие СИЗОД: шланговая маска сварщика с системой очистки и подачи воздуха [19], автономная маска сварщика с портативной системой подачи очищенного воздуха «Шмель-50» [23] и автономное устройство очистки и подачи воздуха в зону дыхания «Шмель-40» [19, 22].

Шланговая маска сварщика с системой очистки и подачи воздуха предназначена для защиты органов дыхания при работе на стационарных сварочных постах. Она эффективна благодаря высокой производительности подачи воздуха в зону дыхания (150...200 л/мин) и применению в ней двухступенчатого фильтра с использованием клиноптилолита, очищающего воздух от ТССА и ГССА [19].

При выполнении сварочных работ на нестационарных местах предложена защитная маска с портативной системой очистки и подачи воздуха (совместная разработка ИЭС им. Е. О. Патона и СКТБ ФХИ им. А. В. Богатского), получившая название «пояс-фильтр» [23]. Данное устройство, которое крепится на поясе сварщика, состоит из фильтра, вентиляционного агрегата, аккумуляторной системы электрического питания и зарядки.

Новое по конструкции устройство очистки и подачи воздуха в зону дыхания «Шмель-40» [19, 22] совмещает преимущества системы принудительной подачи очищенного воздуха и фильтрующего респиратора. Очищенный в поясе-фильтре воздух подается по воздуховоду, соединенному не со щитком сварщика, а с дыхательной полумаской, что гарантирует полную изоляцию органов дыхания от загрязненного аэрозолем воздуха при минимальной его подаче (30...40 л/мин), обеспечивающей требуемый дыхательный цикл человека. Эта система применяется в комплекте с защитным щитком любой марки, не приспособленным для подключения к поясу-фильтру.

Указанные средства местной вентиляции и СИЗОД прошли производственные испытания и внедрены на предприятиях Украины и России, в том числе на Заводе лифтов и заводе «Энергия» (г. Киев), акционерной судоходной компании «Укрречфлот», Монастырищенском машиностроительном заводе, предприятиях портов г. Одессы и г. Южного, на Воткинской ГЭС (Россия) и многих других предприятиях. Серийное производство средств местной вентиляции налажено в МНТЦ «Темп».

Таким образом, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования позволили предложить новые технологические рекомендации, которые заключаются в применении обоснованных способов сварки и сварочных материалов с учетом разработанной гигиенической классификации СА, обеспечивающих минимальную токсичность процесса. При разработке новых сварочных технологий необходимо стремиться к использованию сварочных материалов с пониженным содержанием основных токсичных компонентов; уменьшать окислительную способность защитного газа; выбирать режимы сварки, обеспечивающие минимальное выделение СА; применять источники тока с модуляцией сварочного тока. Выбор пользователем (а не специалистом по гигиене, экологии и охране труда) адекватных средств защиты сварщиков и окружающей среды от СА позволяет осуществить компьютерная система «ECO-WELD», основанная на классификации СА. Она выдает информацию о гигиенических характеристиках СА (интенсивность и удельное выделение, коэффициенты интенсивности и удельного выделения компонентов СА, объем воздухообмена вентиляции), а также (в зависимости от марки применяемого сварочного материала) о необходимых средствах местной вентиляции и индивидуальной защиты органов дыхания с указанием предприятий-изготовителей. Разработанные средства защиты прошли проверку в производственных условиях и внедряются в промышленности.

- Горбань Л. Н., Лубянова И. П. Интенсификация процессов дуговой сварки и проблемы сохранения здоровья сварщика // Свароч. пр-во. — 1991. — № 3. — С. 33–34.
- IIW VIII-1888-00. Incidence of cancer among welder and other shipyard workers with information on previous work history (JOEM) by T. E. Danielsen and all, provided by K. Birwon (USA) // JOEM. — 2000. — № 1. — Р. 101–109.
- Левченко О. Г. Процессы образования сварочного аэрозоля (Обзор) // Автомат. сварка. — 1996. — № 4. — С. 17–22.
- Левченко О. Г. Технологические способы снижения уровня образования сварочного аэрозоля (Обзор) // Свароч. пр-во. — 1998. — № 3. — С. — 32–38.
- Левченко О. Г. Классификация сварочных аэрозолей и выбор методов ихнейтрализации // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 38–41.
- Банк данных сварочных аэрозолей / В. Ф. Демченко, О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий, С. С. Козлитина // Сварщик. — 2000. — № 4. — С. 29.
- Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Мильченко и др. — Киев: Наук. думка, 1990. — 224 с.
- МУ № 1924–78. Гигиеническая оценка сварочных материалов и способов сварки, наплавки и резки металлов. — М.: Минздрав СССР, 1980. — 15 с.
- МУ № 4945–88. Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы). — М.: Минздрав СССР, 1989. — 150 с.
- Методика первичной санитарно-гигиенической оценки порошковых проволок / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. А. Супрун и др. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1983. — 28 с.
- Головатюк А. П., Левченко О. Г. Показатели валовых выделений сварочных аэрозолей и их применение на практике // Свароч. пр-во. — 1985. — № 10. — С. 40–41.
- Поддаецкий В. В., Головатюк А. П., Левченко О. Г. О механизме образования сварочного аэрозоля и прогнозировании его состава // Автомат. сварка. — 1989. — № 8. — С. 9–12.
- Левченко О. Г. Образование аэрозолей при сварке в CO<sub>2</sub> модулированным током // Там же. — 2000. — № 8. — С. 48–50.



14. Левченко О. Г., Метлицкий В. А. Ускоренная оценка выделения сварочных аэрозолей // Там же. — 1997. — № 4. — С. 40–45.
15. Левченко О. Г. Влияние технологических режимов сварки в CO<sub>2</sub> конструкционных сталей на выделение аэрозоля // Там же. — 1992. — № 9–10. — С. 31–33.
16. Головатюк А. П., Левченко О. Г. Гигиена труда при сварке в защитных газах. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — 24 с.
17. А. с. 1549583 СССР, МПК B01 D53/02. Способ получения сорбента для очистки газов отmonoокиси углерода / Л. А. Шевченко, А. А. Пащенко, Ю. И. Андрианов, А. П. Головатюк, О. Г. Левченко и др. — Опубл. 15.03.90, Бюл. № 10.
18. Фильтровентиляционный агрегат «Темп-2000» / О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий, В. Д. Рудой, Н. Ю. Агасьян // Автомат. сварка. — 1999. — № 5. — С. 64–65.
19. Левченко О. Г., Метлицкий В. А. Новые средства защиты от сварочных аэрозолей. — Киев: Экотехнология, 1999. — 48 с.
20. А. с. 1393455 СССР, МПК B01 D23/10. Зернистый фильтр / А. А. Эннан, А. Н. Бутвин, А. Ф. Квасенко, О. Г. Левченко. — Опубл. 07.05.88, Бюл. № 17.
21. Переносной вентиляционный агрегат для удаления сварочного аэрозоля из замкнутых объемов / Н. И. Ильинский, Ю. И. Андрианов, О. Г. Левченко и др. // Свароч. пр-во. — 1995. — № 9. — С. 35–36.
22. Левченко О. Г. Комплекс новых средств защиты органов дыхания сварщиков // Там же. — 1999. — № 10. — С. 42–45.
23. Защитная маска сварщика с портативной системой очистки и подачи воздуха в зону дыхания / О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий, Н. И. Ильинский и др. // Там же. — 1996. — № 7. — С. 32–33.

The paper presents a review of the work conducted at the Electric Welding Institute concerning welders' protection from the adverse impact of welding aerosols. The need for an integrated approach is substantiated, i.e. a combination of the technological and sanitary-technical measures with application of effective means of individual protection of the respiratory organs of welders.

Поступила в редакцию 08.11.2000



## СВАРКА КОНТРОЛЬ

30 октября – 2 ноября 2001 г.  
г. Уфа

**I Международная научно-техническая конференция**

**IV Международная специализированная выставка**

**I конкурс сварщиков России**

**Основные организаторы:**

Уфимский ГАТУ, Выставочный центр «Башэкспо» и Центр профессиональной подготовки специалистов «Свартэкс»

Тематика конференции включает широкий спектр вопросов в области сварки, контроля и реновации

**Тематика выставки:**

- ✓ сварочное оборудование, материалы, инструменты
- ✓ новейшие сварочные технологии
- ✓ средства автоматизации сварочных процессов
- ✓ программно-методическое обеспечение аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства
- ✓ технологии и оборудование для пайки, наплавки и термообработки
- ✓ промышленная безопасность сварочного производства
- ✓ технологии и аппаратура неразрушающего контроля и диагностики продления ресурса изделий и использования отходов производства в качестве сырья
- ✓ технологии и оборудование для утилизации и переработки отходов
- ✓ родственные технологии
- ✓ специализированная литература



Справки по тел.: (3472) 53 41 08, 53 41 10, 52 53 86; факс: (3472) 52 55 93;  
E-mail: basheexpo@ufanet.ru

450080, Россия, Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, 195, а/я 144



# ТОНКОЛИСТОВЫЕ СВАРНЫЕ СОСТАВНЫЕ ЗАГОТОВКИ «TAILORED BLANKS» В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

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

Представлен обзор зарубежной периодики 1990-х годов, посвященный технологии производства сварных составных заготовок «Tailored Blanks», включая выбор исходного материала, его раскрой, особенности и разновидности процессов соединений, контроля и штамповки. Даны сведения об объемах производства и рынке составных заготовок.

**Ключевые слова:** лазерная, электронно-лучевая, вакуумная и контактная шовная сварка, заготовки, автомобилестроение

В производстве и сооружении сварных изделий и конструкций неотъемлемым конструктивно-технологическим элементом являются сварные заготовки. Членение конструкций на отдельные части осуществляется еще на стадии проектирования с учетом обеспечения технологичности их производства, эффективного использования материалов, транспортабельности, упрощения монтажа и др.

По мере создания новых и развития существующих способов сварки расширялись возможности получения рациональных сварных заготовок. Так, применение автоматической дуговой сварки под флюсом дало возможность изготавливать крупногабаритные листовые заготовки (полотница, карты) в судостроении, трубном производстве и резервуаростроении. В частности, создание метода рулонирования резервуарных заготовок в виде полотниц, свариваемых под флюсом из листов толщиной 4...12 мм, позволило решить проблему индустриализации производства и монтажа резервуаров большой вместимости.

Технология электрошлаковой сварки открыла возможность производства крупногабаритных (толщиной до 2000 мм) сварно-кованных, сварно-литых и других заготовок в тяжелом и энергетическом машиностроении.

Производство биметаллических листовых заготовок и переходников из разнородных материалов основано сегодня на использовании сварки взрывом. Эта технология позволяет получать би- и триметаллические заготовки из материалов, практически не свариваемых обычными способами.

Современные лучевые технологии сварки и резки — электронно-лучевая (ЭЛС) и лазерная — открыли новые технологические возможности в производстве сварных конструкций и их фрагментов из прогрессивных материалов. ЭЛС в вакууме широко применяется для изготовления заготовок толщиной до 400 мм. Наиболее развитые области применения ЭЛС — авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, энергетическое и общее машиностроение и др.

В последние годы значительно повысилась конкурентоспособность такой лучевой технологии, как лазерная сварка, особенно при соединении и резке материалов сравнительно малых толщин. Лазерная технология находит наиболее широкое применение в современной автомобильной индустрии, где постепенно вытесняет точечную контактную сварку и даже сварку в защитных газах. В середине 1990-х гг. в мировой автомобильной промышленности уже эксплуатировалось более 5000 лазерных обрабатывающих систем (резка, сварка, поверхностная обработка и др.). Именно лазерная технология сварки с начала 1990-х гг. открыла новые возможности в производстве комбинированных составных листовых заготовок для последующей штамповки с глубокой вытяжкой элементов легковых автомобилей (кузова, рамы и др.). Такие тонколистовые сварные составные заготовки (ССЗ) заданных размеров и конфигурации в мировой практике автомобилестроения получили название «Tailored Blanks» (TB) [1–4 и др.] или «Tailor Welded Blanks» (TWB) [5–7].

Тонколистовые ССЗ «Tailored Blanks» изготавливаются с помощью сварки из двух, трех и более точно раскроенных пластин металла с различными толщинами, физико-механическими свойствами и состояниями поверхности. Заготовки ССЗ можно рассматривать не только как полуфабрикат для штамповки деталей кузова, но и как металлоизделие с улучшенными служебными характеристиками, позволяющими не только снизить массу автомобиля, но и повысить его конструкционную надежность и безопасность эксплуатации [8, 9].

Первое промышленное применение лазерной сварки для изготовления тонколистовых штампемых заготовок как прообраза ССЗ связывают с опытом металлургов фирмы «Thyssen Stahl». В начале 1980-х гг. на одном из предприятий этой фирмы, где с помощью контактной роликовой сварки производили укрупнение заготовок для штамповки днищ автомобилей, была применена лазерная сварка. Из двух одинаковых лент лазером была сварена заготовка панели днища шириной более 2 м для автомобиля «Audi» [1, 6]. Начиная с 1985 г. фирма «Thyssen Stahl» поставила автомобилестроителям более 3 млн таких крупногабаритных сварных тонколистовых панелей из оцинкованной стали [10].



Опыт применения лазернойстыковой сварки тонколистового металла различного качества был положен в основу промышленной технологии производства специальных ССЗ заданных типоразмеров для глубокой вытяжки кузовных элементов легковых автомобилей. На рис. 1 представлена каноническая схема производства ССЗ-ТВ, предложенная металлургической фирмой «Thyssen Stahl» [1]. По этой схеме непосредственно на металлургическом заводе ленты различных марок сталей с различными толщинами и качеством поверхности разрезают на заданные элементы, которые затем сваривают в единый лист или заготовку. В этой технологии, в частности, отражается современная идея немецких металлургов «сталь-плюс», направленная на расширение областей применения стального проката и заглавовременную реакцию на меняющуюся конъюнктуру рынка. Суть ее состоит в том, что металлурги предлагают потребителю металлопродукции, наряду с поставкой обычного сортамента металла, также готовые металлоизделия: трубы, многослойные панели и ССЗ, «скроенные» точно по заказу [7, 11].

Прорыв в области реального применения нескольких типоразмеров сварных тонколистовых заготовок в серийном производстве автомобилей осуществила в 1990 г. фирма «Volkswagen» (VW) с участием фирмы «Thyssen Stahl». Затем за сравнительно короткий (менее 10 лет) период ССЗ-ТВ получили распространение в производстве кузовов ведущих автомобильных компаний мира (VW, BMW, GM, «Ford», «Audi», «Honda», «Toyota», «Fiat», «Renault», «Volvo», «Chrysler» и др.), использующих ССЗ и при разработке своих новых моделей [6]. При этом членение кузова на фрагменты, штампаемые из ССЗ, практически однотипно для различных моделей автомобилей. На рис. 2 показаны примеры использования тонколистовых сварных заготовок для штамповки конкретных элементов кузова легкового автомобиля [9, 12].

Сварные тонколистовые заготовки сегодня уже приобрели решающее значение в автомобильной промышленности, так как их применение способствует снижению общей металлоемкости кузова, повышению его эксплуатационной надежности и сокращению производственных затрат на его изготовление. Кроме того, появляется возможность пере-

дачи части заготовительного производства непосредственно поставщикам металлоконструкций.

Основные преимущества сварных заготовок в производстве легковых автомобилей, по данным работ [2, 8, 9 и др.], можно свести к следующим:

- снижение массы элементов и общего расхода материалов по сравнению с обычной конструкцией легкового автомобиля;

- сокращение количества отдельных деталей, различных конструктивных накладок и усиливающих элементов;

- повышение точности геометрии конструктивных и сборочных элементов, оптимизация допусков;

- функциональное улучшение конструкции благодаря стабилизации качества и повышению надежности конструкции за счет обеспечения равнопрочности элементов при статической и ударных нагрузках, а также увеличение их усталостной прочности;

- замена нахлесточных (точечных и прерывистых) сварных соединений стыковыми, обеспечивающая сокращение объема работ по герметизации соединений по сравнению с традиционной конструкцией кузова;

- существенное повышение коррозионной стойкости кузова и его отдельных частей.

В дополнение к перечисленным преимуществам следует также отнести такие экономические выгоды от применения ССЗ-ТВ: сокращение производственных затрат на изготовление инструмента для формообразования, снижение стоимости штампопрессовых операций, уменьшение затрат на сборочно-сварочные работы и их объема при повышении качества. По сравнению с традиционным производством кузовов сокращаются затраты на транспортные операции, складирование металла и т. п. [4, 10].

**Технология производства ССЗ** независимо от модели и конструкции кузова автомобиля, технологической схемы его изготовления и общих объемов производства включает следующие основные этапы.

**Конструирование** (как правило, компьютерное) выполняется «точно по заказу» для конкретного элемента или узла кузова с учетом условий их реальной эксплуатации, включая возможные экстремальные нагрузки [2, 4, 10, 13, 14]. Конструирование ССЗ направлено на обеспечение равнопрочности в основных критических сечениях, раци-



Рис. 1. Принципиальная схема производства тонколистовых заготовок «Tailored Blanks» заданных размеров



Рис. 2. Конструктивные фрагменты кузова легкового автомобиля, штампаемые из заготовок «Tailored Blanks»



ональное использование физико-механических свойств применяемых тонколистовых материалов, оптимальное расположение и минимальную протяженность сварных швов, экономный раскрой элементов и повышение общего коэффициента использования материалов. Особое внимание при конструкторской разработке ССЗ обращают на обеспечение необходимой точности сборки стыков элементов и на расположение сварных соединений в местах наибольшей вытяжки при штамповке. Последнее во многом определяет бездефектность формирования заготовки [3, 15].

*Выбор исходного материала для ССЗ* неразрывно связан с этапом их конструирования. В основном применяется холоднокатаная низкоуглеродистая (до 0,02 % С) «мягкая» сталь для глубокой вытяжки толщиной 0,65...2,50 мм. Наряду с ней в заготовках используют тонколистовую сталь повышенной и высокой прочности с пределом текучести 210...800 МПа, отличающуюся удовлетворительной пластичностью и хорошей свариваемостью. Для элементов конструкций кузова, которые эксплуатируются при повышенной влажности, в заготовки вставляют фрагменты из стали с двухсторонним цинковым покрытием. В качестве оцинкованной стали, как правило, применяют стали повышенной и высокой прочности. Широкая номенклатура современных тонколистовых сталей различных прочности и качества покрытий поверхности создает большие возможности для конструирования заготовок. Дифференцированное использование в ССЗ сталей с повышенной прочностью и цинковым покрытием, имеющих, как правило, более высокую стойкость, обеспечивает дополнительный экономический эффект [2, 7, 8, 14].

Объемы применения алюминиевых сплавов в автомобильной промышленности постепенно увеличиваются. Так, в автомобилестроении ФРГ в 1980–1990 гг. доля алюминиевых сплавов составляла 5 % общего объема использования конструкционных материалов, а в 1995–2000 гг. — 9 % [7]. Процесс постепенной «алюминизации» уже охватил и производство кузовов легковых автомобилей, что, естественно, выдвинуло проблему изготовления ССЗ из тонколистовых алюминиевых сплавов. Ряд металлургических и автомобильных фирм США, Канады и ФРГ наладил производство в небольших объемах тонколистовых ССЗ из алюминиево-магниевых сплавов (типа AA 5182) толщиной 0,8; 1,0 и 1,5 мм [7, 12, 15].

*Раскрой металлического листа* или ленты толщиной 0,65...2,50 мм на элементы заданных размеров и геометрии в основном производится на прессах или пресс-ножницах, что обеспечивает необходимую прецизионность резки и хорошее качество кромок реза. Последнее особенно важно для последующей лазерной сварки элементов встык без зазора. Наряду с механической резкой в производстве ССЗ применяют лазерную и гидроабразивную вырезку элементов заготовок [4, 5, 10].

*Соединение тонколистовых элементов* при производстве размерных ССЗ или при обычном укрупнении однородных заготовок под штамповку включает ряд процессов сварки, которые несмотря

на принципиальные отличия по своим физическим принципам приемлемы для выполнения технологической операции по сварке заготовок. Эти процессы, кроме безусловного требования к их экономической эффективности, должны также отвечать следующим требованиям [4]:

сварной шов должен быть равномерным по длине, а его толщина не должна превышать толщину исходного материала;

сварное соединение должно сохранять пластичность и способность к формуизменению при штамповке;

металл сварного соединения по прочности не должен уступать исходному металлу элемента ССЗ с минимальной прочностью.

