

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,
И. В. Кривцун, Ю. Н. Ланкин,
Л. М. Лобанов,
В. Д. Позняков,
И. А. Рябцев, К. А. Юценко

Ученые университетов Украины

В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,
В. В. Квасницкий,
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,
В. Д. Кузнецов,
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев
М. М. Студент, Физ.-механ. ин-т
им. Г. В. Карпенко НАНУ, Львов
Зарубежные ученые
Н. П. Алешин
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ
Гуань Цяо
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай
А. С. Зубченко
ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ
М. Зиниград
Ун-т Ариэля, Израиль
В. И. Лысак
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ
У. Райсген
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия
Я. Пилярчик
Ин-т сварки, Гливице, Польша
Г. А. Туричин
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы

Т. В. Юштина (отв. секр.), К. Г. Григоренко,
Н. А. Питула
Электронная верстка
И. Р. Наумова, Д. И. Середя, А. И. Сулима

Адрес редакции

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ
03680, Украина, Киев-150,
ул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Учредители

Национальная академия наук Украины,
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,
МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
ISSN 0005-111X

Журнал входит в перечень утвержденных
Министерством образования и науки
Украины изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Ющенко К. А., Яровицын А. В., Червяков Н. О. Влияние энергетических параметров режимов микроплазменной порошковой наплавки на склонность никелевого сплава ЖС32 к образованию трещин 3
- Ахонин С. В., Белоус В. Ю. Аргонодуговая сварка титана и его сплавов с применением флюсов (Обзор) 8
- Максимова С. В., Воронов В. В., Ковальчук П. В., Ларионов А. В. Получение разнородных соединений молибден – нержавеющей стали с помощью вакуумной пайки 15
- Ефименко Н. Г., Артемова С. В., Барташ С. Н. Влияние режимов сварки на механические свойства, структуру и склонность к хрупкому разрушению сварных соединений стали 15X1М1ФЛ, выполненных без подогрева 21
- Сомонов В. В. Влияние параметров ультразвуковых механических колебаний на структуру и механические свойства металла шва при лазерной сварке ферритных сталей 25
- Фальченко Ю. В., Хохлов М. А., Хохлова Ю. А., Синюк В. С. Формирование диффузионной зоны сварных соединений пористого сплава алюминия с монолитным сплавом магния при химической активации галлием 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Жук Г. В., Мороз И. В., Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П., Посыпайко Ю. Н. Особенности строительства и эксплуатации резервуара РВС-200 для хранения дизельного топлива в Антарктиде на станции «Академик Вернадский» 36
- Дегтярев В. А. Влияние виброобработки на сопротивление усталости и демпфирующую способность конструктивных элементов с остаточными напряжениями 41
- Левченко О. Г., Арламов А. Ю. Мобильный защитный экран для нестационарных рабочих мест ручной дуговой сварки 49

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Диссертации на соискание ученой степени 54

ХРОНИКА

- К 100-летию со дня рождения С. М. Гуревича 56
- Семинар «Сварочные материалы» 57

Информация

- Компания Fronius добавляет функциональность СМТ в сварочную систему TPS/i 59
- ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона — итоги года и перспективы 61

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Б. Є. Патон

Вчені ІЕЗ ім. Є. О. Патона
С. І. Кучук-Яценко (заст. гол. ред.),
В. М. Ліподаєв (заст. гол. ред.),
Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
О. Т. Зельніченко, В. В. Книш,
І. В. Кривцун, Ю. М. Ланкін,
Л. М. Лобанов,
В. Д. Позняков,
І. О. Рябцев, К. А. Ющенко

Вчені університетів України
В. В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків,
В. В. Квасницький,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ,
В. Д. Кузнєцов,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ
М. М. Студент, Фіз.-механ. ін-т
ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Львів

Зарубіжні вчені
М. П. Альошин
МДТУ ім. М. Е. Баумана, Москва, РФ
Гуань Цяо
Ін-т авіаційних технологій, Пекін, Китай
О. С. Зубченко
ДКБ «Гідропрес», Подільськ, РФ
М. Зініград
Ун-т Арієля, Ізраїль
В. І. Лисак
Волгоградський держ. техн. ун-т, РФ
У. Райсген
Ін-т зварювання і з'єднань, Аахен,
Німеччина
Я. Пілярчик
Ін-т зварювання, Глівіце, Польща
Г. А. Туричин
С.-Петербурзький держ. політехн. ун-т, РФ

Редактори
Т. В. Юштіна (від. секр.), К. Г. Григоренко,
Н. А. Притула
Електронне верстання
І. Р. Наумова, Д. І. Середа, А. І. Сулима

Адреса редакції
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ
03680, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевица, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Засновники
Національна академія наук України,
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ,
МА «Зварювання» (видавець)

Свідцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001
ISSN 0005-111x

Журнал входить в перелік затверджених
Міністерством освіти і науки України
видань для публікації праць
здобувачів вчених ступенів

За зміст рекламних матеріалів редакція
журналу відповідальності не несе

Ціна договірної
Видається щомісячно

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- Ющенко К. А., Яровицин О. В., Черв'яков М. О. Вплив енергетичних параметрів режимів мікроплазмового порошкового наплавлення на схильність нікелевого сплаву ЖС32 до утворення тріщин 3
- Ахонін С. В., Білоус В. Ю. Аргонодугове зварювання титану та його сплавів із застосуванням флюсів (Огляд) 8
- Максимова С. В., Воронов В. В., Ковальчук П. В., Ларіонов А. В. Отримання різномірних з'єднань молібден – нержавіюча сталь за допомогою вакуумної пайки 15
- Єфіменко М. Г., Артемова С. В., Барташ С. М. Вплив режимів зварювання на механічні властивості, структуру і схильність до крихкого руйнування зварних з'єднань із сталі 15Х1М1ФЛ, виконаних без підігріву 21
- Сомонов В. В. Вплив параметрів ультразвукових механічних коливань на структуру та механічні властивості металу шва під час лазерного зварювання феритних сталей 25
- Фальченко Ю. В., Хохлов М. А., Хохлова Ю. А., Синюк В. С. Формування дифузійної зони зварних з'єднань пористого сплаву алюмінію з монолітним сплавом магнію при хімічній активації галієм 31