В соответствии с современным уровнем сварочной техники при производстве стальных ССЗ применяют следующие технологические процессы [9, 16–18]:

контактную роликовую сварку с раздавливанием кромок;

прессовую сварку с индукционным нагревом;

argonодуговую сварку неплавящимся электродом (WIG);

лазерную сварку;

вневакуумную (в атмосфере) электронно-лучевую сварку (ВВ ЭЛС);

гибридные технологии, например лазер + WIG.

Сварку составных заготовок из сплавов алюминия производят с применением СО<sub>2</sub>-лазера для малых толщин, а при толщинах более 1,0...1,5 мм рекомендуется процесс WIG выполнять на постоянном токе в аргоногелиевой смеси [12, 17].

В серийном производстве ССЗ сегодня выпускаются тонколистовые заготовки исключительно с прямолинейными сварными стыками. Это отчасти определяется и существующим типом установок, и линией по резке, сборке и сварке заготовок. Дальнейшая конструкторская оптимизация заготовок предполагает также применение нелинейных, замкнутых и контурных швов для приварки или сварки усиливающих сечение элементов ССЗ (рис. 3). Соответственно изменится концепция сварочного оборудования, повысятся требования к сборке элементов под сварку. Следует заметить, что усложнение конфигурации сварных швов и соединений допустимо только при использовании лучевых или гибридных технологий.

*Контроль и испытание ССЗ* имеют определенную специфику, учитывая малую толщину материала, применяемые способы сварки и условия последующей работы соединений в процессе глубокой вытяжки при их формуизменении в штампах.

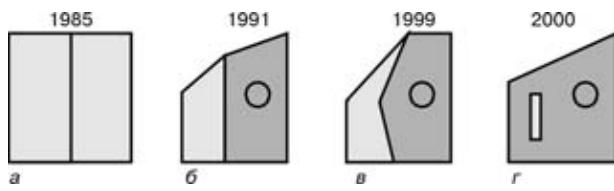


Рис. 3. Этапы развития конструкций ССЗ-ТВ: а — укрупненный формат; б — с прямолинейным сварным швом; в — с нелинейным сварным швом; г — со вставным элементом



Качество собственно сварного стыкового шва, выполненного лазером на тонком ( $0,8 \dots 1,5$  мм) металле ССЗ, может быть оценено с помощью сухого ультразвукового контроля с использованием EMUS-техники (метод электромагнитной акустики с использованием горизонтально поляризованных плоских волн). В случае обнаружения при ультразвуковом контроле дефектов в сварном шве их дополнительно идентифицируют при помощи микротомографического просвечивания [19].

Качество швов ССЗ, выполненных роликовой сваркой с раздавливанием кромок, оценивается непосредственно в ходе процесса (как при обычной роликовой сварке) с применением систем контроля на основе алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей.

Испытания готовых ССЗ в первую очередь включают всесторонние исследования, в том числе физико-механических свойств металла сварного шва и сварных соединений. При разработке технологии сварки и при выборочном производственном контроле качества сварных соединений заготовок в основном оценивают прочность и пластичность соединения, а также пригодность конструктивных фрагментов заготовки со сварным швом к глубокой вытяжке. Испытания на растяжение производят на плоских образцах ( $\delta_1 = \delta_2$  и  $\delta_1 \neq \delta_2$ ) с поперечным и продольным расположением сварного шва. Способность к глубокой вытяжке при штамповке оценивают при механических (по Эриксону) или гидравлических испытаниях на выдавливание.

В образцах на выдавливание сварной шов обычно располагается экваториально. При таких исследованиях также оценивают влияние разнотолщины сварных элементов, превышения утолщения сварного шва и упрочнения после его раскатки, а также влияние сопутствующей термообработки сварного соединения и др. [4, 15, 20].

**Формообразование ССЗ** в готовый фрагмент кузова автомобиля осуществляется путем их штамповки. Конструкция штампового инструмента для глубокой вытяжки ССЗ имеет ряд отличий, определя-

емых особенностями сварной разнотолщинной заготовки. При проектировании и изготовлении штампов для формообразования ССЗ учитывают ее разнотолщинность, различие механических свойств металла отдельных элементов, способ сварки и свойства металла сварного шва, результаты механических испытаний сварных соединений на статическое растяжение и глубокую вытяжку, а также ряд общих положений о поведении сварного соединения при штамповке. В частности, при вытяжке заготовки в штампе трещины и разрывы металла чаще образуются по более тонкому металлу и вдоль шва. На узких швах, выполненных лазером, при вытяжке возможно возникновение поперечных трещин. Штампы для формообразования ССЗ рекомендуется проектировать так, чтобы сварные соединения располагались только перпендикулярно или под определенным углом к краю матрицы. На рис. 4 представлена оптимизированная по геометрии и расположению сварных соединений в штампе ССЗ, сваренная лазером из трех частей (St405,  $\delta = 1,0 + 1,5 + 1,0$  мм) [3, 15].

**Технологические особенности сварки ССЗ** из стали и алюминиевых сплавов, а также совершенствование соответствующих процессов сварки являются предметом постоянного внимания автомобилестроителей, металлургов, технологов-сварщиков и разработчиков сварочного оборудования. В соответствии с современным уровнем промышленного производства ССЗ в основном находят применение три способа сварки: контактная роликовая с раздавливанием кромок, лазерная и электронно-лучевая в атмосфере. Рассмотрим некоторые особенности этих процессов.

**Контактная роликовая сварка с раздавливанием кромок** является одной из разновидностей процесса обычной шовно-роликовой сварки. В отличие от последней свариваемые листовые элементы располагают между роликовыми электродами с очень небольшой нахлесткой (~1,2δ). В процессе образования сварного шва интенсивно разогреваются и края нахлестки, которые раздавливаются усилием

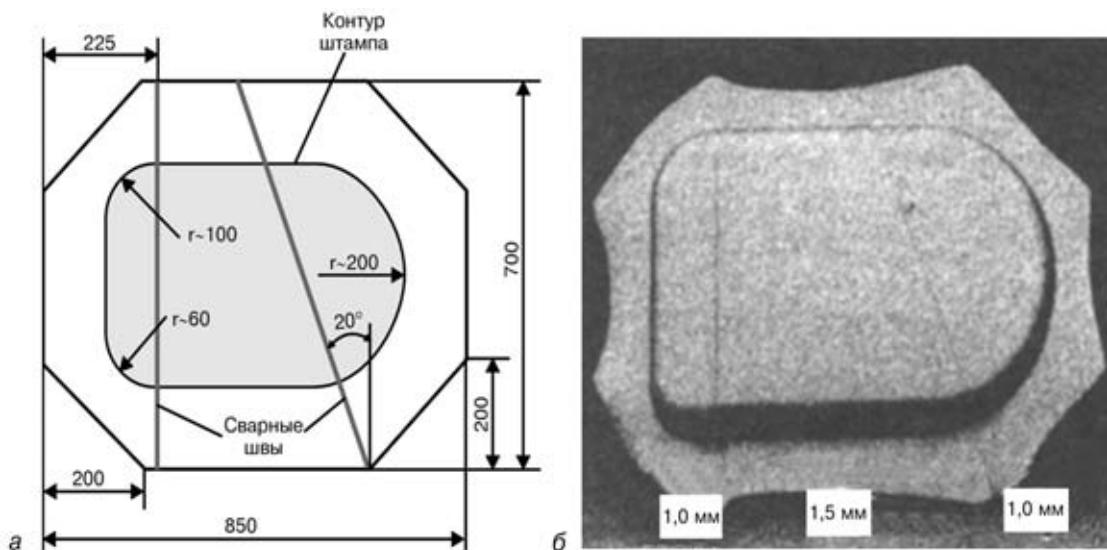


Рис. 4. Оптимизированная по условиям штамповки размерная ССЗ, сваренная из трех элементов: *а* — схема тонколистовой заготовки; *б* — отштампованный деталь



Рис. 5. Объемы производства в Западной Европе ССЗ-ТВ, свариваемых контактной роликовой и лазерной сваркой, включая собственное производство автомобилестроительной промышленности

сварочных роликов с образованием небольшого утолщения. При необходимости утолщение сварного соединения может быть устранено в результате его последующей механической раскатки в горячем состоянии сразу после сварки или за счет отдельной технологической операции. Скорость шовной сварки с раздавливанием находится в пределах 4...8 м/мин.

Определенным преимуществом этого способа сварки является то, что для протяженного соединения тонколистовой стали не предъявляются повышенные требования к качеству кромок после резки и точности сборки нахлесточного соединения под сварку (допуск  $\pm 0,5$  мм). Сварной шов и соединение в целом имеют большую ширину, чем при лазерной сварке. Сравнительно низкие значения твердости металла сварного шва и металла околошовной зоны обеспечивают достаточно высокую пластичность соединения, что важно при последующей штамповке сварных заготовок [8, 5, 12].

Процесс применим и для сварки заготовок из оцинкованной стали (требуется только увеличение сжатия), однако ширина выгорающего цинкового покрытия в зоне сварного шва в этом случае значительно больше, чем при лазерной сварке. Кроме того, для сохранения стабильного сопротивления в месте контакта ролика с металлом необходимо следить за чистотой рабочей поверхности сварочных роликов и обеспечивать их механическую очистку от налипающих остатков покрытий. Это существенный недостаток данной технологии [8, 10].

Роликовая сварка с раздавливанием кромок, применяемая в производстве ССЗ, постепенно вытесняется лазерной. Так, например, фирма VW с 1991 г. преимущественно использовала роликовую сварку, а с 1996 г. в основном перешла на лазерную [10]. Такое радикальное решение было принято ис-

ходя из ряда экономико-технологических соображений. В будущем эта фирма предполагает использовать шовную сварку только в производстве заготовок для продольных балок и стоек (колонок). Лазерная и роликовая сварка с раздавливанием кромок могут дополнять друг друга в производстве ССЗ. В настоящее время ряд европейских (VW, «Audi», «Fiat», BMW и др.) и японских («Toyota», «Mitsubishi» и «Daihatsu») автомобильных фирм используют обе технологии. Известные фирмы по производству ССЗ «Thyssen Tailored Blanks» (ФРГ) и «Solblank» (Испания) также еще поставляют ряду европейских автомобильных компаний заготовки под штамповку, сваренные роликовой сваркой с раздавливанием кромок [21, 22].

В США фирма «Prescision Blank Welding Co.» производит ССЗ для автомобильной промышленности, используя оборудование для роликовой сварки фирмы «Soudronik Ltd.». Фирма «Mediana Blanking, Inc.» изготавливает размерные ССЗ для заводов фирмы «General Motors» с 1983 г. по технологии роликовой сварки с раздавливанием кромок и с одновременной горячей раскаткой утолщения шва [12].

В последние годы новые инвестиции вкладываются преимущественно в создание установок и линий для лазерной сварки ССЗ. Как видно из рис. 5, объем производства заготовок, соединяемых контактной роликовой сваркой в 1997–2000 гг., почти стабилен, а выпуск заготовок с использованием лазера непрерывно возрастает [10].

**Лазерная сварка** основана на бесконтактном нагреве свариваемого металла световым пучком с высокой плотностью энергии. Небольшой диаметр фокусируемого лазерного пучка (менее 0,4...0,5 мм) позволяет выполнять очень узкие (0,5...1,5 мм)стыковые швы на листах толщиной 0,1...2,0 мм со скоростью 6...8 м/мин (CO<sub>2</sub>-лазер, 4 кВт). Сварной шов имеет хороший вид, небольшое утолщение ( $\leq 0,05\delta$ ) и сохраняет необходимую коррозионную стойкость [4]. Лазерная сварка при соединении пластин ССЗ различной толщины (с соотношением  $\leq 1:3$ ) обеспечивает получение сварного шва с плавным переходом (рис. 6).

Несмотря на повышенную твердость металла шва и околошовной зоны, сварные соединения ССЗ, выполненные лазерной сваркой, отличаются достаточной пластичностью и хорошей штампаемостью [8, 9]. Для улучшения хорошей штампаемости сварных соединений заготовок из высокопрочных сталей некоторых марок рекомендуется послесвароч-

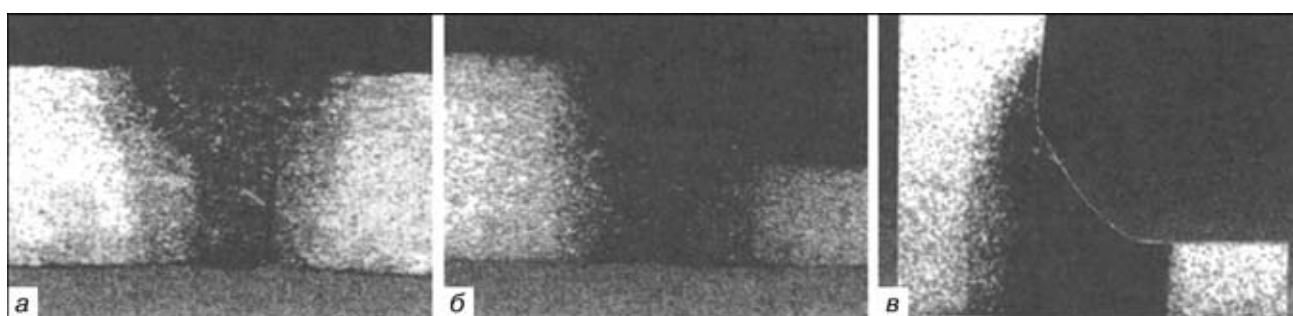


Рис. 6. Поперечное сечение сварных соединений ССЗ, выполненных лазерной сваркой: *a* — холоднокатаная сталь St 14,  $\delta = 1,2+1,2$  мм; *b* — сталь St 14,  $\delta = 1,2$  мм + сталь St 14,  $\delta = 0,6$  мм; *c* — сталь St 14,  $\delta = 2,0$  мм + оцинкованная сталь ZStE220P,  $\delta = 0,6$  мм

ная термообработка соединения расфокусированным лазерным пучком пониженной мощности [20].

В качестве защитного газа при лазерной сварке стальных заготовок могут применяться гелий, аргон или их смесь ( $\text{Ar} + 7,5\% \text{ He}$ ). Расход газа при  $v_{\text{св}} = 5...6 \text{ м/мин}$  в среднем составляет  $15...16 \text{ л/мин}$ . Упомянутые защитные газы практически не влияют на форму и качество сварного шва, а также на способность сварного соединения к глубокой вытяжке, оцениваемую по методу Эриксона [2, 4].

Технология лазерной сварки металла малых толщин стыковых соединений предъявляет высокие требования к качеству сборки и зажатию стыка. Кромки свариваемых элементов заготовки должны быть строго прямолинейны, без заусенец, вмятин и т.п. Ни одна из кромок не может иметь волнистость более  $0,04 \text{ мм}$ , а зазор в стыке не должен превышать  $0,08 \text{ мм}$  [4, 9, 12]. Такой допуск на зазор между сстыкованными кромками рекомендуется при лазерной сварке ССЗ из металла толщиной  $0,5...3,0 \text{ мм}$ , хотя общепринятая норма —  $< 10\% \delta$ .

Большие затраты на прецизионную подготовку кромок могут быть уменьшены благодаря применению комбинированного (гибридного) процесса, сочетающего лазерную сварку с аргонодуговой неплавящимся электродом. Гибридный процесс на основе сочетания Nd:YAG-лазера и WIG-процесса, обеспечивающий лучшее заполнение зазора и более «мягкий» режим при сохранении высокой скорости сварки применительно к производству ССЗ-ТВ, разрабатывается в Фраунхоферовском институте лазерной техники [16, 17].

При лазерной сварке элементов заготовок из оцинкованной стали выгорает очень узкая полоска покрытия в зоне, непосредственно примыкающей к сварному шву. Для обеспечения качественных соединений оцинкованной стали и уменьшения вредных выделений иногда практикуется предварительная зачистка кромок от покрытия всего на  $0,5...1,0 \text{ мм}$  [8].

Для соединения пластин ССЗ из алюминиевомагниевых сплавов толщиной  $0,8...1,5 \text{ мм}$  рекомендуется преимущественно лазерная сварка и вневакуумная (ВВ) ЭЛС. Требования к качеству подготовки кромок, точности сборки стыка для лазерной сварки алюминия такие же, как и для стали. С учетом более высокой теплоемкости алюминия необходима большая, чем при сварке стали, мощность лазера и плотность энергии, составляющая  $1...2 \text{ МВт/см}^2$ . Применяют как CO<sub>2</sub>-так и Nd:YAG-лазеры [12, 15, 23]. Поскольку сварные швы на алюминии склонны к пористости, в Эдисоновском институте сварки ведутся исследования по модификации лазерной оптики, обеспечивающей получение плотных швов на ССЗ [23].

Производственные агрегаты и линии для лазерной сварки ССЗ имеют различные схемы и последовательность технологических операций. Они в основном оснащаются сварочным оборудованием на основе CO<sub>2</sub>-лазера мощностью  $4...6 \text{ кВт}$  и реже  $10 \text{ кВт}$  [12, 16]. В Западной Европе такие лазеры поставляет известная фирма «Trumpf Lasertechnic» (ФРГ), которая ежегодно выпускает более тысячи CO<sub>2</sub>-лазеров ( $\leq 30 \text{ кВт}$ ) и Nd:YAG-лазеров ( $\leq 4 \text{ кВт}$ ). На североамериканском континенте про-

изводство лазерных систем для сварки ССЗ осуществляют крупнейшие фирмы США «Rofin-Sinar», «Siemens Co.», а также «Convergent-Energy» и др. [12].

Первый британский агрегат для выпуска ССЗ оснащен CO<sub>2</sub>-лазером «ЭКОСС» мощностью  $5 \text{ кВт}$  и системой «летающей» оптики фирмы «Held». Зажимы-фиксаторы позволяют сваривать швы длиной до  $2,25 \text{ м}$ , рядом расположен стол  $2,5 \times 2,5 \text{ м}$  для лазерного раскряя составных элементов или резки сваренных заготовок. Научно-технической основой этой технологии стали результаты программы Европа-194 «Промышленное применение высокомощных CO<sub>2</sub>-лазеров», завершенной в 1994 г. Британским институтом сварки совместно с рядом институтов и промышленных фирм [8].

Применение прогрессивных Nd:YAG-лазеров ранее сдерживалось из-за сравнительно высокой стоимости, однако некоторые производители заготовок уже успешно используют их в производстве. Так, например, американская компания «Utilase Blank Welding Technologies» на одной из линий сварки заготовок установила Nd:YAG-лазер мощностью  $3 \text{ кВт}$  [5, 12, 16].

Последние разработки в области лазерных технологических систем обеспечивают возможности передачи пучка мощностью до  $4...5 \text{ кВт}$  к обрабатываемому изделию через оптоволоконный световод, что дает заметные преимущества в отношении гибкости и общей стоимости системы, в том числе для роботизированных комплексов и агрегатов сварки и последующей термообработки или резки ССЗ [5, 6].

*Электронно-лучевая сварка в атмосфере (внекакуумная)* как разновидность лучевых технологий, несмотря на определенный скепсис специалистов по поводу промышленного использования этого процесса, в настоящее время достаточно широко разрабатывается применительно к сварке тонколистовых ССЗ [9, 12, 16, 18]. Еще в 1995 г. на ежегодной сварочной выставке AWS американской компанией PTR была представлена технология ВВ ЭЛС, в том числе тонколистовых заготовок из стальных и алюминиевых элементов [12]. По мнению разработчиков, ВВ ЭЛС интересна как альтернативный процесс для серийного производства тонколистовых ССЗ. Это достаточно универсальный и высокопроизводительный способ выполнения стыковых соединений малых и средних толщин, основанный на применении электронной пушки специальной конструкции со ступенчатой, дифференциальной откачкой вакуума. Мощность пушек —  $15$  и  $30 \text{ кВт}$  при ускоряющем напряжении соответственно  $150$  и  $175 \text{ кВ}$  [16, 18]. Небольшой диаметр пучка, фокусируемого на изделии, позволяет и при ВВ ЭЛС получать узкие швы. Во избежание существенного расфокусирования пучка в атмосфере рабочее расстояние между соплом и свариваемой заготовкой рекомендуется поддерживать не более  $10 \text{ мм}$ . Для защиты от образующегося при ВВ ЭЛС рентгеновского излучения на агрегатах предусматриваются специальные защитные экраны [9, 16].