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- Жук Г. В., Мороз І. В., Барвінко А. Ю., Барвінко Ю. П., Посипайко Ю. М. Особливості будівництва та експлуатації резервуара РВС-200 для зберігання дизельного палива в Антарктиді на станції «Академік Вернадський» 36
- Дегтярьов В. О. Вплив віброобробки на опір втомі та демпфувальну здатність конструктивних елементів з залишковими напруженнями 41
- Левченко О. Г., Арламов О. Ю. Мобільний захисний екран для нестаціонарних робочих місць ручного дугового зварювання 49

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

- Дисертації на здобуття наукового ступеня 54

ХРОНІКА

- До 100-річчя від дня народження С. М. Гуревича 56
- Семінар «Зварювальні матеріали» 57

Інформація

- Компанія Fronius додає функціональність СМТ в зварювальну систему TPS/i 59
- ДЗЗО ІЕЗ ім. Є. О. Патона — підсумки року і перспективи 61

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ НА СКЛОННОСТЬ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС32 К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. ЯРОВИЦЫН, Н. О. ЧЕРВЯКОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализирован технологический опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области разработки наплавочных технологий серийного ремонта кромок лопаток авиационных ГТД из никелевых жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией ЖС26 и ЖС32 на основе микроплазменной порошковой наплавки. Показано, что величина погонной энергии при однослойной или многослойной наплавке на сварочном токе до 40 А может достаточно однозначно определять склонность к образованию трещин в соединениях «основной–наплавленный металл». Установлены диапазоны значений суммарных погонных тепловложений, при которых с высокой вероятностью наблюдается отсутствие или наличие трещин – или горячих, или повторного нагрева. Библиогр. 18, рис. 7.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, микроплазменная порошковая наплавка, свариваемость, склонность к образованию трещин, эффективная тепловая мощность дуги, погонная энергия, суммарные погонные тепловложения

Никелевые жаропрочные сплавы ЖС26 и ЖС32 с направленной и монокристаллической структурой, содержащие 60 об. % и более упрочняющей γ' -фазы, применяются в ряде современных авиационных двигателей в качестве материалов литых рабочих лопаток турбины высокого и среднего давления [1, 2]. Их уплотнительные и антивибрационные элементы, работающие при температуре более 900 °С, в первую очередь изнашиваются и повреждаются в процессе эксплуатации. При продлении ресурса авиационного двигателя разработка технологий восстановления кромок рабочих лопаток наплавкой ввиду значительной их стоимости уже длительное время является весьма актуальной [3–9].

Ранее данные никелевые жаропрочные сплавы ввиду высокого содержания упрочняющей γ' -фазы считались несвариваемыми из-за высокой склонности к образованию горячих трещин при применении присадочного материала, идентичного по химическому составу и уровню жаропрочности основному металлу.

Возникновение горячих трещин в наплавленном металле и ЗТВ основного металла с аустенитной структурой обусловлено превышением деформаций, развивающихся при охлаждении сварного соединения или под действием извне, пластичности металла в определенной его зоне [10]. В сплаве ЖС32 при $T = 20 \dots 1100$ °С модуль упругости Юнга E снижается от 140 до 90 ГПа, а термический коэффициент линейного расширения α возрастает в интервале $(1,1 \dots 2,4) \cdot 10^{-5}$ 1/°С

[11]. Ввиду известной пропорциональности деформаций твердых тел в процессе нагрева произведению $E\alpha T$ [12] можно полагать, что высокие значения темпа нарастания растягивающих деформаций при охлаждении сварных соединений с участием сплава ЖС32 обусловлены соответствующим сочетанием указанных физико-механических свойств данного материала при высокой температуре. Считается, что одним из наиболее эффективных технологических приемов предотвращения возникновения трещин при сварке плавлением никелевых жаропрочных сплавов является снижение тепловложений в изделие [13], что в большинстве случаев достигается за счет ограничения силы сварочного тока.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан процесс микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32, который в настоящее время применяется для серийного ремонта рабочих лопаток из сплавов ЖС26 и ЖС32 [5–9].

Особенностью данного процесса является оперативное управление сварочным током в диапазоне 2...35 А, скоростью наплавки в диапазоне 0,2...3,0 м/ч и количеством присадочного порошка в пределах 0,5...5,0 г/мин в зависимости от толщины наплавляемой кромки лопатки и требуемого сечения валика [5–9]. Необходимое сечение наплавленного валика определяется глубиной износа или повреждений кромки лопатки (рис. 1) и может быть обеспечено за один [5–7] или несколько [8, 9] слоев восстановительной наплавки.