При ВВ ЭЛС требования к подготовке кромок и стыка значительно меньше, чем при лазерной сварке. Сканирование электронным пучком попе-



## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

рек оси стыка способствует нагреву более широкой зоны и лучшему заполнению зазоров в стыке, а также в отдельных случаях позволяет исключать послесварочную термообработку. Процесс ВВ ЭЛС более производителен, чем роликовая контактная с раздавливанием кромок и лазерная сварка тонколистовых заготовок. Так, при использовании электронно-лучевой пушки мощностью 15 кВт с ускоряющим напряжением 150 кВ скорость сварки заготовок из сталей St1405/ZStE260,  $\delta = 0,7 / 1,45$  мм составляет 21,6 м/мин при мощности пучка 15 кВт, а при сварке заготовок из алюминиевых сплавов AlSi<sub>2</sub>/AlMg<sub>5</sub>,  $\delta = 1,25 / 3,0$  мм рабочая скорость сварки достигает 10 м/мин при мощности пучка 9 кВт [8].

Среди рекомендемых областей применения ВВ ЭЛС, определяемых современным уровнем разработки электросварочного оборудования, на первом месте находится массовое производство тонколистовых ССЗ. В Германии уже эксплуатируется одна промышленная установка ВВ ЭЛС (30 кВт, 75 кВ). В США они распространены больше (смонтированы уже десятки подобных установок) [6].

Выбор определенного процесса сварки при организации производства ССЗ обычно базируется не только на оценке технологических возможностей, но и на анализе преимуществ для конкретных элементов кузова (днище, стойки, двери и др.). Большое значение имеет и стоимостное сравнение технологий в зависимости от их типажа и объемов производства [5, 12].

**Производство и рынок сварных составных заготовок.** Технология производства тонколистовых ССЗ является одной из перспективных в автомобильной промышленности Западной Европы, США и Японии. Начиная с 1990 г. непрерывно растут объемы производства и применения таких заготовок, увеличивается количество предприятий, специализирующихся на изготовлении ССЗ-ТВ, а также предприятий, выпускающих линии и агрегаты по резке, сборке, сварке и штамповке заготовок заданных размеров и конфигураций.

О динамике роста рынка сварных составных заготовок в Западной Европе можно судить из рис. 7.

Европейский рынок ССЗ сегодня лидирует в мире и наиболее ярко отражает общемировую тенденцию роста использования таких заготовок в автомобильной промышленности. В 1999 г. объем поставок металлургической промышленностью ССЗ превысил 350 тыс. т, а в 2000 г. ожидалась реализация заказов в объеме около 450 тыс. т. К этому

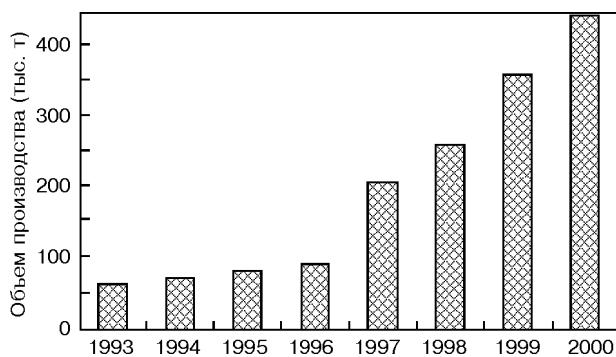


Рис. 7. Рост производства ССЗ-ТВ в Западной Европе

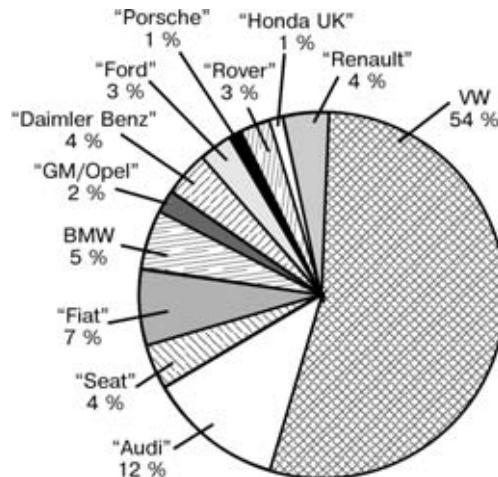


Рис. 8. Объемы применения ССЗ-ТВ различными автомобильными фирмами Западной Европы (1998 г., общий объем 250 тыс. т; данные об объемах собственного производства ССЗ-ТВ на фирмах не включены)

еще следует добавить не менее 70...80 тыс. т заготовок, производимых непосредственно европейскими автомобильными фирмами (например «Fiat», «Volvo», «Renault», «Ford»). Объемы применения ССЗ при производстве различных марок автомобилей в 1998 г. [10] представлены на рис. 8.

Большую часть заготовок автомобильной промышленности Западной Европы ныне поставляют дочерние специализированные предприятия крупных металлургических компаний «Thyssen Fugetechnik», «Heesch Platinen» и «Solblank (Sollac) Taylor» [10]. Следует отметить, что все они в зависимости от типоразмеров заготовок применяют лазерную и контактную сварку (см. рис. 5). Интенсивно наращивает мощности по выпуску заготовок итальянская металлургическая компания «Sollac», которая на своем дочернем предприятии «Solblank» уже запустила 14 производственных линий лазерной сварки и готовит запуск еще четырех в Великобритании и Северной Америке мощностью примерно 20000 т/год каждая [22]. Крупные металлургические объединения активно создают совместные предприятия в других странах. Так, например, фирма «Thyssen Tailored Blanks» создала совместное предприятие в Индонезии и Детройте (США), где с фирмой «Worthington» запустила линию по лазерной сварке тонколистовых ССЗ стенок и дверей к новой модели автомобиля «Cadillac».

В Великобритании промышленная группа «British Steel» организовала ряд центров по обслуживанию пользователей металлопродукции, в том числе специальное предприятие-центр по обеспечению автомобилестроителей ССЗ. За последние годы «British Steel» создала еще одно предприятие мощностью 125 тыс. т заготовок в год с удвоением объема выпуска к 2001 г., которое поставляет сварные заготовки также на автозавод «Toyota» в Турции (партии заготовок поступают в специальных поддонах-контейнерах, защищающих их от влаги) [8, 13, 25].

В США первым крупным пользователем тонколистовых ССЗ стала «Детройтская тройка» («Ford», GM, «Chrysler»). В 1994 г. они использо-

вали около 3 млн заготовок, а в 1997 г. — уже более 13 млн ССЗ в год. Динамика роста производства и поставки на рынок ССЗ в поштучном исчислении представлена на рис. 9. В 2002 г. ожидается поставка автомобилестроителям более 180 млн заготовок. За 10 лет объемы выпуска заготовок вырастут почти в 18 раз [24].

Производство ССЗ в США в основном сосредоточено на независимых специализированных фирмах, сотрудничающих с компанией «Armco Steel». Лидерами по применению лазерных технологий в производстве ССЗ являются «Utilase Blank Welding Technologies, Inc.» и «Thyssen-Worthington Blank Co.» (TWB). Кроме того, ССЗ производит фирма «Precision Blank Welding Co.» (контактная сварка с раздавливанием кромок и ВВ ЭЛС), «Mediana Blanking, Inc.» и др. В последние годы фирма «Utilase» расширила свои производственные возможности с шести сборочно-сварочных линий, каждая из которых имеет мощность около 250 тыс. заготовок в год и занимает площадь 900...1200 м<sup>2</sup>, до 28 линий. Это дает возможность фирме поставлять до 10 млн заготовок в год. Фирма TWB Co. совместно со своими дочерними предприятиями эксплуатирует более 23 агрегатов-линий по производству сварных заготовок. Производство также расширяется, в частности на основе применения лазерных VIL систем канадской фирмы VIL/GM, разработанных специально для производства ССЗ [12].

В Японии тонколистовые ССЗ изготавляет сеть как специализированных фирм, так и автомобильных заводов «Toyota», «Mitsubishi» и «Daihatsu». Только на этих трех автомобилестроительных предприятиях применяются лазерная и контактная шовная сварка с раздавливанием кромок (заготовки днищ), на остальных используется исключительно лазерная [25].

Общемировой промышленный выпуск тонколистовых ССЗ и их использование автомобильной индустрией в 1996–1998 гг., на основании последних японских данных [24], можно ориентировочно оценить в 380...400 млн заготовок в год. При этом примерно около 70 % общемировых поставок обеспечивает Западная Европа, 20 % США и 10 % Япония. Согласно этому же источнику, около 290 млн заготовок в год производилось на поточных сборочно-сварочных линиях и 100 млн — на отдельных агрегатах и комплексах (без производственных линий).

**Тонколистовые ССЗ «Tailored Blanks»,** изготовленные из современных материалов и с применением прогрессивной технологии сварки, положены в основу перспективной конструкции сверхлегкого кузова автомобиля XXI в.

Ежегодно в мире выпускается свыше 32 млн легковых автомобилей и не менее 25 млн джипов, микроавтобусов и минигрузовиков. Для мировой металлургической промышленности это гигантский рынок сбыта ежегодно более 50 млн т различных металлов, в первую очередь стали и алюминия. Естественно, что автомобильные фирмы заинтересованы в непрерывном снижении затрат металла на единицу своей продукции. С другой стороны, современное автомобилестроение должно удовлетворять растущим

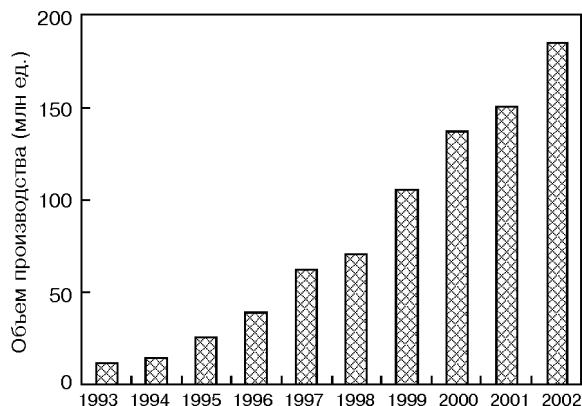


Рис. 9. Производство тонколистовых заготовок «Tailored Blanks» в США в 1993–2002 гг.

требованиям к экологической безопасности автомобилей. Данные факторы определяют современную стратегию разработки и организации производства перспективных моделей автомобилей с уменьшенными массой, расходом топлива и выхлопами токсичных газов.

Для решения этой проблемы металлурги предлагают автомобильной индустрии новые марки хорошо свариваемых сталей повышенной и высокой прочности, отличающихся при этом достаточно высокой пластичностью. Среди них — тонколистовые стали с упрочненной поверхностью, холоднокатаные двухфазные стали, TRIP (Transformation induced plasticity)-стали, горячекатаные стали, легированные углеродом, марганцем и хромом [26].

Благодаря интенсивно развивающимся технике и технологии лазерной сварки и обработки металлов, металлурги совместно с автомобилестроителями, нашли новый эффективный путь снижения массы автомобиля за счет создания принципиально нового конструктивного элемента — тонкостенных ССЗ «Tailored Blanks». На недавней международной конференции «ALAW-2000» представитель компании GM отметил, что прогресс в области лазерной сварки ССЗ специального раскроя феноменален; автомобильные компании только США используют более 100 млн заготовок в год и их количество растет невероятно быстро [27].

В настоящее время именно ССЗ из сталей повышенной прочности и алюминия положены в основу создания сверхлегкого кузова для перспективных моделей автомобилей. В 1998 г. успешно завершен крупный международный проект ULSAB («Ultra Light Steel Auto Body»), в разработке которого принимали участие 35 европейских, американских и азиатских металлургических фирм. Был создан сверхлегкий кузов, масса которого на 25 % меньше, таковой аналогичного серийного кузова. При этом кузов стал прочнее, жестче и безопаснее. Он передан для производственной обработки фирме «Porsche». Опытный кузов по проекту ULSAB более чем на 65 % состоит из стали повышенной и высокой прочности. Около 50 % конструктивных фрагментов кузова отштамповано из сварных заготовок «Tailored Blanks». В настоящее время данное направление получило очередной импульс: принят новый международный проект ULSAB-2, согласно которому такой высокотехнологичный продукт, как



тонколистовые ССЗ «Tailored Blanks» получат новое развитие.

Не исключена вероятность того, что подобная технология производства тонколистовых ССЗ на металлургических или специализированных предприятиях может быть распространена и на изготовление сварных заготовок для последующей штамповки корпусных конструкций сельскохозяйственной техники, мебели, бытовой техники и др.

1. Schneider C., Prange W. Tailored Blanks — ein Werkstoff fuer neue Formen der Konstruktion // Thyssen Technische Berichte. — 1992. — № 1. — S. 97–106.
2. Schneider C., Frings A. Laserstrahlgeschweißte Platten — ein neuartiges Konstruktionselement // Blech Rohre Profile. — 1993. — № 4. — S. 304–311.
3. Siegert K., Knabe E. «Tailored Blanks» — eine neue Technologie zum Automobileichtbau // Ibid. — 1995. — № 3. — S. 161–171.
4. Vollerstein F. Tailored Blanks // Ibid. — 1995. — № 3. — S. 172–178.
5. Baron J. S. A cost comparison of weld technologies for Tailor welded blanks. // Welding J. — 1997. — № 10. — P. 39–45.
6. New applications for TWBs — and laser welding // Welding and Joining Europe. — 1998. — № 10. — P. 31.
7. Вильхельм М., Рацим К. Материалы и процессы как факторы прогресса в автомобилестроении // Черные металлы. — 1995. — № 3. — С. 33–38.
8. Waddell W., Davies G. M. Laser welded tailored blanks in the automotive industry // Welding and Metal Fabrication. — 1995. — № 3. — P. 104–108.
9. Stegemann T., Frings A. Fuegeverfahren zur Erzeugung von maßgeschneiderten, geschweißten Platten (Tailored Blanks) // DVS-Berichte-Band 168. — 1995. — S. 21–25.
10. Jaroni U., Dohz Gh. Tailored Blanks — von der Marktforschung zur weltweiten Production // Stahl und Eisen. — 1998. — № 8. — S. 35–38.
11. Фордран Р. Сталь — это будущее // Черные металлы. — 2000. — № 5. — С. 51–55.
12. Irving B. Welding tailored blanks is hot issue for automakers // Welding J. — 1995. — № 8. — P. 49–52.
13. Ayres K. Laser welding tailored blanks for automotive assembly // TWI Connect. — 1994. — № 59. — P. 3.
14. Ratzek Ul., Greis P. Das ULSAB-Projekt: Neue Wege beim Automobilleichtbau mit Stahl // Stahl und Eisen. — 1998. — № 8. — S. 45–48.
15. Hibben M., Stemmiel F., Fischer J. Tailored Blanks aus Aluminium // Blech Rohre Profile. — 1995. — № 6. — S. 394–397.
16. Bachem H. Neue entwicklungen in der Strahltechnik // Schweißen und Schneiden. — 1997. — № 7. — S. 481–484.
17. Irving B. Automotive engineers plunge into tomorrow's problems // Welding J. — 1994. — № 12. — P. 47–49.
18. Dilthey U., Behr W. Elektronen-strahlschweißen in Atmosphäre // Schweißen und Schneiden. — 2000. — № 8. — S. 461–465.
19. Laber G. Qualitätsüberwachung der das Laserstrahlenschweißnähte von Tailored Blanks // Ibid. — 2000. — № 5. — S. 308.
20. Draugelat Ul., Bouafi B., Daniel St. Auswirkung der Nachbehandlung auf die Naht-eigenschaften von quetschnaht- und laserstrahlgeschweißten Feinblechen // Ibid. — 2000. — № 1. — S. 24–30.
21. Baron J. An update on mach seam resistance welding // Welding J. — 1994. — № 4. — P. 35–39.
22. Sollac-european automotive market leader // Steel Times. — 1999. — № 6. — S. 260–261.
23. Irving B. The auto industry gears up for aluminium // Welding J. — 2000. — № 11. — P. 63–68.
24. Сварка раскроенных заготовок в автомобилестроении // J. of the Japan Welding Society. — 2000. — № 1. — P. 4.
25. Slim-med-down and specialising // Steel Times. — 1995. — № 7. — P. 262.
26. Шульц Э. Облегченные элементы автомобилей из новых сталей // Черные металлы. — 1998. — № 3. — С. 40–46.
27. Irving B. Lasers continue to penetrate automotive production lines // Welding J. — 2000. — № 6. — P. 33–38.

The review of literature of the 1990s on the technology of manufacture of tailored blanks, including selection of an initial material, location and spacing of the blanks, peculiarities and modifications of the processes of joining, inspection, testing and formation, is given. The data on production and market of the tailored blanks are presented.

Поступила в редакцию 22.01.2001

# ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ

**Ф. Н. КИСИЛЕВСКИЙ**, д-р техн. наук, **В. В. ДОЛИНЕНКО**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено использование объектно-ориентированного программирования при разработке систем управления технологическим процессом сварки. В качестве примера сложного объекта управления выбран фрагмент электронно-лучевой сварочной установки. Выполнен объектно-ориентированный анализ, построена диаграмма отношений и синхронизации, предложено концептуальное решение для сетевой системы управления АСУ ТП сварки.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, объектно-ориентированное программирование, декомпозиция, абстракции, иерархия, модель управления, диаграмма отношений и синхронизации, сетевая архитектура, реальный масштаб времени, марковские процессы, графы состояний, надежность программного обеспечения

Современные автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) сварки представляют собой сложные информационно-управляющие системы с развитым математическим обеспечением, в которых предусмотрено взаимодействие с оператором-сварщиком или оператором-технологом. Часто в процессе сварки задействованы разнообразные агрегаты и механизмы, имеющие сложные алгоритмы функционирования. В связи с этим очень важна задача создания программного обеспечения (ПО) для АСУ ТП сварки. Разработчики современных АСУ сложными сварочными объектами должны учитывать достаточно жесткие требования, предъявляемые к ПО:

обеспечение повышенной надежности функционирования ПО совместно с аппаратными средствами АСУ ТП в условиях больших электромагнитных и других помех;

обеспечение достаточной «дружелюбности» интерфейса оператора ПО путем использования графических интерактивных объектов и средств;

минимальные сроки разработки.

В настоящее время разработчики АСУ ТП все чаще обращают внимание на объектно-ориентированное проектирование (object oriented design, далее OOD). Опыт использования такой технологии в инженерных проектах показывает ее высокую эффективность [1].

OOD включает следующие методы:

1) декомпозиция. В отличие от алгоритмической используется объектно-ориентированная декомпозиция с абстракциями объектов в предметной области сварки;

2) выделение абстракций и формирование классов объектов, имеющих сходные функции;

3) иерархия. В данном случае имеется в виду организация иерархической системы классов объектов, организация самой модели объекта управления и архитектуры АСУ ТП. Такой подход позволяет

© Ф. Н. Кисилевский, В. В. Долиненко, 2001

обеспечить более устойчивую обработку программой потоков данных в очень сложных системах управления.

OOD включает несколько методологий. Во-первых, объектно-ориентированный анализ (object oriented analysis, далее ООА), который представляет собой методологию декомпозиции и создания моделей как объекта управления, так и системы управления в целом. В данном случае требования к моделям формируются на основе понятий классов и объектов из области сварки.

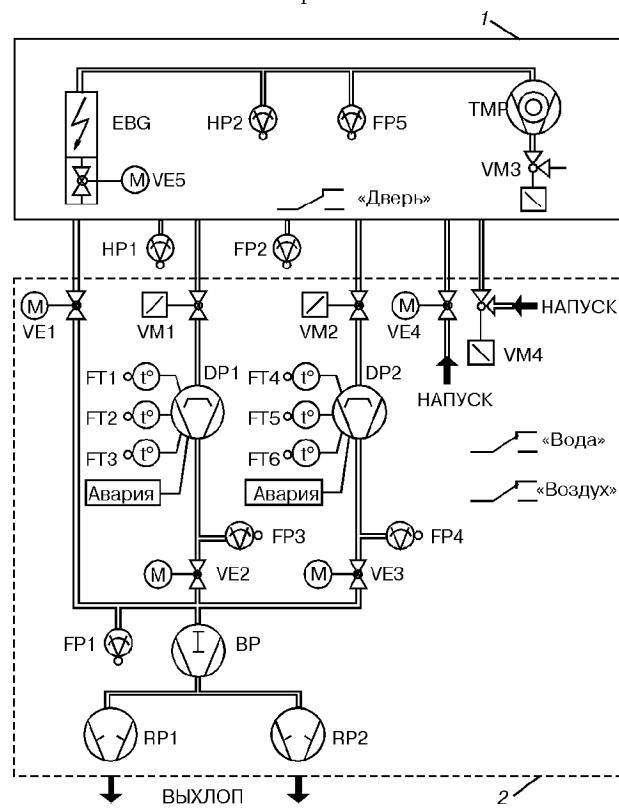


Рис. 1. Пример сложного объекта управления АСУ ТП сварки:  
1 — вакуумная сварочная камера; 2 — откачная система (EBG — электронная пушка; VE5 — шибер пушки; HP1, HP2 — высоковакуумные датчики давления; FP1...FP5 — низковакуумные датчики давления; VM1...VM4 — вакуумные клапаны; VE1...VE4 — электромеханические задвижки; FT1...FT6 — низкотемпературные датчики температуры; BP — насос Рутца; DP1, DP2 — диффузионные, RP1, RP2 — форвакуумные, TMP — турбомолекулярный насосы)

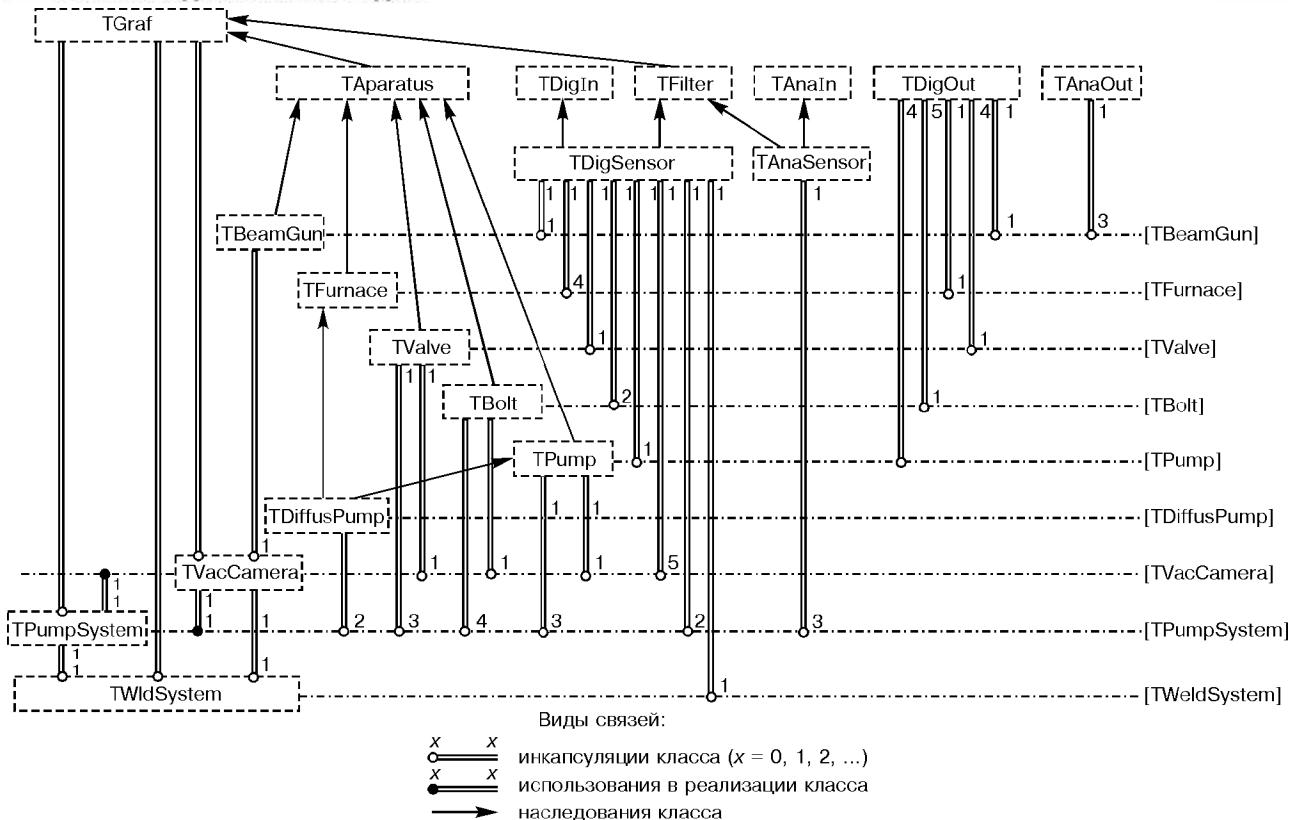


Рис. 2. Диаграмма классов объекта управления в АСУ ТП сварки

Во-вторых, объектно-ориентированное программирование (object oriented programming, далее OOP), которое представляет собой методологию программирования или реализации абстрактных моделей, т. е. программирование с использованием объектно-ориентированных языков. Таким образом, рабочая программа представляет собой систему объектов, каждый из которых является реализацией определенного класса и характеризуется собственным алгоритмом поведения и взаимодействием с другими объектами.

Как известно, основными методами OOD являются наследование, полиморфизм и инкапсуляция. Поэтому объекты могут наследовать свои свойства от объектов других классов, изменять свое поведение в зависимости от внешних условий и содержать необходимые данные, процедуры или другие объекты.

Остановимся на следующих практических аспектах применения OOD подхода при разработке ПО для АСУ ТП сварки:

- 1) использование ООА;
- 2) построение диаграммы отношений и синхронизации объектов;
- 3) использование объектно-ориентированных языков программирования таких, как C++ или Java;
- 4) использование графов состояний, описывающих поведение объектов в реальном масштабе времени;
- 5) использование результатов теории графов для автоматизированного тестирования и отладки ПО.

Для того чтобы проиллюстрировать возможности использования OOD подхода в задачах автоматизации сварочных процессов, рассмотрим конкретный случай автоматизации сложного объекта управления при электронно-лучевой сварке (ЭЛС). Ни-

в коей мере не претендую на полноту обсуждения проблемы автоматизации в ЭЛС, рассмотрим лишь фрагмент сложного объекта управления (рис. 1) — вакуумную сварочную камеру и откачную систему [2]. Конечно, в данном случае мы вынуждены учитывать и то, что эти две ключевые подсистемы невозможно рассматривать изолированно от других подсистем электронно-лучевой установки. Поэтому при рассмотрении вопроса синхронизации объектов будут упоминаться также подсистемы приводов перемещения электронной пушки и манипулятора изделия, а также электронно-лучевая аппаратура (ЭЛА). К сожалению, ввиду ограниченного объема статьи нет возможности детально рассмотреть эти подсистемы, впрочем, как и другие, которые могут входить в состав электронно-лучевой установки: телевизионная следящая система [3], подсистема мониторинга процесса сварки и др.

Несмотря на это, выбранный в качестве демонстрационной модели фрагмент объекта управления ЭЛС дает нам представление об уровне сложности и разнообразии абстракций, которыми оперируют разработчики ПО.

В данной статье делается попытка показать, что OOD подход позволяет выполнить более полную и детальную постановку задачи разработки ПО системы управления АСУ ТП сварки. При этом существенно ограничивается субъективный аспект, свойственный эвристическим, интуитивным решениям при выборе архитектуры и декомпозиции системы управления, расширяется база формальных правил, что в итоге гарантирует получение устойчивых непротиворечивых результатов на каждом этапе реализации проекта.

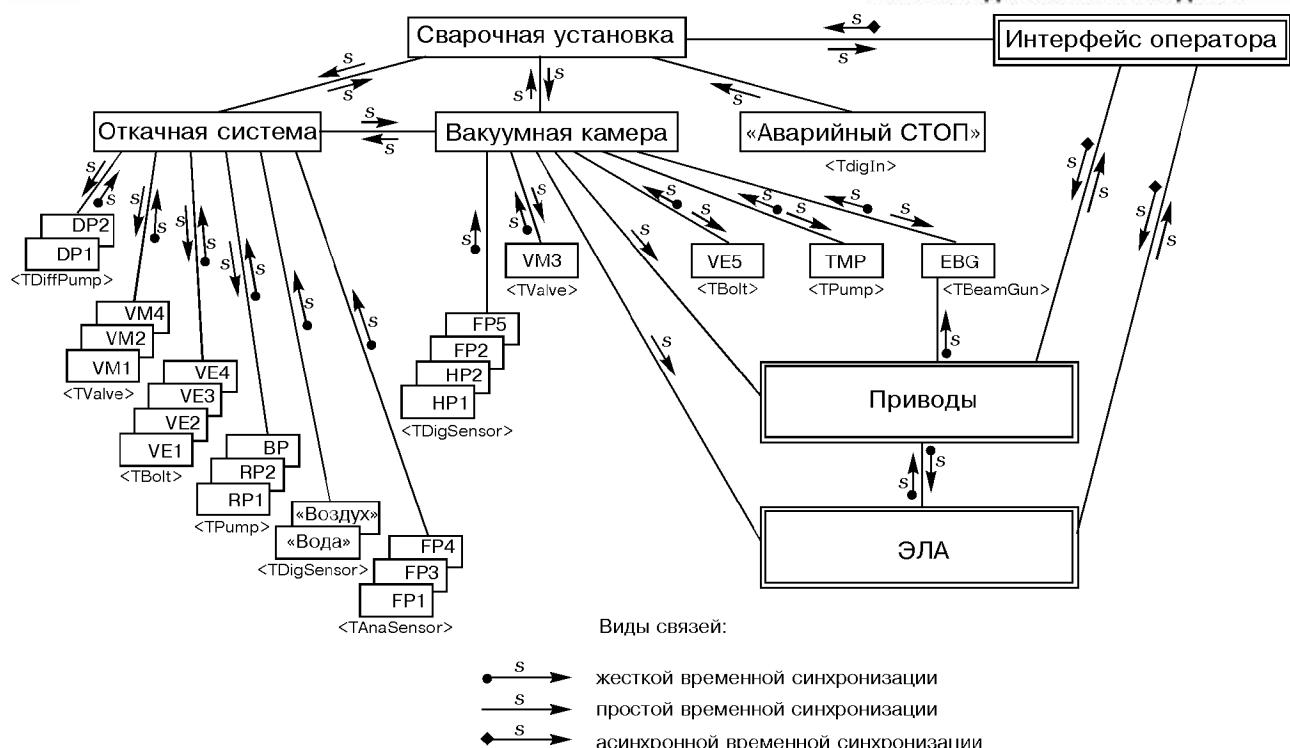


Рис. 3. Диаграмма отношений и синхронизации объектов ПО АСУ ТП сварки

Опуская этапы анализа задачи автоматизации ЭЛС, а также описание процесса группировки и выделения классов объектов (агрегатов, исполнительных механизмов и подсистем), представим результат предварительного анализа в виде диаграммы классов модели объекта управления (рис. 2). Здесь использованы следующие обозначения классов: TGraf — графов состояний, которые описывают поведение объектов во времени; TAratus — родительский для всех устройств и механизмов, задает флаг аварии, временные характеристики включения-выключения агрегата, хранит режим работы (ручной, автоматический или отключен), а также флаг отработки команды управления переключения состояния; TDigIn — сигналов дискретного ввода; TDigOut — сигналов дискретного вывода; TFilter — фильтров, которые используются для фильтрации входных сигналов (медианный фильтр, низких частот и др.); TAnaIn — сигналов аналогового ввода; TDigSensor — датчиков дискретного характера типа «включено-выключено»; TAnaSensor — датчиков аналогового характера (давления и др.); TFurnace — нагревательных элементов, который используется в некоторых видах насосов; TValve — вакуумных клапанов, в том числе пневматических и электромагнитных; TBolt — задвижек, которые в отличие от клапанов имеют два датчика положения («открыто» и «закрыто»); TPump — насосов; TDiffsPump — диффузионных насосов, наследует свойства TPump и TFurnace; TVacCamera — вакуумной сварочной камеры, использует в своем составе три класса объектов (TValve, TBolt, TPump); TBeamGun — электронной пушки, использующей три аналоговых сигнала управления (ток пучка, фокусировки и накала) и один дискретный сигнал управления; TPumpSystem — откачной системы; TWeldSystem — сварочной системы

(так же, как и TVacCamera и TPumpSystem, инкапсулирует TGraf в целях реализации необходимых режимов работы АСУ ТП). Отметим, что классы TVacCamera и TPumpSystem используют в своих реализациях ссылки друг на друга. Это необходимо для осуществления совместной работы объектов этих классов в единой сварочной системе.

Поскольку невозможно детально остановиться на каждом объекте, некоторые положения представим лишь в виде результатов.

Диаграмма классов объекта управления позволяет синтезировать модель объекта управления в объектных понятиях конкретного вида сварки.

На следующем этапе ООД-проектирования создается модель АСУ ТП сварки, которая содержит модель объекта управления и обычно имеет сетевую иерархическую структуру. Типовая схема построения иерархии уровней управления следующая:

система → подсистемы → агрегаты и механизмы → датчики (аналоговые, дискретные и пр.) → сигналы (аналоговые, дискретные и пр.).

При построении объектной модели используется принцип распределенности «интеллекта», заключающийся в том, что каждый объект в модели функционирует по собственному алгоритму, который свойствен объектам его класса. Такой поведенческий алгоритм удобно представить в виде направленного графа состояний или сети Петри с необходимыми временными задержками, которые задают поведение объекта в реальном масштабе времени.

На рис. 3 приведена диаграмма отношений и синхронизации, реализующая модель объекта управления, где специальными обозначениями показан характер отношений между объектами, что и определяет функционирование АСУ ТП в реальном масштабе времени. Наиболее часто применяют следующие виды синхронизации:



## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

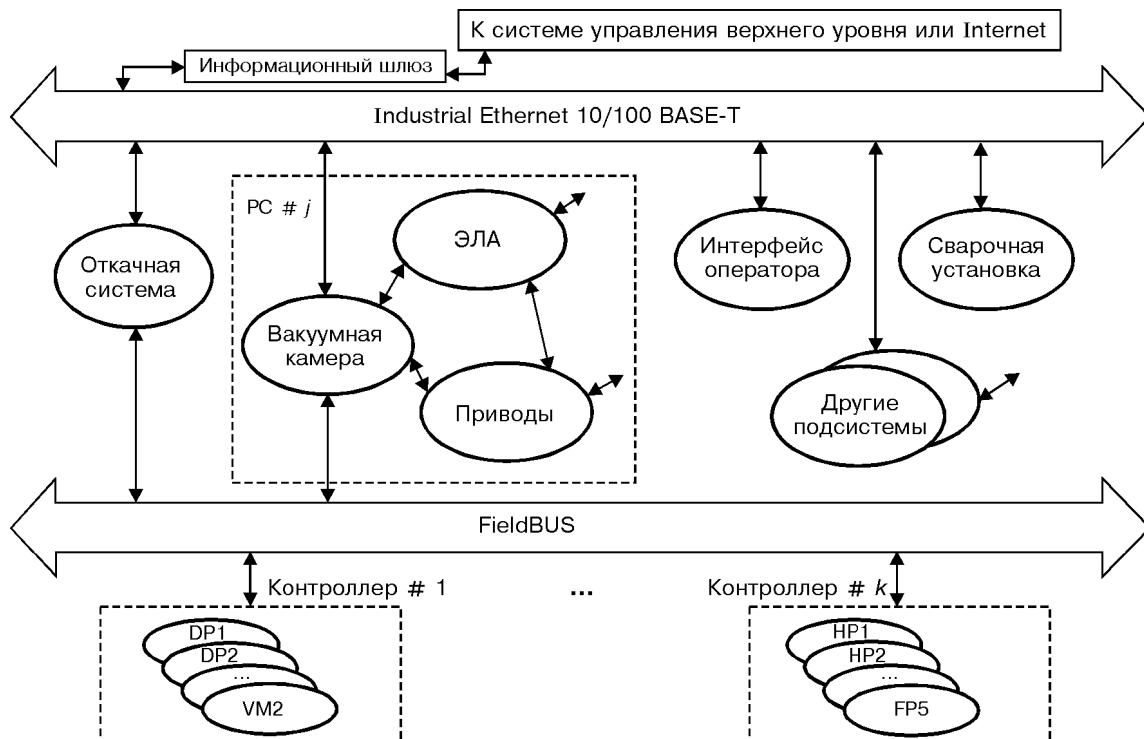


Рис. 4. Концептуальная схема сетевой объектно-ориентированной системы управления АСУ ТП сварки (обозначения см. на рис. 1)

синхронная (жесткая, простая) — действие выполняется независимо от готовности приемного сигнала;

асинхронная — реализуется ожидание взаимной готовности передающего и принимающего объектов;

задержанная — вид асинхронной с оговоренным временем ожидания ответа;

отсроченная — вид асинхронной, но в случае неготовности принимающего передающий не выполняет операцию.

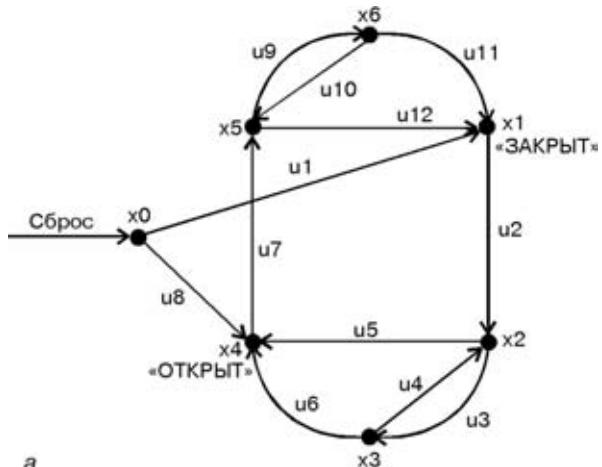
Диаграмма связей и синхронизации объектов используется для декомпозиции АСУ ТП на подсистемы. В зависимости от ее сложности и вида ТП сварки может быть выбрана распределенная, цент-

рализованная, сетевая или другая архитектура. Под сетевой структурой АСУ ТП понимаем такую организацию, при которой информационные каналы связи и протоколы обмена информацией имеют системообразующее значение.

Современной тенденцией в построении АСУ ТП является применение сетевых архитектур, в которых могут использоваться несколько видов информационных сетевых каналов связи. На верхних уровнях АСУ ТП чаще всего применяются сети типа Ethernet (Industrial) и модемная связь с протоколами обмена TCP/IP. На уровне контроллеров и датчиков используют FieldBUS-сети, например, PROFIBUS, CANBUS или BITBUS.

### Соответствие задач программирования и теории графов

| Задача программирования  | Задача теории графов   |
|--|--|
| Оптимизация программ, в том числе выделение фрагментов (структуризация) и декомпозиция | Нахождение доминаторов<br>Перечисление биокомпонент, контуров, интервалов, гамаков, линейных компонент<br>Нахождение вложенных зон графа<br>Нахождение вложенных контуров<br>Интервальное представление графа                    |
| Проверка правильности программ   | Нахождение транзитивного и обратного транзитивного замыкания<br>Нахождение замыкания относительно множества вершин<br>Перечисление путей, контуров   |
| Определение порядка обработки операторов при потоковом анализе                         | Нумерация вершин<br>Построение длинных последовательностей вершин  |
| Тестиирование программ   | Нахождение покрытия:<br>вершинами<br>дугами<br>требуемых путей путями<br>Нахождение кратчайшего пути при наличии дополнительных ограничений<br>Нахождение множества фундаментальных циклов<br>Определение цикломатического числа |



а

```
#define TRUE 1
class TVacuumValve : public TValve, public TGraf {
//... тело определения класса
public:
    enum TStates {x0, x1, x2, x3, x4, x5, x6};
    int State;
    virtual void Graf();
}
void TVacuumValve :: Graf() {
    if(Сброс == TRUE) State = x0;
    switch (State) {
        case x0:
            if(u1 == TRUE) State = x1;
            if(u8 == TRUE) State = x4;
            break;
        case x1:           // Клапан ЗАКРЫТ
            if(u2 == TRUE) State = x2;
            break;
        case x2:
            if(u3 == TRUE) State = x3;
            if(u5 == TRUE) State = x4;
            break;
        case x3:
            if(u4 == TRUE) State = x2;
            if(u6 == TRUE) State = x4;
            break;
        case x4:           // Клапан ОТКРЫТ
            if(u7 == TRUE) State = x5;
            break;
        case x5:
            if(u9 == TRUE) State = x6;
            if(u12 == TRUE) State = x1;
            break;
        case x6:
            if(u11 == TRUE) State = x1;
            break;
        default : State = x0;
            break;
    }
}
```

б

Рис. 5. Пример реализации марковской модели объекта «ВАКУУМНЫЙ КЛАПАН»: а — граф состояний; б — текст программы на языке С++

Обычно при выборе типов сетевых интерфейсов и параметров сетевых протоколов следует обеспечить необходимые минимальный такт синхронизации и уровень надежности пересылки данных между объектами АСУ ТП.

В том случае, когда используются сетевые протоколы со случайным характером разрешения кон-

фликтов (например, Ethernet) или же с синхронной передачей данных (например, PROFIBUS-DP), отработка заданий в АСУ ТП может иметь вероятностный характер и сильно зависеть от выбранного такта синхронизации. Например, исследование TCP/IP протокола в сети Ethernet 10Base-T показывает, что для такта синхронизации менее 10 мс отработка заданий подсистем может иметь вероятностный характер, в то время как для протоколов DP сети PROFIBUS — детерминированный.