В опубликованных ранее работах [5–9] основное внимание уделялось фиксации

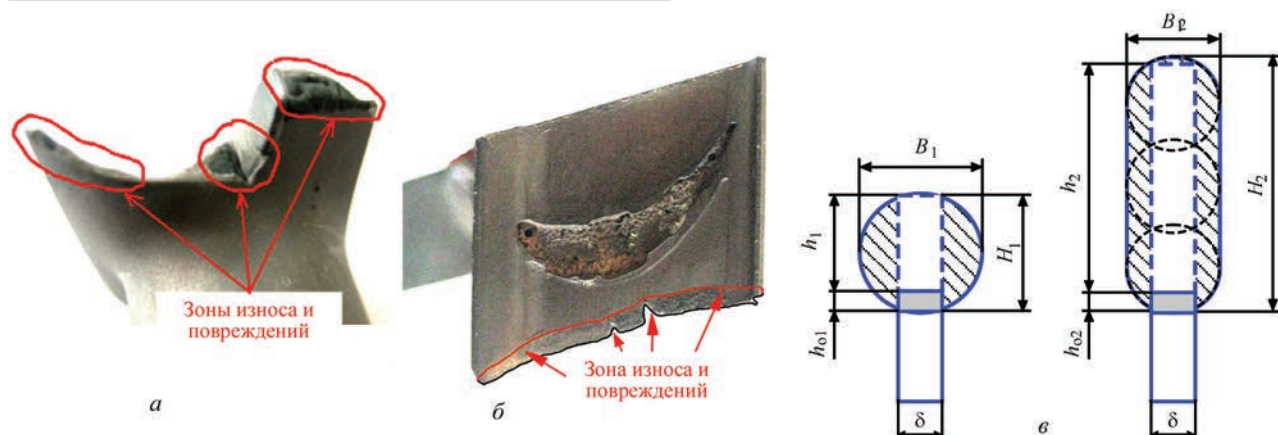


Рис. 1. Внешний вид удаляемой зоны износа, повреждений на кромках лопаток авиационных ГТД (а, б) и схема распределения основного и наплавленного металла в поперечных сечениях валика при их однослойной ($h_1 \leq 4$ мм) и многослойной ($h_1 > 4$ мм) восстановительной наплавке (в) (δ — толщина кромки лопатки; h_{o1} , h_{o2} — глубина проплавления основного металла; H_1 , H_2 — высота наплавленного валика; h_1 , h_2 — эффективная высота наплавленного валика; B_1 , B_2 — ширина наплавленного валика)

дельных режимов микроплазменной наплавки, при которых в сплавах ЖС26 и ЖС32 их склонность к образованию трещин при сварке плавлением и последующей термической обработке не проявлялась.

В последнее время актуально освоение многослойной наплавки сплава ЖС32 ввиду расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей и увеличения зон эксплуатационных повреждений [8, 9]. В связи с этим целью данной работы является оценка технологических диапазонов режимов микроплазменной порошковой наплавки с точки зрения стойкости к образованию трещин в сварном соединении «основной–наплавленный металл» в системах ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32 — как горячих в процессе сварки плавлением, так и возникающих при последующей их термической обработке.

Ряд ведущих западных исследователей характеризует сварочные процессы по положению областей склонности и несклонности к образованию трещин в соответствующих сварных соединениях никелевых жаропрочных сплавов в зависимости от величины тепловложений и скорости сварки [14]. Попыток подобного анализа для рассматриваемых сплавов и процесса микроплазменной порошковой наплавки еще не проводилось.

В нашем случае в качестве анализируемых обобщенных показателей его режимов были выбраны:

- эффективная тепловая мощность дуги $q_{\text{н}}$, характеризующая удельную мощность теплового потока микроплазменной дуги в анод в единицу времени, и в первую очередь зависящая от значения силы сварочного тока [5, 15];

- погонные тепловложения в изделие, характеризующие среднее количество внесенного тепла на 1 мм длины наплавленного валика и, в частности, обусловленные длительностью существова-

ния металла сварочной ванны в расплавленном состоянии [16, 17].

При однослойной наплавке они соответствуют погонной энергии $q_{\text{н}}/v$ (с учетом эффективного КПД нагрева изделия); при многослойной наплавке определяются суммой погонных энергий при наплавке каждого слоя $\Sigma Q_{\text{н}}/L$.

Результаты получены в процессе отработки и освоения промышленных технологий ремонта микроплазменной порошковой наплавкой кромок рабочих лопаток из сплавов ЖС26 и ЖС32 с наработкой до 3...6 тыс. ч, в частности, на авиационном двигателе Д18Т [6, 7]. При этом в случае многослойной наплавки промежуточные термические обработки для релаксации сварочных напряжений после наплавки каждого слоя либо не проводились [8], либо ввиду технологических требований ограничивались режимом 1050 °С (2,5 ч) [6, 7]. При таких режимах термической обработки растворимость γ' -фазы в сплаве ЖС32 не превышает 50 % [18]. Поэтому считается, что они не оказывают значительного релаксирующего эффекта на накопленные сварочные напряжения и деформации в отличие от полного $\gamma + \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$ -превращения в процессе гомогенизации никелевых жаропрочных сплавов ЖС26 и ЖС32.

Статистические данные по режимам микроплазменной порошковой наплавки собирались в ходе регистрации ее электрических параметров и их последующей обработки по методике работы [16]. В диапазоне токов 5...40 А определялись усредненные энергетические показатели режимов наплавки [15, 16]: эффективной тепловой мощности дуги $q_{\text{н}}$ и погонной энергии $q_{\text{н}}/v$. Используемая методика через зависимость $q_{\text{н}}(I)$ позволяла учитывать импульсные режимы сварочного тока с различной формой импульса и скважностью, а также степень сжатия микроплазменной дуги, обусловленную диаметрами каналов плаз-

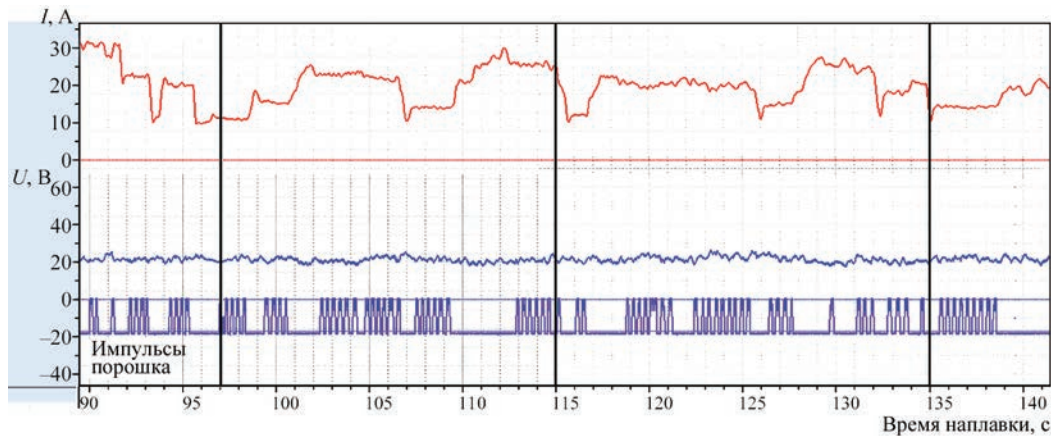


Рис. 2. Фрагмент регистрации параметров режима наплавки торцевой поверхности верхней бандажной полки рабочей лопатки ТСД из сплава ЖС26



Рис. 3. Внешний вид рабочих лопаток авиационных ГТД, восстановленных микроплазменной порошковой наплавкой сплава ЖС32: *а* — рабочая лопатка ТВД, сплав ЖС32, двигатель Д18Т [6]; *б* — рабочая лопатка ТСД, сплав ЖС26, двигатель Д18Т [7]; *в* — небандажированная рабочая лопатка ТВД с внутренней газоохлаждаемой полостью [8]

менного и фокусирующего сопел микроплазмотрона и составом защитного газа в системе $\text{Ar} + (0 \dots 10)\% \text{H}_2$. При этом анализировался процесс наплавки (рис. 2) либо непосредственно опытных и опытно-промышленных партий лопаток авиационных ГТД (рис. 3), либо процесс наплавки образцов в виде узкой подложки [15] шириной до 5 мм, имитирующих реальные режимы восстановления кромок лопаток (рис. 4). В некоторых случаях (см. рис. 4, *а*) такие образцы в дальнейшем использовались для оценки уровня жаропрочности сварного соединения «основной–наплавленный металл» сплава ЖС32 [6].

Анализируемые значения погонных тепловложений в изделие в рассматриваемых сварных соединениях соотносились с технологической прочностью по критерию склонности к образованию трещин в соединении «основной–наплавленный металл» систем никелевых жаропрочных сплавов ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32. Нарушения технологической прочности соответствующего соединения либо не проявлялись в процессе сварки плавлением и при последующей их термической обработке (рис. 5), либо в определенных условиях проявлялись с высокой вероятностью в виде макро- и микротрещин при сварке плавлением и/или при последующей термической обработке наплавленных деталей (рис. 6). Макротрещины выявлялись визуально или капиллярным контролем,

микротрещины — металлографическим анализом продольных сечений соединения «основной–наплавленный металл» при увеличении $\times 50 \dots 200$.

Статистический анализ показал, что для микроплазменной порошковой наплавки значение эффективной тепловой мощности дуги в диапазоне менее 650 Вт, соответственно и значе-

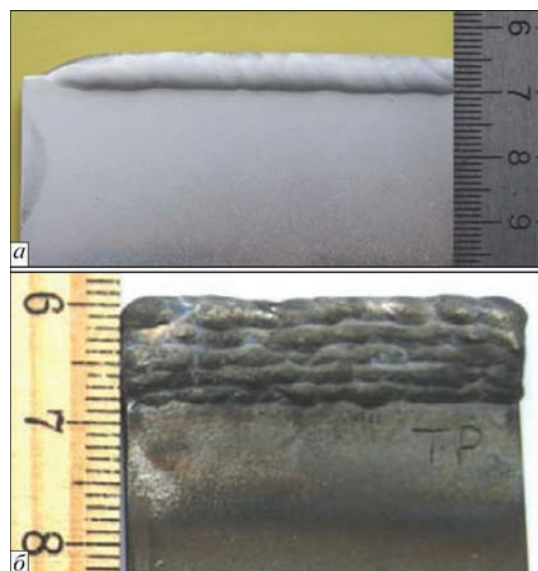


Рис. 4. Внешний вид образцов из сплава ЖС32, имитирующих восстановительную наплавку кромок лопаток авиационных ГТД: *а* — однослойная наплавка на узкую подложку шириной 3,5 мм; *б* — пятислойная наплавка на узкую подложку шириной 2,5 мм

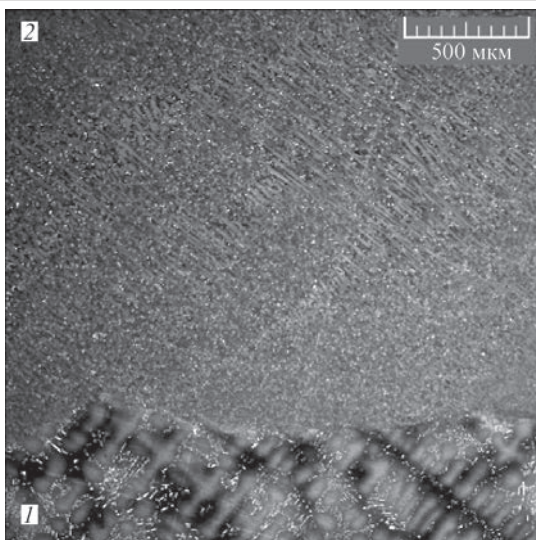


Рис. 5. Пример качественной микроструктуры соединения «основной (1) – напавленный (2) металл» системы ЖС32-ЖС32, район линии сплавления, РЭМ

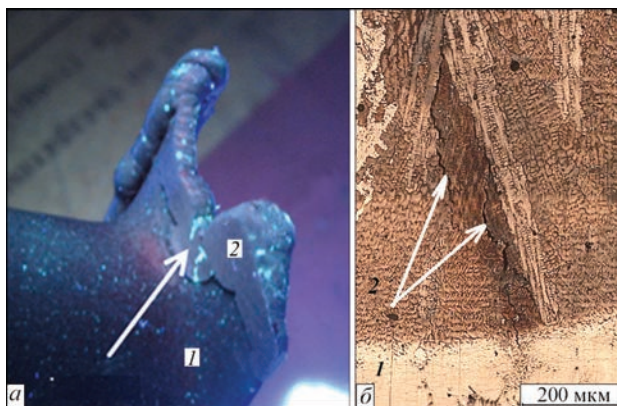


Рис. 6. Примеры внешнего вида макро- и микротрещин (указаны стрелками) в соединении «основной (1) – напавленный (2) металл», выявленных в процессе отработки технологии микроплазменной порошковой наплавки рабочей лопатки ТСД авиационного двигателя Д18Т (сплав ЖС26): а — при капиллярном контроле; б — при металлографическом контроле (оптическая микроскопия)

ние сварочного тока до 30...40 А включительно, нельзя однозначно считать технологическим параметром, полностью определяющим склонность к образованию трещин в соединениях «основной–напавленный металл» на узкой подложке шириной 1...5 мм. Возможны как нарушения технологической прочности в диапазоне значений $q_{\text{и}} = 150...450$ Вт, так и получение соответствующих сварных соединений без образования трещин при $q_{\text{и}} \approx 600$ Вт.