В нашем случае необходимо обеспечить как простую синхронизацию между объектами (подсистемами), так и жесткую с тактом менее 10 мс. Наличие последней обусловлено необходимостью совместной работы подсистем перемещения электронно-лучевой пушки (вакуумная камера), манипулятора изделия и источника питания (ЭЛА), что в общем случае и определяет качество сварки.

На основе изложенного выше можно предложить концептуальную схему сетевой системы управления объектно-ориентированной АСУ ТП сварки (рис. 4). Структура такой системы управления имеет несколько уровней взаимодействия подсистем. На верхнем расположены объекты подсистем: «Интерфейс оператора», «Сварочная установка», «Откачная система», «Вакуумная камера», «ЭЛА», «Приводы» и др. У всех подсистем верхнего уровня есть информационные каналы связи с сетью Industrial Ethernet 10/100 Base-T, которая имеет шлюз в сеть более высокого уровня (например, заводскую) или в Internet. На схеме показано, что объекты подсистем «Вакуумная камера», «ЭЛА» и «Приводы» желательно реализовать в одном контроллере (компьютере) для обеспечения жесткой временной синхронизации. На нижнем уровне расположены контроллеры с моделями объектов агрегатов, механизмов, датчиков и сигналов. Объекты «Вакуумная камера» и «Откачная система» имеют прямые информационные связи с объектами нижнего уровня через протоколы обмена по интерфейсу FieldBUS. Предложенная система взаимосвязи объектов в общем случае инвариантна количеству и типам контроллеров, поэтому разработку программного и аппаратного обеспечения можно вести параллельно.

Такая архитектура в целом не противоречит типовой двухуровневой архитектуре АСУ ТП ЭЛС, которая в настоящее время используется в промышленных образцах технологических систем [4].

Отметим, что в настоящее время тенденция создания объектно-ориентированных «открытых» систем управления АСУ ТП возрастает [5–8]. Для разработки и моделирования таких систем созданы специальные языковые средства проектирования, например система проектирования UML — Universal Modeling Language [9].

Рассмотрим проблему, возникающую при реализации абстрактных моделей, с помощью методов и средств ООР. Как методология ООР дает программистам математический аппарат, который может быть положен в основу построения управляющих программ и реализаций абстракций объекта управления, динамического по своей природе. Этот математический аппарат базируется на использовании марковской схемы моделирования и аналитического

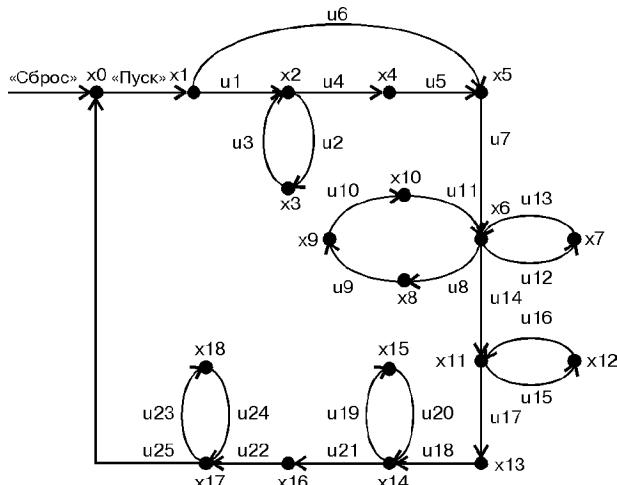


Рис. 6. Пример сложного управляющего графа

исследования сложных систем типа систем массового обслуживания. При этом ключевым понятием является марковский процесс, представляющий собой модель с конечным множеством состояний, описывающих функционирование системы. В связи с этим модель марковского процесса может быть использована как обобщенная для динамической системы [10]. Для реализации марковских процессов могут быть использованы направленные графы состояний. Разработка моделей объекта управления и АСУ ТП в целом ведется от абстрактных моделей марковских процессов более высокого порядка к таковым более низкого порядка. Поэтому ООД в результате дает иерархическую систему марковских схем, реализованных в виде направленных графов состояний.

В иерархической схеме базовых классов (см. рис. 2) каждый объект инкапсулирует объект типа TGraf, который задает поведение объекта в реальном масштабе времени. Реализацию объекта типа TGraf на языке машинного программирования можно formalизовать, например, с помощью стандартного блока «switch ... case of». Для организации работы такой модели в реальном масштабе времени необходимо жестко тащиривать график с периодом интервала реального масштаба времени. Это следует обеспечить соответствующим выбором как операционной системы контроллера, так и компилятора языка программирования. Например, для работы в реальном масштабе времени графов состояний с тактом 0,1 с можно использовать операционную систему MS Windows NT и систему программирования Borland C++Builder, а для работы с тактом менее 1 мс необходима операционная система OS-9 и компилятор языка Microware Ultra C++.

В качестве примера рассмотрим марковскую модель объекта «ВАКУУМНЫЙ КЛАПАН», график состояний которого приведен на рис. 5, а. После сброса модель переходит в состояние x0. Имеются также два устойчивых состояния: x1 — «ЗАКРЫТ» и x4 — «ОТКРЫТ». В процессе работы график может временно находиться в состоянии x2, x3, x5 и x6, которые можно характеризовать как промежуточные. Для реализации данной модели в виде программы используем язык С++. На рис. 5, б показан

фрагмент кода программы, соответствующий графу на рис. 5, а.

Можно отметить преимущество программирования объектов по такой формальной методике, которое заключается в наглядности и взаимооднозначности модели объекта и программного кода. Это позволяет существенно сократить сроки разработки и повысить надежность работы ПО АСУ ТП сварки.

Известный среди программистов афоризм, утверждающий, что «каждая последняя выявленная ошибка в программе является предпоследней», отражает важную проблему поиска и устранения ошибок в ПО АСУ ТП сварки. Существенным преимуществом ООД подхода является то, что при конструировании и отладке программ возникающие задачи можно свести к задачам теории графов либо использовать их в качестве основы для решения. К ним относятся задачи тестирования и проверки правильности программы, оценки сложности и времени исполнения и др. В таблице показана связь между такими задачами и задачами теории графов из [11].

В качестве примера рассмотрим управляющий график технологического режима «ОТКАЧКА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ» (рис. 6). Вершина x1 является входом, а x0 — выходом графа. Пусть необходимо построить программу тестирования данного графа. Для этого найдем минимальное покрытие вершин путями

$$\mu_1 = [\text{«Сброс», «Пуск», } u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, \dots, u_{19}, u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}, u_{17}, u_{18}, u_{19}, u_{20}, u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25}] \quad (1)$$

и дуг путями

$$\phi_1 = \mu_1, \quad (2)$$

$$\mu_2 = [\text{«Сброс», «Пуск», } u_6, u_7, u_{14}, u_{17}, u_{18}, u_{21}, u_{22}, u_{25}]. \quad (3)$$

Таким образом, имеем два минимальных покрытия  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , которые можно положить в основу тестовой программы для рассматриваемого управляющего графа.

Дополнительным преимуществом данного подхода является также то, что программисты вынуждены документировать свои управляющие графы и точно планировать процесс отладки и тестирования программ. Это позволяет обеспечить полноценное сопровождение и обслуживание по ПО АСУ ТП сварки.

## Выводы

- Современные АСУ ТП сварки представляют собой сложные информационно-управляющие системы с развитым математическим обеспечением. При разработке ПО таких систем основной проблемой является выбор подходящей формальной методики проектирования, которая бы позволяла трансформировать «внешнюю сложность» самой задачи автоматизации во «внутреннюю простоту» архитектуры и программного кода ПО АСУ ТП сварки. ООД подход, использующий методы декомпозиции, абстракции и иерархии, позволяет реализовать принцип «внутренней простоты» как для самого ПО, так и для АСУ ТП в целом. В результате уменьшаются сроки разработки и внедрения, а также достигается

повышенная надежность функционирования ПО разработанной системы управления АСУ ТП сварки.

2. Использование результатов теории графов позволяет формализовать процедуры отладки и тестирования ПО АСУ ТП сварки, что дает возможность разрабатывать программы со сложной логикой работы, которые практически не имеют ошибок.

1. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование (с примерами приложений на С++): Пер. с англ. — М.: Бином, 2000. — 560 с.
2. Чвертко А. И., Назаренко О. К., Кайдалов А. А. Тенденции развития // Машиностроение. Энциклопедия. — Т. IV-6: Оборудование для сварки. — Гл. 1: Оборудование для электронно-лучевой сварки. — М.: Машиностроение, 1999. — С. 368–378.
3. Назаренко О. К. Вторично-электронная следящая система с электромеханическим приводом // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 47–50.

The use of object-oriented design in development of CAM control systems for welding is considered. A fragment of an electron beam welding unit was selected as an example of a complex object of control. Object-oriented analysis is performed, a diagram of relations and synchronization is plotted and a conceptual solution for a network control system for welding CAM system is suggested.

4. Назаренко О. К., Кайдалов А. А. Микропроцессорные системы локального управления параметрами процесса электронно-лучевой сварки и электромеханическим комплексом // Машиностроение. Энциклопедия. — Т. IV-6: Оборудование для сварки. — М.: Машиностроение, 1999. — С. 360–363.
5. Рыженко А. И., Свирид У. Н. Объектно-структурированная АСУ ТП мукомольного завода // Совр. технологии автоматизации. — 2000. — № 3. — С. 46.
6. A welding cell with its own Web site / T. P. Quinn, J. D. Gilsinn, W. Rippel // Welding J. — 2000. — № 1. — P. 46–48.
7. Networking of welding applications / W. Rippel, J. Gil-sinn, L. Flitter // Ibid. — 2000. — № 1. — P. 49–53.
8. No other PC-based shape-cutting control touches it. BURN 10 shape-cutting motion control // Ibid. — 1999. — № 6. — P. 41.
9. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. — М.: ДМК, 2000. — 432 с.
10. Энциклопедия кибернетики: В 2 т. — Киев: Укр. сов. энцикл., 1974. — Т. 1. — 607 с.
11. Евстигнеев В. А. Применение теории графов в программировании / Под ред. А. П. Ершова. — М.: Наука, 1985. — 352 с.

Поступила в редакцию 05.10.2000,  
в окончательном варианте 22.01.2001



**Уважаемые господа!**  
Приглашаем Вас принять участие во Второй Международной специализированной выставке сварочного оборудования и родственных технологий "ЭКСПОСВАРКА • 2001"

**ОРГАНИЗАТОРЫ:**  
Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации, РНТСО, M.S.I. при содействии ЗАО "Экспоцентр", ООО "Мессе Сервис", АО "ЕвроЭкспо"

**23 – 26 октября 2001 г.  
Москва, Экспоцентр, пав. №4, "Форум"**

**ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ**

- технологии и оборудование для сварки и термической резки
- сварочные материалы и принадлежности, их производство
- автоматизация сварочных работ
- контрольно-измерительная техника
- техническая диагностика, приборы и методы неразрушающего контроля испытаний
- спецодежда и средства защиты сварщиков, охрана окружающей среды
- сертификация сварочного оборудования и технологий
- информационное обеспечение, подготовка кадров, менеджмент

**НОВЫЕ РАЗДЕЛЫ**

- технологии обработки поверхности
- гальваническое оборудование и технологии
- технологии термического напыления

В РАМКАХ ВЫСТАВКИ ПРОЙДУТ КОНФЕРЕНЦИИ И СЕМИНАРЫ

**290 4013, 202 9349**

[www.msi-vystavki.ru](http://www.msi-vystavki.ru)



# КОНСТРУИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ВАКУУМНЫХ КАМЕР

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ**, канд. техн. наук, **Ю. В. НЕПОРОЖНИЙ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны новые принципы конструирования вакуумных камер и технология их сборки под электронно-лучевую сварку, реализованные при создании пяти вакуумных камер объемом от 15 до 34 и двух камер объемом 0,2 м<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, вакуумная камера, оболочки, несущая способность, снижение металлоемкости, сварочные деформации, механическая обработка, вакуумная плотность

Современная техника неразрывно связана с вакуумными технологиями сушки, сварки, пайки, плавки, металлизации и др., требующими применения различных вакуумных камер — ответственных и трудоемких конструкций, которые при наименьшей металлоемкости должны иметь требуемую жесткость под воздействием атмосферного давления. Особенно это касается крупногабаритных камер с рабочим объемом 20...40 м<sup>3</sup>, состоящих из нескольких сотен деталей.

Крупногабаритные вакуумные камеры прямоугольной формы, широко применяемые в установках для электронно-лучевой сварки, содержат одну вакуумплотную оболочку, снабженную в зависимости от формы и размеров продольными, поперечными или продольно-поперечными силовыми поясами [1]. Эти пояса придают оболочке общую устойчивость и жесткость под воздействием атмосферного давления при вакуумировании камеры, однако максимальная деформация стенок такой камеры доходит до 3 мм, что исключает монтаж прецизионных манипуляторов перемещения пушки и свариваемого изделия без использования дополнительных конструкций, позволяющих отсоединить эти механизмы от стенок камеры. Применение указанных конструкций уменьшает коэффициент использования объема камеры (отношение объема свариваемого изделия к общему объему камеры), т. е. увеличивает откачиваемый объем, стоимость вакуумной системы и в результате стоимость всей установки.

В случае применения дуговых способов сварки при изготовлении вакуумных камер зачастую возникает необходимость в последующих термической и механической обработках с целью стабилизации размеров и состояния поверхностей, в частности в зонах расположения вакуумных уплотнений, а при больших габаритах вакуумных камер — в услугах специализированных машиностроительных заводов и в транспортных средствах.

Использование электронно-лучевой сварки, обеспечивающей минимальные сварочные деформации, позволяет принципиально изменить конструирование и технологию изготовления вакуумных камер. Институту электросварки им. Е. О. Па-

тона НАН Украины, благодаря наличию электронно-лучевой сварочной установки УЛ193 с вакуумной камерой объемом 320 м<sup>3</sup> (4,25×6,3×11,9 м), расположенной в помещении с порталным краном грузоподъемностью 30 т, удалось реализовать новую технологию, отличительными особенностями которой являются следующие:

использование двух вакуумплотных и прочных оболочек, соединенных между собой ребрами жесткости — шпангоутами. По такому же принципу изготавливают и двери камер;

отказ от применения какой-либо финишной механической обработки поверхностей вакуумной камеры после сварки, поскольку листовые заготовки под сборку и сварку поступают в окончательно обработанном виде.

**Принципы конструирования вакуумных камер нового поколения.** Исходя из требований защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения суммарная толщина внешней и внутренней оболочек для электронно-лучевых сварочных установок с ускоряющим напряжением 60 кВ и мощностью пучка 60 кВт выбрана равной 25 мм [2]. Внутренняя оболочка может быть изготовлена как из конструкционной, так и из нержавеющей стали толщиной 8...14 мм.

Применение коробчатой конструкции стенок и дверей вакуумной камеры вместо обычной тавровой позволяет при одинаковых геометрических параметрах конструкции *H*, *B* и *δ* получить в 2 раза больший момент инерции [3] и как следствие меньший прогиб стенки при откачке вакуума (таблица). Необходимость в применении продольного силового пояса практически отпада, его используют лишь в местах ослабления стенок отверстиями для иллюминаторов и патрубков вакуумной системы. Это позволило значительно (на 25 %) снизить удельную металлоемкость конструкции — массу, отнесенную к объему вакуумной камеры.

Расчетные значения прогибов стенок были со-поставлены с реальными таковыми откаченных камер, в частности камеры 2,5×2,5×5,0 м (рис. 1). Незначительные их значения позволили смонтировать манипулятор перемещения пушки непосредственно на боковой стороне камеры (рис. 2, см. вклейку). Этот легкий и компактный манипулятор пушки на базе прецизионных линейных модулей с шарико-винтовыми парами и линейными роликовыми опорами качения обеспечивает высокую точность



## Сравнительные характеристики конструкции вакуумных камер со стенками П-образного и коробчатого сечений

| Тип сечения | Расчетный элемент стенки вакуумной камеры | Расчетный момент инерции, см <sup>4</sup> | Максимальный расчетный прогиб, мм | Удельная металлоемкость, т./м <sup>3</sup> |
|-------------|---|---|-----------------------------------|--|
| П-образное  |   | 7560                                      | 0,84                              | 1,12                                       |
| Коробчатое  |   | 17515                                     | 0,36                              | 0,85                                       |

перемещения и позиционирования ( $\pm 0,08$  мм при длине хода 2500 мм), малое сопротивление перемещению и высокие динамические характеристики перемещения пушки.

**Технология изготовления вакуумной камеры.**

Все листовые заготовки под сборку и сварку поступают в окончательно обработанном виде: поверхность листовых заготовок, обращенную внутрь камеры, шлифуют или фрезеруют до шероховатости поверхности не хуже  $R_a = 0,8 \dots 3,2$ , кромки листов обрабатывают на расточных станках с непараллельностью не хуже 0,1 мм. На обратной стороне листов способом аргонодуговой сварки приваривают шпильки, с помощью которых на сборочно-сварочном стендे крепятся листы. Листовые заготовки из конструкционной стали проверяют на уровень остаточной намагниченности и в случае превышения значения  $2 \cdot 10^{-4}$  Тл размагничивают посредством крупногабаритного соленоида [2].

Основной тип сварного соединения стенок оболочки и самой оболочки —стыковый со сквозным проплавлением, что обеспечивает получение минимальных угловых деформаций. Перед сборкой листовые заготовки очищают от эмульсии и масла, а свариваемые кромки тщательно промывают техническим спиртом.

В сборочном приспособлении (рис. 3, см. вклейку) кромки свариваемых листов выставляют с превышением (депланацией) не более 0,2 мм. По концам стыкового соединения механически прикрепляют вводную и выводную планки, прихватку которых к листам, как и непосредственно электроннолучевую сварку, выполняют в сварочной установке УЛ193 при вакууме  $1,1 \cdot 10^{-1}$  Па. Наведение электронного пучка на стык и его ведение по стыку во время сварки осуществляют с помощью системы Растр-5 [2], а управление всеми энергетическими параметрами процесса сварки — компьютерной системы.

Процесс сварки подразделяют на несколько этапов. После совмещения электронного пучка со стыком, что хорошо видно на мониторе компьютера, оператор выполняет очистку поверхности стыка посредством электронного пучка. С этой целью включают развертку пучка по кругу диаметром 12 мм, увеличивают ток пучка до 10 мА и на скорости 8 мм/с производят очистку свариваемой поверхности. Второй этап заключается в наложении прихваток от центра к краям при мощности пучка, равной 30 % номинального значения сварочного тока. Длина прихваток составляет 100 мм, а расстояние между ними — 300 мм. Программу прихватки набирают на компьютере и включают в нужной точке соединения. Сварку листов, например конструкционной стали толщиной 14 мм, выполняют с использованием аппарата ЭЛА-60/60 при токе пучка 160 мА, скорости сварки 8 мм/с и расположении фокального пятна на поверхности изделия. Как отмечалось выше, такой режим сварки обеспечивает сквозное проплавление оптимальной формы.

Последний этап сварки — это косметический проход по шву расфокусированным пучком с током, составляющим около 25 % номинального сварочного, для получения ровной, гладкой поверхности шва, что необходимо согласно требованиям гигиены при эксплуатации вакуумной камеры.