В то же время величина суммарных погонных тепловложений $\Sigma Q_{\Sigma}/L$ (рис. 7) уже достаточно однозначно характеризует вероятность образования трещин в рассматриваемых соединениях «основной–напавленный металл» систем ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32. Граница между зонами, где технологическая прочность соответствующих соединений с высокой вероятностью обеспечивается

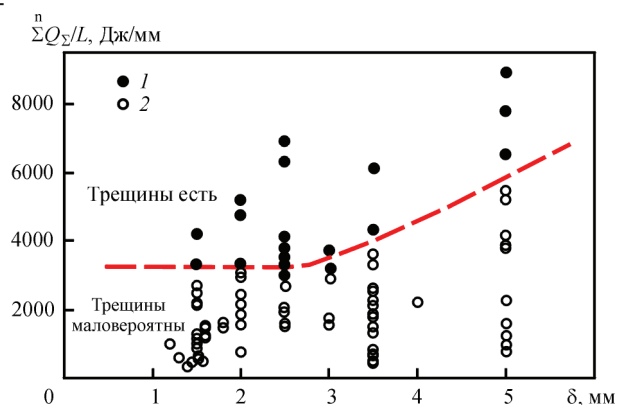


Рис. 7. Зависимость проявления (1) и не проявления (2) склонности к образованию трещин в соединении «основной-напавленный металл» систем ЖС26-ЖС32 и ЖС32-ЖС32 от величины суммарных погонных тепловложений $\Sigma Q_{\Sigma}/L$ и ширины узкой подложки δ

или не обеспечивается, проходит в зависимости от ширины узкой подложки $\delta = 1...5$ мм при $\Sigma Q_{\Sigma}/L = 3200...4200$ Дж/мм. В дальнейшем уровень предельно допустимых погонных тепловложений для серийного ремонта следует дополнительно уточнять в зависимости от степени воздействия ряда технологических факторов: состояния основного металла; высоты напавленного валика и количества его слоев; начальной температуры соединения перед наплавкой последующего слоя и прочих.

Экспериментально установлено, что при однослойной и многослойной микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку шириной 1...5 мм в технологическом диапазоне параметров режимов, характеризующемся $I \leq 40$ А, $q_{\text{и}} \leq 650$ Вт и $\Sigma Q_{\Sigma}/L \leq 3000...4000$ Дж/мм, в зоне термического влияния наплавляемого валика темп нарастания растягивающих деформаций при охлаждении сварного соединения, как правило, не превышает критических значений предельно допустимой деформации для сплавов ЖС26 и ЖС32.

Таким образом показано, что эффективная тепловая мощность дуги и значение сварочного тока в диапазоне до 40 А с точки зрения проявления склонности рассматриваемых никелевых жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией к образованию трещин при сварке плавлением играют значительно меньшую роль, чем представлялось ранее. В частности, это подтверждается возможностью выполнения качественных наплавов при изменении силы сварочного тока в 2-3 раза на протяжении достаточно длительного промежутка времени (см. рис. 2). Более корректно считать, что влияние силы тока и эффективной тепловой мощности дуги проявляется опосредованно через величину суммарных погонных тепловложений наряду со скоростью наплавки и количеством слоев напавленного металла.

Выводы

1. Для условий микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку шириной 1...5 мм ограниченно свариваемого никелевого жаропрочного сплава ЖС32 проанализирован технологический диапазон энергетических показателей режимов наплавки, используемых для восстановления кромок лопаток авиационных ГТД, обеспечивающих отсутствие горячих трещин или трещин повторно-го нагрева.

2. Впервые установлена граница между технологическими диапазонами режимов наплавки, где наблюдается отсутствие или наличие трещин, в том числе горячих в процессе сварки плавлением. Ее положение в зависимости от ширины узкой подложки характеризуется величиной суммарных погонных тепловложений 3200...4200 Дж/мм.

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Ч. II. / В. А. Богуслав и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
2. Мелехов Р. К., Похмурский В. И. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості. Деградація. – К.: Наукова думка, 2003. – 384 с.
3. Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД / Г. И. Пейчев и др. // Технологические системы. – 2000. – № 3. – С. 40–42.
4. Петрик И. А., Перемиловский И. А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Там же. – 2001. – № 3. – С. 90–92.
5. Яровицын О. В. Микроплазмове порошкове наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом γ' -фази 45...65 %: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009. – 21 с.
6. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К. А. Ющенко и др. // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
7. Ющенко К. А., Яровицын А. В. Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»: зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2012. – С. 506–509.
8. Разработка технологии микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32 для восстановления газоохлаждаемых рабочих лопаток авиационной турбины высокого давления / К. А. Ющенко и др. // Там же. – 2016. – С. 696–701.
9. Жеманюк П. Д., Петрик И. А., Чигилейчик С. Л. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства // Автоматическая сварка. – 2015. – № 8. – С. 43–46.

10. Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes. – Part 1: General: ISO 17641-1:2004 – 12 p.
11. Будиновский С. А., Каблов Е. Н., Мубояджан С. А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Сер. Машиностроение. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии», 2011. – С. 26–37.
12. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений: пер. с англ.; под ред. Э. И. Григолюка. – М.: Мир, 1964. – 518 с.
13. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т; под общ. ред. Н. П. Алешина и Г. Г. Чернышева. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
14. DuPont J. N., Lippold J. C., Kisser S. D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009 – 455 p.
15. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. – К.: Екологія, 2007. – 292 с.
16. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5-6. – С. 18–25.
17. Ющенко К. А., Яровицын А. В., Червяков Н. О. Закономерности дискретно-аддитивного формирования микрорельефа кристаллизующегося металла при многослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевых сплавов // Там же. – 2016. – № 5-6. – С. 154–161.
18. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина; под ред. Е. Каблова. – М.: Наука, 2006. – 272 с.

К. А. Ющенко, О. В. Яровицын, М. О. Черв'яков

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ МІКРОПЛАЗМОВОГО ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА СХИЛЬНІСТЬ НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ЖС32 ДО УТВОРЕННЯ ТРІЩИН

Проаналізовано технологічний досвід ІЕЗ ім. Є. О. Патона в області розробки технологій мікроплазмового порошкового наплавлення для серійного ремонту кромок лопаток авіаційних ГТД з нікелевих жароміцних сплавів ЖС26 та ЖС32 з направленою кристалізацією. Показано, що величина погонної енергії при одношаровому або сума погонних енергій при багатшаровому наплавленні на зварювальному струмі до 40 А може достатньо надійно визначати схильність до утворення тріщин у з'єднаннях «основний–наплавлений метал». Встановлено діапазони значень сумарних погонних тепловкладень, при яких з високою ймовірністю спостерігається відсутність або наявність у відповідних зварних з'єднаннях тріщин — або гарячих, або повторного нагріву. Бібліогр. 18, рис. 7.

Ключові слова: нікелеві жароміцні сплави, мікроплазмове порошкове наплавлення, зварюваність, схильність до утворення тріщин, ефективна тепла потужність дуги, погонна енергія, сумарні погонні тепловкладення

Поступила в редакцію 01.08.2016

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛЮСОВ (ОБЗОР)

С. В. АХОНИН, В. Ю. БЕЛОУС

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В ИЭС им. Е.О. Патона в 1950–1980 гг. были заложены научные основы разработки флюсов для сварки и плавки титана и титановых сплавов. Разработана технология автоматической сварки титана плавящимся электродом с применением бескислородных флюсов. Разработаны способ аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) и вольфрамовым электродом с применением присадочной титановой порошковой проволоки (TIG-FW). Эти способы расширяют технологические возможности дуговой сварки вольфрамовым электродом, обеспечивают высокое качество сварных соединений титана и гарантируют отсутствие пор в сварных швах. Библиогр. 17, табл. 4, рис. 9.

Ключевые слова: автоматическая дуговая сварка, аргонодуговая сварка, титановые сплавы, плавящийся электрод, неплавящийся электрод, бескислородные флюсы, порошковая проволока

Сложность технологических процессов сварки титана обусловлена, в первую очередь, его высокой химической активностью. При сварке титан активно поглощает газы из окружающей среды, что приводит к существенному снижению пластических характеристик шва. Кроме того, в металле шва возможно образование пор, что резко снижает усталостные характеристики сварных соединений.

Одним из основоположников проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона работ по решению проблем сварки титана, а также химически активных, тугоплавких и цветных металлов, является профессор С. М. Гуревич. Многолетняя работа руководимого им научно-исследовательского коллектива позволила решить для нашей страны задачу получения качественных сварных швов титана и титановых сплавов. Благодаря детальным исследованиям, проведенным под руководством проф. С. М. Гуревича, были заложены научные основы для разработки бескислородных флюсов и разработаны флюсы для сварки титана. В результате в настоящее время для создания сварных соединений из титана стало возможным применение практически всех известных методов сварки плавлением, таких как плавящимся электродом под флюсом, вольфрамовым электродом, электрошлаковая, электронно-лучевая, а также сварка в твердом состоянии.

Автоматическая сварка титана плавящимся электродом с применением бескислородных флюсов. Сварка плавящимся электродом под флюсом, занимающая по объемам и масштабам промышленного применения одно из ведущих мест в современной индустрии, имеет ряд существенных особенностей по сравнению с другими способами. Прежде всего это наличие оболочки расплавленного флюса, покрывающего зону свар-

ки и защищающего ее от вредного влияния газов атмосферы. При этом происходит взаимодействие металла и флюса — шлака и протекают металлургические реакции, которые могут привести к обогащению шва примесями.

Как известно, флюсы, применяющиеся для сварки сталей, обладают по отношению к железу различными окислительными свойствами. Исследования, проведенные в 1950-х годах в нашей стране и за рубежом показали, что при сварке титана даже под низкремнистыми, условно называемыми основными, флюсами, характеризующимися наименьшей окислительной способностью, происходит интенсивное насыщение металла шва кислородом, вследствие чего соединение получается хрупким [1].

В результате в начальный период промышленного применения титана как конструкционного материала некоторые зарубежные исследователи даже отрицали принципиальную возможность использования для титана сварки под флюсом, поскольку в то время металлургам не удалось подобрать материал, который не реагировал бы с ним и не загрязнял его кислородом [2].

Теоретические исследования, подтвержденные опытными работами в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством профессора С. М. Гуревича, позволили опровергнуть это ошибочное мнение. Была доказана возможность сварки титана под специальными тугоплавкими флюсами, разработаны принципы построения и созданы новые системы галлоидных бескислородных флюсов [3].

Анализ металлургических и технологических особенностей сварки титана позволил установить особые требования, которым должны соответствовать созданные системы флюсов. Главное из них, это полное отсутствие оксидов. Было установлено, что наличие во флюсе даже таких стойких ок-

сидов, как Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 не исключает окисления металла шва (рис. 1). Только полное удаление из флюса оксидов обеспечивает в наплавленном металле содержание кислорода менее 0,1 %.

Исследования, проведенные под руководством проф. С. М. Гуревича, показали, что бескислородные флюсы для сварки титана и его сплавов, отвечающие указанным требованиям, можно создать, применяя в качестве компонентов фториды и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов [4]. К числу важнейших металлургических особенностей сварки титана под флюсом необходимо в первую очередь отнести взаимодействие металла сварочной ванны с флюсом. Термодинамические расчеты, а также результаты некоторых прямых исследований показали, что возможны реакции двух типов: реакция титана с компонентами флюса и реакция оксидов титана с флюсом. Термодинамические расчеты, исследования шлаковой корки и наплавленного металла позволили сформулировать требования к флюсам для сварки титановых сплавов:

- для наиболее полного взаимодействия флюса с титаном и его оксидами в составе флюса желательно иметь максимальное количество фторидов и минимальное хлоридов;
- в качестве компонентов флюса больше всего подходят фториды, характеризующиеся наибольшей способностью реагировать с оксидами титана.