Подготовку к сборке сваренных стенок камеры (рис. 4, 5, см. вклейку) производят следующим образом. Сначала удаляют вводные и выводные планки, затем зачищают и обезжиривают свариваемые кромки. На отдельной ровной площадке укрепляют шпангоуты камеры. В полученный таким образом каркас последовательно подают все четыре стенки внутренней оболочки (рис. 6, см. вклейку). Предварительное крепление стенок к шпангоутам осуществляют с помощью шпилек, используемых ранее при сварке листовых заготовок. Специальными болтами сборочной оснастки в собранных стыках регу-

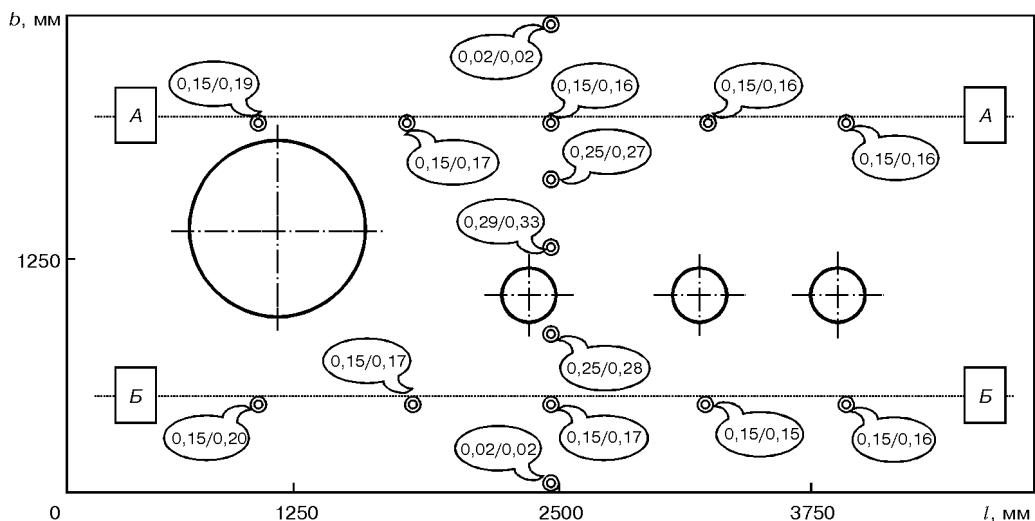


Рис. 1. Расчетные (числитель) и измеренные (знаменатель) значения прогибов стенки камеры  $2,5 \times 2,5 \times 5,0$  м, находящейся под вакуумом; А-А и Б-Б — оси закрепления соответственно верхней и нижней направляющей манипулятора перемещения пушки вдоль камеры;  $l$ ,  $b$  — соответственно длина и высота стенки камеры

лируют зазор, который не должен превышать 0,15 мм. В восьми углах внутренней оболочки устанавливают и механически крепят вводные—выводные планки с последующей их приваркой электронным пучком к стенкам. Собранную оболочку в обрамлении шпангоутов устанавливают в вакуумной камере для электронно-лучевой сварки. Особенностью этого этапа является наложение швов между шпангоутами, начиная с середины до краев стенок. Программа сварки предусматривает плавное увеличение тока пучка до рабочего значения в начале и его плавное уменьшение в конце сварки. Благодаря этому обеспечивается отсутствие дефектов в зонах перекрытия швов.

После сварки прерывистыми швами четырех угловых стыков оболочку вынимают из сварочной камеры, шпангоуты перемещают вдоль стенок так, чтобы открылись несваренные участки стыков. Особенностью последующей сварки этих участков является гарантированное перекрытие зон ввода—вывода тока пучка на ранее наложенных прерывистых швах и выполнение новых прерывистых швов с новыми участками ввода—вывода тока пучка.

На заключительной стадии внутреннюю оболочку прихватывают к шпангоутам по всему периметру способом сварки в углекислом газе. По приведенной выше технологии собирают и сваривают внешнюю оболочку камеры. В этом случае приварку листов

внешней оболочки к шпангоутам осуществляют электрозаклепками. Перед покраской камеры производят вакуумные испытания сначала объема между двумя стенками, а затем в сборе с дверями, в результате чего обеспечивается удобный доступ ко всем сварочным швам. При вакуумных испытаниях практически исключается натекание воздуха во внутреннюю камеру в процессе выполнения сварочных работ.

В качестве примера приведем замеры допусков реально полученных размеров вакуумной камеры  $2,5 \times 2,5 \times 2,5$  м, которые для диагоналей проходного сечения камеры составляют  $\pm 0,5$  мм, а отклонения от плоскости торцевых поверхностей камеры — 0,4 мм. Для уплотнения дверей с камерой не пользуются каких-либо прижимных механизмов — достаточно лишь начать процесс откачки камеры. Общий вид готовой камеры приведен на рис. 7 (см. вклейку).

1. Оборудование для электронно-лучевой сварки / А. И. Чвертко, О. К. Назаренко, А. М. Святский. — Киев: Наук. думка, 1973. — 408 с.
2. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 704 с.

New principles of design of the vacuum chambers and technology of their assembly for electron beam welding were developed, that were implemented in fabrication of five vacuum chambers of  $15$  to  $34\text{ m}^3$  volume and two chambers of  $0,2\text{ m}^3$  volume.

Поступила в редакцию 23.03.2001

# УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМА-МИГ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

**Н. А. МАКАРЕНКО**, канд. техн. наук, **А. В. ГРАНОВСКИЙ**, **К. А. КОНДРАШОВ**, инженеры  
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Рассмотрены особенности протекания реакций между некоторыми компонентами шихты порошковой проволоки в процессе плазма-МИГ наплавки. Показано, что присутствие соединений галогенидов в столбе дуги способствует стабилизации процесса саморегулирования дуги плавящегося электрода. Образование трифторида бора в сердечнике порошковой проволоки на стадии нагрева на вылете способствует улучшению формирования валика.

**Ключевые слова:** плазма-МИГ наплавка, порошковая проволока, стабилизация горения дуги, формирование валика, пресс-формы

Плазма-МИГ наплавка с применением порошковой проволоки используется при ремонте пресс-форм из легированного чугуна и изготовлении пресс-форм из стали 45 для формовки изделий из химически агрессивных в нагретом состоянии материалов, в частности стеклянных изолаторов [1]. Плазма-МИГ наплавка обеспечивает малую глубину проплавления основного металла, повышает производительность процесса плавления, а также имеет ряд технологических преимуществ по сравнению с другими способами наплавки [2–5].

При плазма-МИГ сварке (наплавке) одна дуга 4 горит между торцом внутреннего неплавящегося электрода полоцилиндрической формы 2 и изделием 6 (рис. 1). Эта дуга формируется в канале плазмообразующего сопла 3. По оси плазмотрона подается электрод 1. Электрический контакт между неплавящимся и плавящимся электродами отсутствует. Питание дуги неплавящегося электрода осуществляется от источника с падающей внешней вольт-амперной характеристикой, а дуги плавящегося электрода 5 — от источника с жесткой характеристикой.

Плазмотрон сконструирован так, что токоподвод отстоит от среза сопла на 100...130 мм, длина плазменной дуги, охватывающей плавящийся электрод, на 5...8 мм превышает длину дуги, горящей от этого электрода. Таким образом, проволока на этом участке вылета, помимо нагрева проходящим током, дополнительно нагревается теплом плазменной дуги.

Замечено, что процесс плазма-МИГ сварки (наплавки) менее стабилен, чем большинство других дуговых способов наплавки. Нарушение его стабильности обусловливается низкой напряженностью электрического поля  $E$  в столбе дуги плавящегося электрода. Эта дуга имеет температуру ниже, чем плазменная дуга, и получает дополнительные энергии и носители зарядов со стороны последней [4]. Этим объясняется малоэффективность процесса саморегулирования дуги плавящегося электрода.

Целью проведенных исследований было повышение стабильности процесса наплавки и улучшение качества наплавленного металла.

Исследования выполняли при плазма-МИГ наплавке металла типа 2Х13Н12ГС2Р2 порошковой проволокой диаметром 2 мм со стальной оболочкой и шихтой различных составов с применением плазмообразующего и защитного аргона. Для повышения разгаростойкости в наплавленный металл вводили незначительную массовую долю алюминия и меди.

Режим наплавки отдельных валиков следующий: в случае плазменной дуги —  $I_{cb} = 100 \dots 200$  А;  $U_d = 40 \dots 45$  В; в случае дуги плавящегося электрода —  $I_{cb} = 100 \dots 120$  А;  $U_d = 26 \dots 30$  В; расход плазмообразующего аргона составляет 5...7 л/мин, защитного — 10 л/мин; скорость перемещения — 30 м/ч.

О стабильности протекания процесса горения плазменной дуги и плавлении электродной проволоки судили по изменению электрических параметров, регистрируемому на экране осциллографа С2-16, а также по характеру формирования наплавляемого валика (визуальное наблюдение). Исследования проводили при постоянных условиях в соответствии с заранее отрегулированными параметрами.

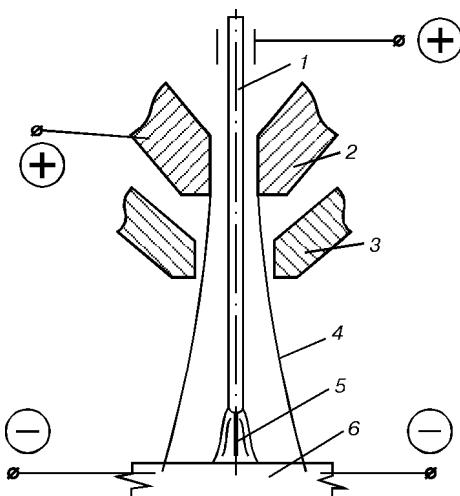


Рис. 1. Схема процесса плазма-МИГ сварки (наплавки) (см. обозначения в тексте)

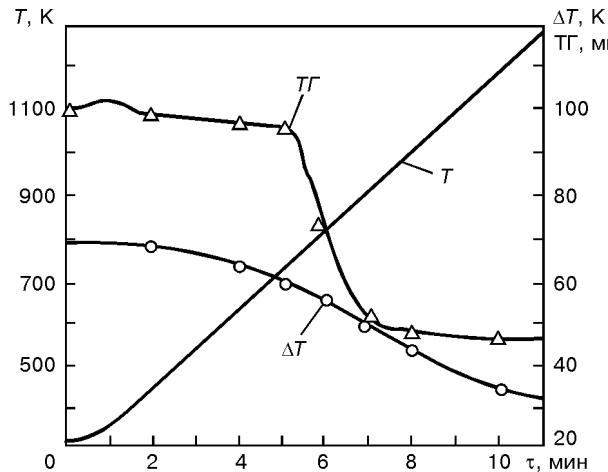


Рис. 2. Термограмма образования  $\text{BF}_3$  из  $\text{AlF}_3$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$  ( $T$  — температура нагрева компонентов шихты;  $\text{TГ}$  — потеря массы;  $\Delta T$  — разница температур внутри тигля и нагревающей среды;  $\tau$  — время испытаний)

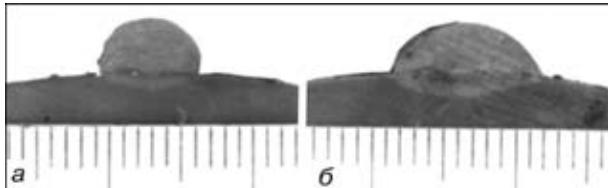


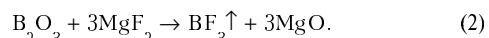
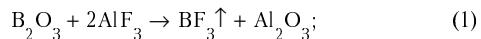
Рис. 3. Зона сплавления основного и наплавленного металла при использовании порошковых проволок, выделяющих  $\text{SiF}_4$  (а) и  $\text{BF}_3$  (б)

рами режима. Изменили только состав порошковой проволоки — без галогенидов металлов и с галогенидами кремния, алюминия, калия и меди.

Результаты исследований показали, что введение в состав порошковой проволоки таких компонентов, как фториды и хлориды, улучшает стабильность процесса наплавки. Так, выделяющийся из  $\text{SiF}_4$  фтор имеет высокий (16,9 В) потенциал ионизации и ухудшает электропроводность столба дуги, что ведет к повышению напряженности электрического поля в столбе дуги и улучшению процесса саморегулирования дуги плавящегося электрода. Однако при этом наблюдали неудовлетворительное формирование валика. В ходе исследований были проведены опыты по замене тетрафторида кремния на трифторид бора  $\text{BF}_3$ , который применяется при

пайке и обеспечивает надежное смачивание припоем основного металла даже без расплавления последнего [5].

Реакции взаимодействия могут протекать по схемам:



Значения изобарно-изотермного потенциала реакций образования  $\text{BF}_3$  при различных температурах рассчитаны согласно [6, 7].

На рис. 2 представлена термограмма реакции (1), из которой видно, что она протекает при температуре плавления  $\text{B}_2\text{O}_3$ . При этом выделяется  $\text{BF}_3$  и в незначительных количествах  $\text{BF}_2$  и  $\text{BF}$ .

На практике в состав порошковой проволоки вводят не чистые компоненты, а их соединения — плавленую буру и криолит. При одновременном введении буры и криолита снижается количество оксидных включений в наплавленном металле, что объясняется растворением последних в образующемся шлаке.

Стабильность процесса плазма-МИГ наплавки при введении в шихту фторидов повышается. При этом несплавление наплавленного металла с основным отсутствует. Благодаря избыточной температуре присадочного материала и высокой активности  $\text{BF}_3$  и  $\text{SiF}_4$  процесс протекает практически без расплавления основного металла. В то же время наблюдается удовлетворительное растекание металла валика по наплавляемой поверхности (рис. 3).

С целью рафинирования наплавленного металла и, как следствие, повышения разгаростойкости изделия, в состав порошковой проволоки вводили хлориды — смесь  $\text{CuCl}_2$  и  $\text{KCl}$ . Хлор так же, как и фтор, повышает напряженность электрического поля в столбе дуги (потенциал ионизации составляет 13 В). Хлориды способствуют также удалению оксидных загрязнений с поверхности частиц металлических компонентов сердечника проволоки после ее прокалки.

В процессе прокалки порошковой проволоки происходит распад  $\text{CuCl}_2$ :

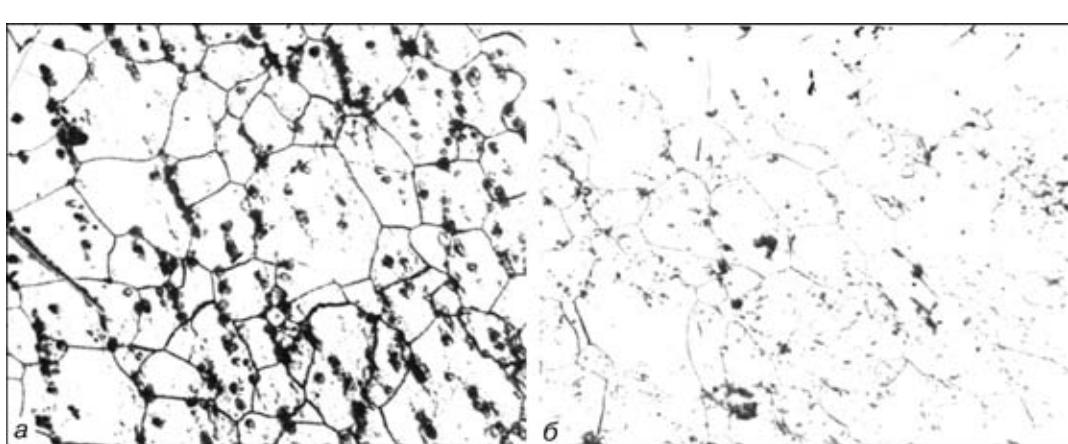
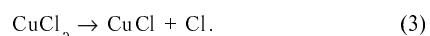
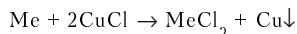


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 200$ ) наплавленного металла, полученная при использовании порошковых проволок, выделяющих  $\text{SiF}_4$  (а) и  $\text{BF}_3$  (б)

Выделившийся в результате реакции (3) атомарный хлор очень активен. Соединяясь с оксидами на поверхности частиц порошка, он образует легкоплавкие оксихлориды.

Наличие KCl приводит к образованию эвтектики CuCl-KCl, имеющей температуру плавления 120 °C и легко растворяющей оксихлориды. В результате реакции по схеме:



выделяется медь, которая оседает на частицах порошка и предохраняет их от дальнейшего взаимодействия с расплавом CuCl-KCl. Экспериментально методом погружения образцов металлов в расплав CuCl-KCl подтверждена высокая вероятность протекания подобных реакций. При этом оксидная пленка на поверхности частиц растворяется. Результаты металлографических исследований показали, что в металле, наплавленном порошковой проволокой, содержащей CuCl<sub>2</sub>-KCl, практически отсутствуют включения не только оксидного, но и нитридного характера (рис. 4). Такое явление можно объяснить тем, что на поверхности частиц порошка нитриды присутствуют совместно с оксидами, что приводит к удалению оседаний обоих типов.

Наличие CuCl<sub>2</sub>-KCl в составе шихты порошковой проволоки приводит к тому, что вследствие растворения в ней AlF<sub>3</sub> и B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> реакция происходит в момент прокалки проволоки, так как изменение термодинамического потенциала  $\Delta G$  этой реакции имеет отрицательное значение при комнатной температуре [8]. В таком случае целесообразнее вводить в шихту порошковой проволоки MgF<sub>2</sub> и B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, поскольку значение  $\Delta G$  становится отрицательным только при температуре непосредственно процесса наплавки.

Peculiarities of occurrence of reactions between certain components of the charge of flux-cored wire during plasma-MIG surfacing are considered. It is shown that the presence of halide compounds in the arc column favours stabilization of the process of self-adjustment of the consumable-electrode arc. Formation of boron tri-fluoride in the flux-cored wire core at a stage of heating at the extension improves the weld bead formation.

Особенности протекания химических реакций компонентов шихты в условиях плазма-МИГ наплавки должны учитываться при разработке составов порошковых проволок.

## Выводы

1. Для улучшения стабильности горения дуги и плавления порошковой проволоки при плазма-МИГ наплавке в состав проволоки предложено вводить фтор- и хлорсодержащие соединения, обеспечивающие повышение потенциала ионизации.

2. Улучшению смачиваемости поверхности наплавляемых заготовок из стали или чугуна и растекания металла валика способствует образование трифторида бора в сердечнике порошковой проволоки на стадии ее нагрева на вылете.

1. Макаренко Н. А. Плазменная наплавка с аксиальной подачей порошковой проволоки // Автомат. сварка. — 1998. — № 1. — С. 40–43.
2. Mucsý G., Vas A., Bica I. Wirtsh aftlichkeit und Technologie beim Plasma-MIG Schweißen // Lis-Mitt. — 1983. — № 1. — S. 60–67.
3. Moestue H. Plasma-MIG rolls over SA for steel plant repairs // Weld. and Metal. Fabrik. — 1981. — № 8. — P. 465–467.
4. Ton H. Physical properties of the plasma-MIG welding arc // J. Physics D: Applied Physics. — 1975. — № 8. — p. 922–938.
5. Есунберлин Р. Е. Пайка и термическая обработка деталей в газовой среде и вакууме. — Л.: Машиностроение, 1972. — 192 с.
6. Петров Г. А., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. — М.: Выш. шк., 1967. — 503 с.
7. Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник / Под ред. А. И. Зефирова. — М.: Атомиздат, 1965. — 465 с.
8. Явойский В. И., Рубенич Ю. И., Оценко А. Г. Неметаллические включения и свойства стали. — М.: Металлургия, 1980. — 176 с.

Поступила в редакцию 13.07.2000,  
в окончательном варианте 12.02.2001



# ОБОРУДОВАНИЕ С СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ

А. Н. ШАПОВАЛ, канд. техн. наук

(Гос. инж. центр твердых сплавов «Светкермет», г. Светловодск)

Приведены технологические параметры разработанной установки в сопоставлении с характеристиками серийной отечественной и зарубежной установками для волочения с системой электроконтактного нагрева. Отмечены преимущества новой установки.

**Ключевые слова:** волочение, вольфрамовая проволока, установка, электроконтактный нагрев, технологические параметры

Вольфрамовые электроды для аргонодуговой сварки изготавливают из прутков и проволоки методами порошковой металлургии [1]. Ответственной технологической операцией, определяющей качество сварочных электродов, является волочение прутков и проволочных заготовок на цепных и блочных станах. В последние годы внедрены новые технологические процессы волочения с повышенными обжатиями металла за проход, в частности, вибрационное волочение [2]. На основе выполненного анализа существующих способов нагрева металла перед деформированием [3] нами в качестве базового процесса принят электроконтактный нагрев (ЭКН), используемый для интенсификации процессов обработки давлением [4].

Одной из сложных технических задач, возникающих при разработке установок непрерывного ЭКН, является создание контактирующих устройств, которые позволяли бы подводить к обрабатываемой заготовке необходимую мощность. Стабилизация мощности возможна при применении структурной схемы, приведенной на рис. 1.

Сигнал величины напряжения на нагреваемом участке заготовки 1 между контактами 3 с датчика напряжения 2 поступает на квадратичный детектор 4. Сигнал величины тока, проходящего по заготовке, с измерительного трансформатора тока поступает также на квадратичный детектор. Затем оба сигнала поступают на измеритель мощности 5 и ее задатчик 6. Сигнал рас согласования, усиленный усилителем 7, поступает на тиристорный регулятор 8, который через согласующий транс-

форматор 9 поддерживает заданную мощность на нагреваемой заготовке, что обеспечивает более точную стабилизацию температуры нагрева.