Лучшие результаты были получены при использовании в качестве основы флюса CaF_2 . Важное свойство этого тугоплавкого фторида — его способность интенсивно взаимодействовать с водяным паром с образованием фтористого водорода, присутствие которого в зоне дуги установлено экспериментально. Термодинамические расчеты показывают возможность протекания реакции между CaF_2 и водяным паром при температурах выше 2000 °С. Возможность удаления абсорбированной влаги из зоны сварки и благодаря этому защита металла шва от насыщения водородом и кислородом является важной особенностью сварки титана под флюсом на основе CaF_2 , что является одной из причин полного отсутствия пористости в швах, выполненных плавящимся электродом под фторидными флюсами.

Выбор оптимальных составов флюсов на основе CaF_2 является сложной задачей в связи с тем, что с более легкоплавкими хлоридами образуются многочисленные эвтектики, а области концентраций расплавов, характеризующихся достаточно высокой температурой плавления, весьма ограничены. На основе исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, разработан

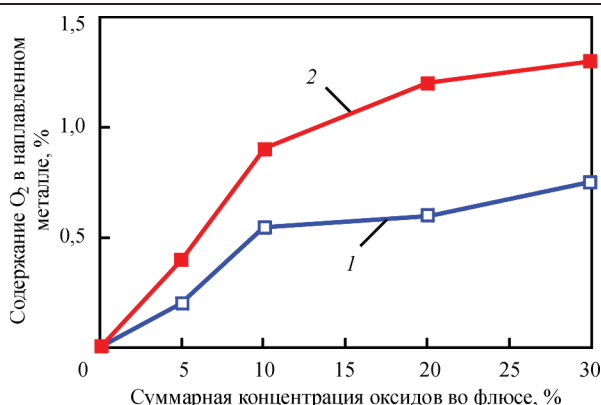


Рис. 1. Содержание кислорода в наплавленном слое в зависимости от концентрации некоторых оксидов во флюсе: 1 — Al_2O_3 ; 2 — SiO_2

ряд бескислородных галогенидных флюсов серии АНТ, таких как АНТ-1, АНТ-3, АНТ-7, предназначенных для сварки плавящимся электродом титана и его сплавов [3, 5]. Созданные флюсы в процессе сварки надежно изолируют ванну расплавленного металла и остывающие участки шва и ЗТВ от вредного контакта с газами воздуха, о чем свидетельствуют результаты анализа содержания газов в металле шва технического титана (табл. 1). Чтобы содержание примесей в металле шва было на уровне их концентрации в ОМ, необходимо применять флюс с содержанием влаги не более 0,05 %. Гранулометрический состав флюса от 0,3 до 1,5 мм. Исследования показали, что швы, сваренные под флюсом, не имеют пор, шлаковых включений, трещин и других дефектов.

Технологические свойства флюсов серии АНТ, предназначенных для автоматической сварки титана плавящимся электродом (стабильность процесса, хорошее формирование шва и др.), во многом зависят от чистоты CaF_2 . Установлено, что причиной ухудшения свойств флюса является содержание во флюсе CaO , количество которого не должно превышать 0,5 %. С целью обеспечения максимальной чистоты флюсов, в первую очередь по содержанию оксидов, для их изготовления используются химически чистые реактивы, не допускается применение минералов и технически чистых компонентов.

Создание сварочных материалов для дуговой сварки под флюсом титана послужило также основой для разработки флюсов и технологии электрошлаковой сварки и плавки титана [6].

Технология автоматической сварки титана плавящимся электродом под бескислородными флю-

Таблица 1. Содержание основных примесей в металле швов сварных соединений титана ВТ1-00, выполненных под флюсом АНТ-1

Толщина металла b , мм	Содержание, % (ОМ/металл шва)			
	N_2	O_2	H_2	C
2,0	0,029/0,025	0,085/0,085	0,008/0,007	0,07/0,05
4,5	0,037/0,030	0,078/0,077	0,004/0,005	0,06/0,04

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений (ВТ1-0), выполненных с флюсогазовой защитой и с защитой в камере с контролируемой атмосферой

Способ защиты сварочной ванны	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²
Флюсогазовая	315	407	28,6	61,3	83
Инертным газом	310	402	30,2	62,8	81

сами разработана в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством проф. С. М. Гуревича [7]. Этим способом сварки на титане можно выполнять все основные типы швов: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные при толщине соединяемых элементов от 3 до 40 мм.

Весьма существенная особенность автоматической сварки титана под флюсом — необходимость выполнения процесса при минимально допустимом расстоянии между поверхностью свариваемого металла и нижней точкой мундштука — сухом вылете электродной проволоки. Это обусловлено тем, что титан имеет очень высокие удельное электросопротивление и увеличение сухого вылета приводит к чрезмерному разогреву электродной проволоки, насыщению ее вредными газовыми примесями, нарушению стабильности процесса сварки и, как следствие, к ухудшению механических свойств и качества формирования шва. Сварка выполняется на постоянном токе обратной полярности. Сварка на прямой полярности и переменном токе резко ухудшает качество формирования шва. Применимы сварочные проволоки диаметром 2,5; 3,0; 4,0 и 5,0 мм. Применение проволок большего диаметра затруднено вследствие их повышенной жесткости. Для сварки технического титана ВТ 1-00 и ВТ 1-0 и низколегированных сплавов ОТ4, ОТ4-0, ОТ4-1, ВТ5, ВТ5-1, 4200 используется сварочная проволока марок ВТ1-00св. Для сварки средне- и высоколегированных сплавов (например, ВТ6С, ВТ14, ВТ20 и др.) применяют проволоки марок СПТ2, ВТ20св и др. Сварку сплавов типа ПТ-3В, ПТ-7М рекомендуется выполнять проволокой 2В.