Нами была осуществлена разработка конструкции установки для волочения вольфрамовой проволоки с ЭКН. С целью рационального использования существующего оборудования целесообразно разрабатывать установку на базе серийно выпускаемой машины волочения МВ-1000В, имеющей широкое применение на заводах по производству проволоки из тугоплавких металлов. Габаритные размеры машины волочения МВ-1000В при условии демонтажа системы газовоздушной разводки и газовой нагревательной печи позволяют расположить всю необходимую электроаппаратуру установки волочения с ЭКН (УВЭ-1000). Габариты базовой машины волочения МВ-1000В при этом не увеличиваются. Основные параметры технологических возможностей

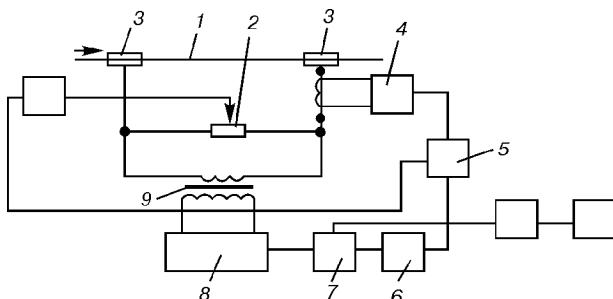


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования и поддержания мощности при нагреве проволоки (обозначения см. в тексте)

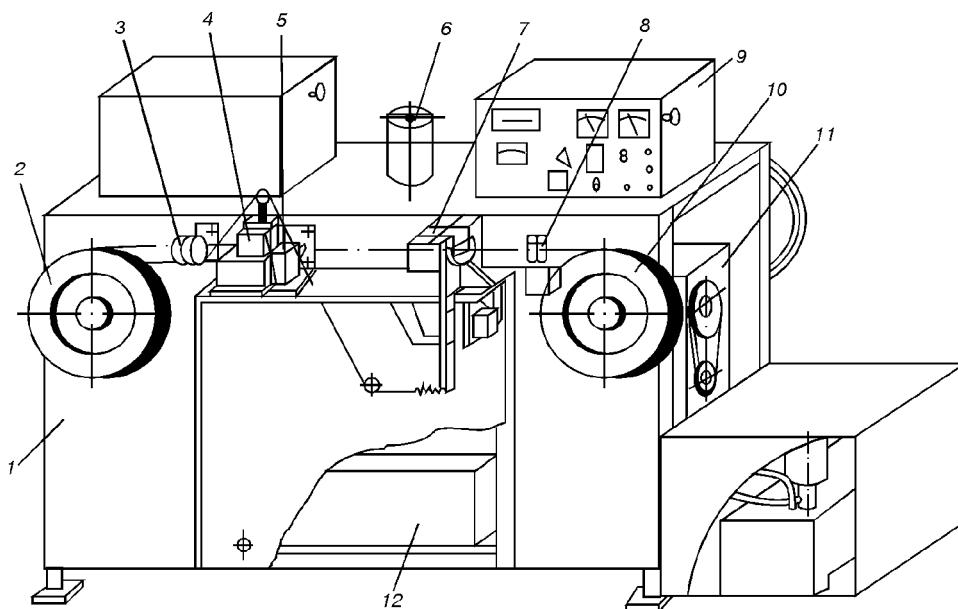


Рис. 2. Компоновочная схема установки УВЭ-1000 (обозначения см. в тексте)



## Технические характеристики установок УВЭ-1000, МВ-1000В и L2

| №<br>п/п | Показатель   | Тип установки |             |           |
|----------|--|---------------|-------------|-----------|
|          |  | УВЭ-1000      | МВ-1000В    | L2        |
| 1        | Скорость волочения, м/мин  | 10,5...24     | 10,5...13,5 | 5...20    |
| 2        | Точность поддерживания температуры нагрева проволоки, град               | ± 20          | ± 50        | ± 30      |
| 3        | Степень деформации за переход, максимальный, %                           | 28            | 22          | 16        |
| 4        | Интенсивность охлаждения проволоки на выходе из очага деформации, град/с | 4000...5000   | 500...800   | 200...250 |
| 5        | Производительность, кг/ч   | 1,1           | 0,59        | 0,68      |
| 6        | Выход годной продукции на технологическом переделе, %                    | 96,07         | 94,98       | 96,8      |
| 7        | Безвозвратные потери, %  | 0,5           | 1,5         | 1,1       |
| 8        | Удельные затраты энергоносителей:  |               |             |           |
|          | газ, м <sup>3</sup> /кг  | —             | 8,47        | 1,84      |
|          | воздух, м <sup>3</sup> /кг   | —             | 84,7        | 18,4      |
|          | электрическая энергия, кВт/(ч·кг)  | 3,4           | 3,55        | 2,2       |

установки УВЭ-1000 по сравнению с серийной машиной МВ-1000В и машиной L2 фирмы «Тохо кинзоку» (Япония) с газовым нагревом металла приведены в табл. 1. У разработанной установки УВЭ-1000 практически все показатели существенно превышают уровень таковых других машин.

Установка УВЭ-1000 смонтирована (рис. 2) на станине 1 сварной конструкции и содержит расположенные с двух сторон по ходу волочения смоточный барабан 2, узел «холодного» контакта 4 со смазочной ванной 5, «горячего» контакта 7 и намоточный барабан 10. Управление работой установки осуществляется блоком 9. Для заправки проволочной заготовки в волоку конец ее подвергается химико-термическому острению в узле 6 с расплавом азотокислого натрия. Строгое соблюдение прямолинейности обрабатываемой проволоки и ее стабильное направление вдоль оси волочения обеспечивается тормозным устройством смоточного барабана 2 и направляющей 3.

Процесс волочения производится до полного выхода проволочной заготовки из зоны деформации. Для улавливания конца проволоки, предотвращения распускания и обеспечения ее прямолинейности после выхода из зоны деформации служит механизм улавливания 8. Силовой блок 12, обеспечивающий энергопитанием установку, расположен внутри станины 1. Раздельный для каждой из сторон привод 11 обеспечивает двухступенчатое регулирование скорости волочения переустановкой клинового ремня.

Разработанная контактная система установки волочения УВЭ-1000 осуществляет безыскровую передачу электроэнергии плотностью до 150 А/мм<sup>2</sup> при минимальном времени на заправку обрабатываемой проволоки.

В настоящее время разработанная система ЭКН успешно используется в технологии производства как сварочной вольфрама-

вой проволоки, так и лент и катодов из вольфрама для электронно-лучевых технологий [8, 9]. Практика эксплуатации установки УВЭ-1000 показала, что рациональное число переходов волочения в диапазоне диаметров 0,88...0,51 мм равно четырем. При этом степень деформации за переход находится в пределах от 20 до 28 %, а норма обслуживания одним рабочим составляет пять переходов.

1. Перспективные технологические процессы обработки давлением тугоплавких металлов / А. Н. Шаповал, В. М. Изотов, В. И. Познанский, А. А. Ульяненко. — М., 1986. — 56 с. — (Сер. «Обработка цветных металлов»: Обзор. информ. / ЦНИИцветмет экономики и информации; Вып. 2).
2. Шаповал А. Н., Изотов В. М. Вибрационная обработка металлов. — М., 1985. — 56 с. — (Сер. «Твердые сплавы и тугоплавкие металлы»: Обзор. информ. / ЦНИИцветмет экономики и информации; Вып. 2).
3. Бутко Е. В., Троицкий О. А., Шаповал А. Н. Электроконтактный нагрев при обработке металлов. — М., 1983. — (Сер. «Обработка цветных металлов»: Обзор. информ. / ЦНИИцветмет экономики и информации; Вып. 4).
4. Коврев Г. С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 312 с.
5. Шаповал А. Н., Горбатюк С. М., Шаповал А. А. Технология получения и свойства вольфрамовых лент для электронно-лучевых технологий // Цвет. металлы. — 1999. — № 2. — С. 78-80.
6. Шаповал А. Н., Третьяков О. В., Шаповал А. А. Разработка новых технологических процессов производства лент из тугоплавких металлов // Сб. информ. материалов Третьей Междунар. конф. «БРМ-2000» (Благородные и редкие металлы). — Донецк: ДонГТУ. — 2000. — С. 355.

Technological parameters of the new drawing unit are given in comparison with characteristics of the similar-application standard domestic and foreign units equipped with an electrical resistance heating system. Advantages of the new unit are presented.

Поступила в редакцию 19.03.2001



## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Способ алюминотермитной сварки рельсов**, отличающийся тем, что сварной шов после затвердевания и облости, близлежащую к последнему, охлаждают струей сжатого воздуха до температуры 250...300 °C, затем — на воздухе. Патент РФ 2163184. В. И. Карабанов, Н. И. Ивакин, А. И. Алешин и др. [5].

**Способ автоматической электродуговой наплавки покрытия под слоем флюса на внутреннюю цилиндрическую поверхность изделия**, при котором на горелку устанавливают ограждение и закрепляют рабочий элемент для удаления в процессе наплавки шлаковой корки с поверхности наплавленного валика, изделие приводят во вращение, а наплавку осуществляют при поступательном перемещении горелки. Приведены отличительные признаки способа. Патент РФ 2163526. П. Б. Перегудин, С. Б. Перегудин, Б. П. Перегудин (ООО фирма «Директ») [6].

**Состав электродного покрытия**, отличающийся тем, что он дополнительно содержит полевошпатово-слюдяно-кварцевый сланец при следующем соотношении компонентов, мас. %: 14...17 доломита, 15...18 ферромарганца, 4..6 слюды мусковита, 10...12 полевошпатово-слюдяно-кварцевого сланца, остаточное ильменитового концентрата. Патент РФ 2163861. К. Д. Баснев, А. А. Бигулаев (Северо-Кавказский ГТУ) [7].

**Способ наплавки на поверхность изделий**, выполненных из дисперсионно-твёрдеющего сплава на никелевой основе, включающий наплавку с использованием присадочного материала из сплава на никелевой основе, не претерпевающего фазовых изменений в процессе нагрева, отличающийся тем, что после наплавки никелевый слой подвергают механической обработке до получения заданной толщины, после чего на него наплавляют слой меди с последующей механической обработкой. Патент РФ 2164196. В. Н. Семенов, А. И. Леонов, К. Е. Пономарев, Е. П. Петухов (ОАО «НПО энергомашиностроения им. В. П. Глушко») [8].

**Роликовый раскатник для создания сварочного давления при диффузионной сварке труб внахлестку**, отличающийся тем, что он снабжен штангами, на концах которых установлены раскатные ролики, а противоположные концы штанг установлены с возможностью вращения в корпусе. Патент РФ 2164197. А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев (НИКИЭТ) [8].

**Способ диффузионной сварки труб внахлестку**, отличающийся тем, что свариваемый участок труб помещают в неподвижную кольцевую опору, а раскатку осуществляют роликовым раскатником, включающим штангу, установленную эксцентрично относительно оси вращения роликового раскатника, и закрепленный на ней с возможностью вращения относительно собственной оси один раскатный ролик. Патент РФ 2164198. В. Г. Аден, А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин, Г. Н. Шевелев (НИКИЭТ) [8].

**Способ диффузионной сварки двух элементов**, при котором полку и перпендикулярную ей стенку устанавливают с предварительным сжатием между ограничительными элементами оснастки, нагревают зону соединения до температуры сварки, сдавливают и осуществляют изотермическую выдержку, отличающейся тем, что на полке предварительно выполняют зоны свободной деформации, причем расстояние от кромки стенки до зоны свободной деформации равно 1...2 максимальным толщинам торца стенки. Патент РФ 2164199. И. И. Столяров (ОАО «Пермский моторный завод») [8].

**Износостойкий наплавочный материал**, отличающийся тем, что он дополнительно содержит флюс, а в качестве тугоплавких соединений частицы сплава ВК-8, полученные дроблением отходов твердосплавных элементов режущих инструментов, в ка-

честве матричной связки — никелевый порошок при следующем соотношении компонентов, вес. %: 50...70 сплава ВК-8, 27,5...46,5 никелевого порошка, 2,5...3,5 флюса. Патент РФ 2164200. Н. В. Фотин, А. М. Ханов, М. Н. Игнатов и др. (Пермский ГТУ) [8].

**Робототехнический комплекс для сварки листоштамповочных элементов кузова автомобиля**, содержащий сварочные роботы, поворотно-выкатные столы с приемными секциями, на позициях загрузки которых расположены спутники с возможностью возвратно-поступательного перемещения и выката на планшайбы указанных столов, сварочные кондукторы и др. Приведены отличительные признаки комплекса. Патент РФ 2164201. В. Г. Уткин, Н. В. Бойков, С. М. Локшин и др. (ОАО «Газ») [8].

**Материал для пайки алюминия**, содержащий смесь порошка для пайки, флюса, связующего и спирта для растворения указанного связующего, отличающийся тем, что в качестве спирта он включает алифатический спирт, содержащий от 1 до 8 атомов углерода, а в качестве связующего — термопластичный акриловый сополимер, способный к растворению в алифатическом спирте и испарению без разложения при повышении температуры при пайке. Патент РФ 2164460. Т. Сузуки, Ц. Танака, М. Огасавара (Элкэн Интернейшнл Лимитед, Япония) [9].

**Способ одновременного сращивания жил высоковольтного кабеля с помощью микровзрыва**, отличающийся тем, что соединяемые оголенные концы жил, изгиба их, размещают друг против друга торцами в поперечной плоскости в вершинах расчетного равностороннего многоугольника, число которых соответствует числу жил, соединяют эти концы металлическими гильзами, на изолируемые наружные поверхности которых дозированно наносят взрывчатые вещества и фиксируют их, концы жил упирают торцами друг в друга в середине гильз, взрывчатые вещества соединяют с общим детонатором с возможностью обеспечения одновременности их подрыва и производят микровзрывы. Патент РФ 2164461. В. А. Гладченко, В. А. Кадочкин, Б. М. Колесов и др. [9].

**Способ диффузионной сварки двух элементов**, отличающийся тем, что используют второй элемент толщиной, равной 0,4...0,7 толщины выступа, на его торце предварительно формируют зону свободной деформации в виде макровыступов, нагрев свариваемых поверхностей производят путем обработки электронным лучом малой мощности, затем производят дополнительный нагрев выступа до температуры сварки путем увеличения мощности электронного луча, при этом приложении усилия к элементам макровыступов вдавливают на 1,0...1,5 их высоты выступа, а затем сдавливающее усилие снижают. Патент РФ 2164462. И. И. Столяров, В. А. Рогожин (ОАО «Пермский моторный завод») [9].

**Способ управления циклом наплавки деталей вращения**, отличающийся тем, что в качестве параметра, характеризующего тепловой режим, используют отношение количества тепла, поступившего в деталь за заданный интервал времени, к угловому перемещению детали за этот же интервал. Патент РФ 2164845. С. Р. Аманов, А. Р. Шишкин (ОАО «АвтоВАЗ») [10].

**Способ регулирования и контроля процесса контактной сварки**, отличающийся тем, что дополнительные измеряют действующее значение напряжения в процессе сварки и регистрируют в каждом полупериоде отклонение действующего значения тока сварки от заданного, при этом корректирование силы тока ведут по  $\Delta I$  каждого предыдущего полупериода, а качество сварки оценивают по сумме абсолютных значений  $\sum |\Delta I_n|$ , где  $n$  — число полупериодов за время сварки, и по сумме абсолютных значений  $\sum |\Delta U|$  за последнюю четверть времени сварки. Патент РФ 2164846. Н. П. Горун, В. М. Куликов, С. П. Манейкин и др. [10].

\*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях РФ «Изобретение. Полезные модели» за 2001 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



**Колебательный механизм установки для сварки деталей трением**, содержащий корпус, вал вращающийся, колеблющийся элемент, совершающий колебательное движение, и подшипники. Приведены отличительные признаки механизма. Патент РФ 2164847. А. И. Мещанкин, В. В. Прошин (ЗАО «Хорсмаш») [10].

**Способ лазерной сварки тонких проводников**, отличающийся тем, что проводники сжимают в радиальном направлении, пластиически деформируя свариваемые поверхности, и формируют профиль стыка сварного соединения, ограничивая его линиями двух пересекающихся полуокружностей и хордой, соединяющей точки пересечения полуокружностей, с размером  $l \approx (0,2...0,3)D$ , где  $D$  — диаметр проводника. Патент РФ 2164848. В. А. Гребенников, А. А. Ефанов, В. Б. Голубков, И. В. Назаров (ОАО Раменское приборостроительное КБ) [10].

**Активирующий флюс для электродуговой сварки**, отличающийся тем, что в его состав дополнительно введен хлорид кальция, а компоненты взяты в следующем соотношении, мас. %: 17...25 гексафторалюмината лития, 17...25 диоксида титана, 35...40 соединения, выбранного из группы: диоксида кремния, диоксида германия, диоксида теллура, 20...30 хлорида кальция. Патент РФ 2164849. С. Г. Паршин, Ю. В. Казаков, К. Б. Корягин [10].

**Способ нанесения припоя на алюминиевую экструдированную ленту из уплощенных трубок**, включающий погружение покрываемой алюминиевой экструдированной ленты из уплощенных трубок в погружную емкость с суспензией указанного припоя. Приведены отличительные признаки способа. Патент РФ 2165342. Т. Сузуки, Ц. Танака, М. Огасавара (Элкэн Интернейшнл Лимитед, Япония) [11].

**Датчик коротких замыканий для дуговой сварки импульсами тока и напряжения в защитных газах**, отличающийся тем, что в него введены конденсатор и два соединенных встречно-параллельно диода оптотиристоров, а пороговые элементы выполнены в виде двух включенных встречно-последовательно стабилитронов, при этом конденсатор, светодиоды оптотиристоров и включенные встречно-последовательно стабилитроны соединены по-

следовательно и образуют электрическую цепь, включенную параллельно стабилитрону ограничительной цепи. Патент РФ 2165343. А. Ф. Князьков, А. В. Петриков (Томский политехнический университет) [11].

**Лазерный комплекс для сварки трубопроводов**, отличающийся тем, что сварочная головка выполнена автономной с возможностью размещения и перемещения внутри трубопровода и с возможностью управления с помощью передачи команд по лазерному лучу от системы управления лазерным комплексом и снабжена колесами, аккумулятором и приводом перемещения вдоль трубы и вокруг оси трубы. Патент РФ 2165344. А. М. Забелин (ЗАО «ТехноЛазер») [11].

**Способ монтажа усиливающей муфты на дефектный стык действующего трубопровода**, отличающийся тем, что по обе стороны дефектного стыка трубопровода устанавливают по два технологических кольца с зазором между ними, а усиливающую муфту приваривают к ним угловыми швами, которые располагают от наружных торцов колец на расстоянии 0,3...0,5 толщины стенки колец. Патент РФ 2165345. В. Н. Коломеев, В. В. Розанюк, В. С. Буг и др. (Дочерняя компания ДК «Укртрансгаз») [11].

**Присадочный материал для сварки под флюсом**, отличающийся тем, что он дополнительно содержит алюминий, церий и никель при следующем соотношении компонентов, мас. %: 0,5...0,8 бескислородной соли щелочного металла, 0,2...0,3 алюминия, 0,4...1,2 церия, 4,0...6,0 никеля, остальное рубленной сварочной проволоки. Патент РФ 2165346. Д. П. Чепрасов, В. Н. Шабалин, Е. А. Иванайский и др. (Алтайский ГТУ им. И. И. Ползунова) [11].

**Способ центровки двух профильных заготовок**, в частности двух рельсов в машине для контактной стыковой сварки, при котором положение зажатых концов свариваемых заготовок корректируют с помощью сервомеханизмов по сигналам рассогласования, характеризующему смещение осейстыкуемых заготовок. Приведены отличительные признаки способа. Патент РФ 2165347. С. И. Кучук-Яценко, В. П. Кривонос (Институт электросварки им. Е. О. Патона) [11].

Обработал В. Н. Липодав

## ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ

**SCHWEISS- & PRÜFTECHNIK**

(Австрия). — 2000. — № 10 (нем. яз.)

**Vazda D.** Долговечность деталей с учетом ползучести при повышенных температурах, с. 150—152.

**Kolb K.** Влияние точности угла прозвучивания на результаты неразрушающего ультразвукового контроля, с. 153—155.

**Kwasnitschka W.** Дефекты паровых котлов с точки зрения конструктора, с. 155—158.

**Новая** система для плазменной резки, с. 163—164.

**15-я конференция** по неразрушающему контролю в Риме, с. 165.

(Австрия). — 2000. — № 11 (нем. яз.)

**Karaaslan A.** Лазерная сварка чугуна с жаропрочной сталью, с. 170—172.

**Findenig K.** Применение тепловидения, с. 173—174.

**Luthi Th.** Термография, с. 175—177.

**Сварка** трением в твердой фазе, с. 178—179.

(Австрия). — 2000. — № 12 (нем. яз.)

**Vanschen W.** Новое о нанесении покрытий лазерным и атомно-лазерным пучком, с. 150—154.

**Ruthenberg R.** Меньше клинчерных точек — выше стабильность, с. 155—156.

**Porschke M.** Новые разработки в области рентгеновской техники для оценки сварных швов, с. 157—160.

**SCHWEISSEN & SCHNEIDEN**

(Германия). — 2000. — № 9 (нем. яз.)

**Рост** мирового рынка лазерных машин, с. 496.

**Blum P.** Обучение — средство повышения производительности предприятий, с. 498.

**Обработка** поверхности способом термического напыления, с. 500, 502.

**75-летие** «Форда» в Германии, с. 502.

**Hartmann G. F.** Сварка и резка в 1999 г. (значительное оживление), с. 508—512, 514, 515.

**D. von Hofe.** Тенденции техники соединения, с. 516—518, 520—523.

**Limley P., Netwig W. E.** Двухлучевая техника лазерной сварки — прогресс, обеспечивающий двумя лучами, с. 524—526, 528—529.

**Zhang G., Singh S., Hahn O., Kurzok J. R.** Новый параметр прогнозирования долговечности сварных точек на основе名义ального структурного напряжения с учетом эффекта толщины листа, с. 530, 532, 534, 536—537, 540—542.

**Dilthey U., J. de Payrebrune.** Сварка под флюсом высококоричневых мелкозернистых строительных сталей S890QL и S960QL (проф. Дилтай, Аахен), с. 544, 546—548.

**Обзор** литературы по неразрушающему контролю, с. 549—555.



## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**Schilf M., Haug K.** Датчики для автоматизации сварки, с. 566, 568, 570, 572.

**Положение** по приемке для сварочного персонала, с. 573–574.

(Германия). — 2000. — № 10 (нем. яз.)

**Сварка** посудомоечных машин в диапазоне средних частот, с. 589.

**Rippegather D.** Завод проволочных изделий Штайн, с. 590–591.

**Получение** клеевых соединений с помощью лазерного излучения, с. 592.

**Dilthey U., Luder F., Bleck W. et al.** Испытание лазерных соединений на ударную вязкость, с. 598, 600–603.

**Matthes K.-J., Kohler T.** Минирадарная сенсорика в сварочной технике, с. 604–606, 608–609.

**Westkamper E., Scraft D., Schaaf W., Schaeffer C.** Сокращение времени настройки при МАГ-сварке промышленными роботами, с. 610, 612, 614–615.

**Rehfeldt D., Polte T.** Дуговой датчик как элемент обеспечения качества с точки зрения равномерного провара, с. 616–618, 620–621.

**Сварка** живого объекта, с. 622.

**Обзор** литературы по неразрушающему контролю, с. 624–629.

**Наплавка** износостойких покрытий (конференция в Галле в мае 2000 г.), с. 629–633.

(Германия). — 2000. — № 11 (нем. яз.)

**Dilthey U., Resgen U., Dickersbach J., Warmuth P.** Кон тактная и МАГ-сварка тонких оцинкованных листов, с. 660, 662–664, 665–668.

**Schimmer M., Reiling K., Klapp D.** Усовершенствование испытаний на растяжение и сдвиг по DIN 5445 для определения  $\tau$ ,  $\gamma$ -функции приклеенного слоя при склеивании внахлестку, с. 670, 672–674.

**Kuppers A.** Использование европейской инструкции по судам давления 97/23/EG, с. 677–682, 684.

**Hartwig A., Hennemann O.-D.** Особенности при микросклевании без сплошного заполнения зазора kleem, с. 685–687.

**Обзор** литературы по сварке и родственным способам, с. 687, 690–692, 695–697.

**Современная** технология резки ( коллоквиум в Аахене в июне 2000 г.), с. 698, 700, 702–703.

(Германия). — 2000. — № 12 (нем. яз.)

**Новая** установка Ганноверского университета для электронно-лучевой сварки в атмосфере, с. 717.

**Gartner A.** Германское общество сварочной техники — связующее звено между обществом и политикой, с. 722, 724–727.

**Hoberstroh E., Klein H., Lutzeler R.** Обеспечение качества ультразвуковой сварки, с. 728–730, 732–733.

**Thomas K., Michailov V. G., Wohlfahrt H.** Контроль вязкости узких зон влияния в стальных при стыковой сварке давлением, с. 734, 736–738, 740, 742–744, 745.

**Beckert M.** Водород у истоков автогенной техники, с. 746–747.

**Обзор** литературы по неразрушающему контролю, с. 748, 749–751.

**Доклады** DVS в Нюрнберге, 27–29 сентября 2000 г., с. 752, 754, 756, 758–760, 762, 764, 766–771.

## SOUDAGE ET TECHNIQUES CONNEXES

(Франция). — 1999. — Vol. 53, № 3/4  
(франц. яз.)

**Colchen D.** Применение расчетов методом конечных элементов для определения и проверки аналитических моделей расчета напряжений в стыковом соединении из сплава алюминия, с. 3–16.

**Calcagno G., Marmigi R.** Препараторы для контроля горячих поверхностей в процессе сварки — экспериментальное исследование и первые полученные результаты, с. 21–23.

**Beauids D.** Проблемы, связанные со зренiem французских сварщиков, с. 25–31.

**Beaufils D., Petit J.-M.** Внимание — невоспламеняющиеся газы, с. 33.

(Франция). — 1999. — Vol. 53, № 5/6  
(франц. яз.)

**Lieurade H. P., Hunter I.** Определение размеров сварных соединений механосварных конструкций — расчет усталости, с. 3–8.

**Kocak M., Dos Santos J.F.** Сварка и сборка в XXI веке. Лазерная сварка — тенденции промышленного применения и оценка качества, с. 9–16.

**Quintana M. A., Kotecki D. J.** Развитие присадочных материалов для сварки (в частности, для стальных конструкций). Прошлое, настоящее и будущее, с. 17–28.

**Vilpas M.** Использование моделирования для прогнозирования микросегрегации и стойкости к питтинговой коррозии сварных соединений из нержавеющей austenитной стали, с. 29–34.

**Cerjak H.** Моделирование при сварке — инструмент для технологий современной сварки?, с. 35–41.

## sudura<sup>ASR</sup>

(Румыния). — 2000. — № 3 (Septembrie / September) (рум. яз.)

**Schebesta T., Butthoff H.** Повышение производительности благодаря применению подкладок под сварочную ванну многократного использования, с. 5–7.

**Fischer U. M.** Деформации и напряжения при сварке. Практические исследования в области сварки МАГ, с. 8–14.

**Nies H., Haupt D., Muller F.** Сварка порошковой проволокой в судостроении, с. 15–19.

**Aichele G.** Снижение затрат в сварочной технике, с. 20–22.

**Вопросы безопасности**, с. 23–27.

**Dumbrava D., Safta V.** Расчет остаточных напряжений при сварке соединяемых сечений балок. Ч. 3. Асимметричный профиль двутавра, с. 37–44.

**Georgescu V., Iordachescu M.** Анализ текучести и упрочнения материала зоны шва при холоднойстыковой сварке давлением, с. 45–51.

**Lita M., Budau V.** Причины трещинообразования сварного шва газового баллона, с. 52–56.

## TRANSACTIONS OF J W R I

(Япония). — 2000. — Vol. 29, № 1 (англ. яз.)

**Nakata K., Hashimoto T.** Технология поверхностного упрочнения сплава алюминия с помощью процесса плазменно-дугового легирования, с. 1–8.

**He J., Setsuhara Y., Shimizu I., Miyake S.** Механические свойства нанокомпозитов из разнородных материалов, полученных с использованием процесса ионно-лучевого напыления, с. 9–14.

**Baba S., Ueno T., Miyake S.** Низкотемпературный синтез пленок SrTiO<sub>3</sub> плазменным напылением по методу электронно-циклонного резонанса типа зеркального удержания, с. 15–20.

**Sadek A. A., Abass M., Zaghloul B. et al.** Исследование разнородных соединений низкоуглеродистой стали и монеля 400, с. 21–28.

**Naka M., Urai S., Zhang J. et al.** Разработка присадочного материала Cu–Sn или Cu–Zn для соединения керамики, с. 29–32.

**Yamamoto J., Shibayanagi T., Maeda M., Naka M.** Синтез  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> с применением комбинированного процесса механического легирования — плазменно-искрового спекания, с. 33–38.



**Ohmori A., Matsusaka S., Kanazawa T.** Модификация поверхности восстанавливаемой плиты из полиэтилен-трефталата с помощью внедрения частиц и плазменного напыления, с. 39–44.

**Sreekumari K. R., Ozawa M., Kikuchi Y.** Влияние состояния поверхности на прилипание бактерий в сварных швах из нержавеющей стали, с. 45–58.

**Shibahara M., Serizawa H., Murakawa H.** Метод конечных элементов для решения проблем распространения горячих трещин с использованием межфазного температурнозависимого элемента. (Отчет II), с. 59–64.

**Zhang J., Murakawa H.** Цифровое моделирование зарождения вязкой трещины в металле с использованием элемента на основе потенциальной функции типа Ленингара–Джонса, с. 65–72.

**Murakawa H., Zhang J., Fuji K. et al.** Моделирование процесса точечной сварки с помощью метода конечных элементов. (Отчет IV), с. 73–80.

**Zhang J., Murakawa H.** Цифровой анализ вязкого поперечного сжатия у вершины трещины в сварном изделии с механической неоднородностью, с. 81–88.

**Nakacho K., Matsuishi M., Ishihama T. et al.** Предел прочности таврового соединения трубчатой станины нефтяной буровой вышки, с. 89–96.

**Sakino Y., Kamura H., Horikawa K.** Экспериментальное исследование хрупкого разрушения с пластической деформацией в крестообразныхстыковых соединениях, с. 97–104.

**Abe N., Higashino R., Nakagawa N. et al.** Высокоскоростная сварка тонких стальных пластин с использованием системы лазерного диода высокой мощности и высокой плотности излучения, с. 105–113.



(США). — 2000. — Vol. 79,  
№ 9 (англ. яз.)

**Kay W. D.** Десять причин выбора пайки, с. 33–35.

**Urban S. A.** Изготовители получают прибыль, используя новую формулу некорродирующего флюса для пайки, с. 37–39.

**Faridi H. R. et al.** Новый взгляд на ультразвуковую низкотемпературную бесфлюсовую пайку, с. 41–45.

**Ebert H. W.** Повышение надежности соединений труб с трубными досками, с. 47–49.

**Luo J.-G., Acoff V. L.** Реакции на поверхности раздела титана и алюминия в процессе диффузионной сварки, с. 239–243.

**Sun X.** Моделирование процессов рельефной сварки с использованием совмещенного анализа методом конечных элементов, с. 244–251.

**Li P. J., Zhang Y. M.** Анализ механизма свечения дуги и его применение для контроля процесса дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитном газе, с. 252–260.

**Takeshita K.** Уравнение, используемое в модели для прогнозирования предела прочности на растяжение соединений, выполненных пайкой с контактным нагревом, с. 261–265.



(Югославия). — 2000.  
— Vol. 43, № 3–4  
(сербскохорв. яз.)

**Novosel M.** Дуплексные коррозионностойкие стали, с. 69–72.

**Simunovic V.** Образование ферритизированной структуры ЗТВ и ее влияние на свойства сварных соединений дуплексных сталей, с. 75–84.

**Orsulic M., Misina N., Simundic N.** Контроль, технология ремонта и причины повреждения черпаков землесосных снарядов, с. 85–88.



(Словакия). — 2000.  
— Vol. 49, № 6–7  
(словац. яз.)

**Pilous V., Stransky K.** Наплавка и сварка трубопроводов из стали S 355 J2 N, с. 52–53.

**Bakalova P., Grgac P., Palkovic P.** Металлографический анализ точечных микросоединений ниобиевых втулок с вольфрамовой проволокой, изготовленных импульсной лазерной сваркой, с. 53–54.

**Danys P.** Анализ и решение в связи с трецинообразованием вытяжных роторов tandemных печей, с. 54–56.

**Palka V., Postrkova E., Petrik P.** Об исследовании шероховатости поверхности покрытий из NiAl и OT13, выполненных плазменно-дуговым высокотемпературным напылением, с. 56–58.

(Словакия). — 2000.  
— Vol. 49, № 8  
(словац. яз.)

**Bohatka R., Kopriva T., Job P.** Разнородное сварное соединение из сталей 15 128 и X10CrMoVNb91, предназначенных для камеры перегревателя, с. 60–62.

**Bohatka R., Kopriva T., Slovacek M.** Моделирование процесса изготовления разнородного сварного соединения камеры перегревателя из сталей 15 128 и X10CrMoVNb91 с использованием компьютерной программы SYSWELD, с. 63–65.

**Bartos J.** PROCOM — системное средство для снижения стоимости и повышения конкурентоспособности, с. 65–66.

(Словакия). — 2000.  
— Vol. 49, № 9  
(словац. яз.)

**Sobotka J., Sobotkova M., Kubenka M., Plihal A.** Оценка вязкости в надрезе однородного металла шва 0,5Cr0,5Mo0,3V, с. 68–70.

**Можно** ли достичь требуемого уровня ударной вязкости за счет выбора параметров сварки в CO<sub>2</sub>?, с. 70–72.

**Uher V.** Вклад Братиславского института сварки (VUZ) в развитие сварки. Ч. 3. Специализированное сварочное оборудование, с. 73–74.

**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОГО  
ИНСТИТУТА СВАРКИ.  
SC «СТАНДАРТИЗАЦИЯ».**

**Petershagen H.** Германия. XIII-1784-99. Усталостные испытания сварных изделий, 16 с.

**Huo Lixing и др.** КНР. XIII-1812-00. Повышение усталостных свойств сварных соединений ультразвуковым наклепом, 10 с.

**Scott B. и др.** США. XIII-1814-00. XV-1059-00. Значение технологии сборки: Экономика, 9 с.

**Marquis G. и др.** Финляндия. XIII-1822-00. Анализ сварных конструкций с разрушенными и неразрушенными швами, основанный на максимальной вероятности, 13 с.

**Maddox S. J. и др.** UK-Норвегия. XIII-1823-00. Рекомендации по проектированию трубопроводов с учетом усталости кольцевых швов, 34 с.

**Horn A. M. и др.** Норвегия. XIII-1824-00. Сравнительные исследования применимости титана и стали для изготовления гибких трубчатых систем, 15 с.

**Ohta A. и др.** Япония. XIII-1825-00. Использование сварочного материала с низкой температурой превращения позволяет повысить сопротивление усталости вдвое, 7 с.

**Mohri M. и др.** Япония. XIII-1826-00. Применение сварочной проволоки с низкой температурой превращения для повышения сопротивления усталости несущего сварного соединения с угловым швом, 11 с.

**Miki C. и др.** Япония. XIII-1827-00. Наложение дополнительного валика электродом с низкой температурой превращения позволяет повысить сопротивление усталости сварного соединения, 5 с.

**Anami K. и др.** Япония. XIII-1828-00. Характеристики сварных соединений двух типов, подверженных различным методам обработки галтелей, 13 с.

**Кунда H.** Япония. XIII-1829-00. Малоцикловая усталость стыковых соединений с заложенным дефектом, 10 с.

**Miki C. и др.** Япония. XIII-1830-00. Ремонт усталостных разрушений — база данных в сети Интернет, 11 с.

**Udomworarat P. и др.** Япония. XIII-1831-00. Новый тип комбинированного трубчатого К-образного соединения для формовой балки моста, 9 с.

**Mori T. и др.** Япония. XIII-1832-00. Изучение точки рождения усталостной трещины в несущих сварных соединениях с угловыми швами, 9 с.



## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**Matsuoka K. и др.**, Япония. XIII-1833-00. Влияние характера нагружения на длительность зарождения усталостной трещины в сварном соединении, 11 с.

**Miri C. и др.**, Япония. XIII-1834-00. Изучение сопротивления усталости сварных соединений — работы 2000 г. в Японии (рефераты), 11 с.

**Ohta A. и др.**, Япония. XIII-1835-00. Увеличение циклической долговечности путем ремонта с использованием сварочной проволоки с низкой температурой превращения усталостных трещин, зародившихся вокруг коробчатых сварных соединений, 13 с.

**Infante V. и др.**, Португалия. XIII-1836-00. Сравнительные исследования усталостного поведения сварных соединений, восстановленных наклепом с помощью молота, 24 с.

**Branco C. M. и др.**, Португалия. XIII-1837-00. Усталостное поведение двухфазной нержавеющей стали 2205, 24 с.

**Nykanen T.J. и др.**, Финляндия. XIII-1838-00. Зависимость сопротивления усталости поперечнонагруженного крестообразного соединения от геометрии V-образных швов с неполным прошвартовом, 12 с.

**Bayley C. и др.**, Новая Зеландия. XIII-1842-00. Влияние шероховатости поверхности на малоцикловую усталость, 12 с.

**Lihavainen V.-M. и др.**, Финляндия. XIII-1843-00. XV-1062-00. Экспериментальное определение сопротивления усталости сварных соединений, подверженных динамическому нагружению, 13 с.

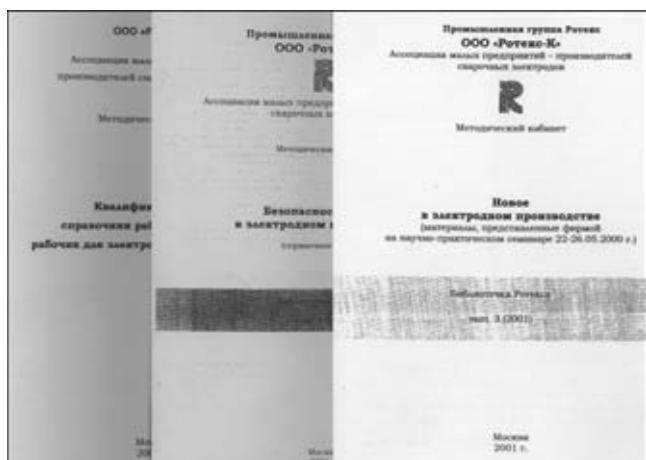
**Alessandri E. и др.**, Франция. XIII-1847-00. Сравнение различных методов расчета напряжений в крестообразных сварных соединениях в зависимости от их геометрии, 18 с.

**Huthe J. и др.**, Франция. XIII-1848-00. Методология обнаружения зарождения трещин или разрушения, 38 с.

**Thouvenel L. и др.**, Франция. XIII-1849-00. Сопротивление усталости соединений, полученных сваркой трением, 28 с.

**Petitpas E. и др.**, Франция. XIII-1850-00. Расчет сопротивления усталости сварных швов с использованием местного подхода, 15 с.

## НОВЫЕ КНИГИ



В последние годы на территории СНГ созданы и успешно функционируют около 250 предприятий по выпуску сварочных электродов. Изготовлением электродов занято значительное количество рабочих, обучаемых непосредственно на производстве. В то же время отсутствует какая-либо современная техническая и методическая литература, которая позволила бы обеспечить требуемый уровень подготовки рабочих различных профессий.

ООО «Ротекс-К» в рамках Ассоциации малых предприятий-производителей электродов разработана программа подготовки и издания справочно-методических и учебных материалов, направленная наполнение отмеченного пробела. Сообщаем о первых справочных изданиях, вышедших в 2000 и 2001 гг.

### Квалификационный справочник работ и профессий рабочих для электродного производства. — М.: Ротекс. — 2000. — 16 с.

В справочник (вып. 1) включены профессии рабочих, специфичные и основные для электродного производства. Рассчитан на шестиразмерную квалификационную сетку. Даны

квалификационные требования. Выпуск подготовлен д-ром техн. наук З. А. Сидлинским.

### Безопасность труда в электродном производстве (Справ. пособие). — М.: Ротекс, 2001. — Вып. 2. — 48 с.

В выпуск 2 включены основные нормативные и справочные материалы, относящиеся к электродному производству (санитарные правила, правила безопасности в метизном производстве).

В приложении приведена номенклатура и технические характеристики оборудования для производства электродов, вы-

пускаемого ООО «Ротекс-К», головного предприятия Промышленной группы Ротекс. Выпуск подготовлен д-ром техн. наук З. А. Сидлинским.

### Новое в электродном производстве. — М.: Ротекс, 2001. — 30 с.

Выпуск 3 включает информацию о развитии деятельности ООО «Ротекс-К», начиная с 1988 г. по настоящее время. Проанализированы пути эффективного развития малых предприятий в области электродного производства. Дана характеристика работ «Ротекса-К» по разработке и модернизации тех-

нологического оборудования, применению оценки сварочно-технологических свойств покрытых электродов. Приведена информация о ресурсосберегающих электродах с основным видом покрытия, российских целлюлозных электродах нового поколения и результатах их производственного испытания.