Сварку продольных швов на металле небольшой толщины (3...6 мм), а также многослойные швы на металле средней толщины рекомендуется выполнять на малых токах под флюсом АНТ-1. Для сварки кольцевых швов малой толщины на титане и всех односторонних швов средней толщины применяется флюс АНТ-3. Флюсы АНТ-5 и АНТ-7 предназначены для соединения металла больших толщин при сварке на токах, превышающих 700 А.

Сравнение результатов испытаний металла швов, выполненных автоматической сваркой под флюсом и неплавящимся вольфрамовым электродом в камере с атмосферой аргона, показало, что прочностные и пластические характеристики в обоих случаях практически равнозначны. Одна-

ко вязкость швов, сваренных под флюсом, хотя и находится на достаточно высоком уровне, уступает соответствующим показателям швов, выполненных вольфрамовым электродом в аргоне. Так, ударная вязкость KCU металла шва сплава ВТ5-1, сваренного автоматической сваркой под флюсом, составляет 48 Дж/см², при этом ударная вязкость металла шва сплава ВТ5-1, выполненного сваркой вольфрамовым электродом в среде аргона, имеет ударную вязкость $KCU = 62$ Дж/см².

Для сварки конструкций особо ответственного назначения был разработан комбинированный флюсогазовый способ защиты сварочной ванны в процессе автоматической сварки плавящимся электродом [8]. Сущность его заключается в том, что в бункере специальной конструкции при подаче флюса в зону сварки производится продувка флюса аргоном. В результате вытеснения воздуха, находящегося между гранулами флюса, аргоном полностью исключается попадание азота и кислорода в сварочную ванну. Механические свойства металла шва, выполненного плавящимся электродом с флюсогазовой защитой, и сваренного вольфрамовым электродом в камере с инертной атмосферой аргона, были одинаковы (табл. 2). Расход аргона, необходимого для продувки флюса в бункере, составляет 3...4 л/мин.

Стыковые соединения толщиной до 10 мм можно успешно сваривать с одной стороны. Стыковые соединения толщиной 10...16 мм целесообразно выполнять двухсторонней сваркой на медной водоохлаждаемой подкладке с защитой инертным газом обратной стороны стыка. Для лучшего проплавления стыка и качества формирования шва на свариваемых кромках целесообразно выполнять Х-образную разделку. При этом наиболее технологичной является разделка кромок с углом раскрытия 90°. В этом случае обеспечивается высокая стабильность процесса сварки, хорошая отделимость шлаковой корки, а также увеличивается глубина проплавления. На основании экспериментальных данных установлена зависимость значения сварочного тока от скорости подачи электродной проволоки (рис. 2).

Автоматическую сварку под флюсом титановых изделий толщиной свыше 16...18 мм выполняют в разделку кромок путем наложения нескольких слоев. Перед сваркой каждого последующего слоя необходимо тщательно зачищать поверхность предыдущего шва. Сократить количество операций по зачистке швов можно за счет применения сварки двумя дугами, расположенными одна за другой и смещенными на некоторое расстояние поперек оси шва. Этот метод позволяет получить швы с большим коэффициентом заполнения разделки кромок, плавным переходом

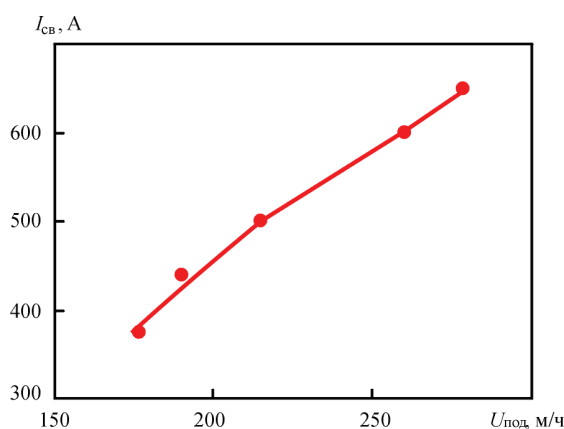


Рис. 2. Зависимость значения сварочного тока от скорости подачи электродной проволоки при автоматической сварке под флюсом титана

от ОМ к усилению шва и высокими показателями прочности и пластичности (табл. 3). Данный метод эффективен также при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений [1].

Аргонодуговая сварка титана вольфрамовым электродом с применением бескислородных флюсов. Как показал опыт применения автоматической сварки титана плавящимся электродом под бескислородными фторидно-хлоридными флюсами, выполненные швы отличаются высокой плотностью и поры в них отсутствуют. На это обратили внимание авторы работ [9, 10], изучавшие методы борьбы с пористостью, возникающей при аргонодуговой сварке титана неплавящимся электродом. Они экспериментально показали, что положительное влияние фторидов на плотность швов сохраняется и при сварке в инертной атмосфере. Так, впервые для аргонодуговой сварки титана появился радикальный способ предупреждения пористости швов металлургическим путем — сварка с активирующим реагентом CaF_2 . В дальнейшем были созданы более эффективные и технологичные флюсы для сварки титана и его сплавов вольфрамовым электродом. Кроме того, как оказалось, галогениды щелочных и щелочноземельных металлов при попадании в зону дуги контрагируют дугу и изменяют характер проплавления металла и формирования швов. При движении дуги вдоль стыка в момент ее перехода с поверхности металла, не покрытой флюсом, на слой галогенида визуально отмечается сжатие дуги и изменение ее цвета, дуга погружается вглубь металла; ширина шва уменьшается.

Таблица 3. Механические свойства сварных соединений, выполненных с автоматической двухдуговой сваркой под флюсом АНТ-7*

Марка сплава	b , мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	a_n , Дж/см ²
ПТ-3В	25	676/617	727/677	20,2/19,5	39,6/36,2	68/62
ОТ4	32	694/661	769/739	23,2/22,3	38,1/35,3	96/88

*Электродная проволока ВТ1-0.

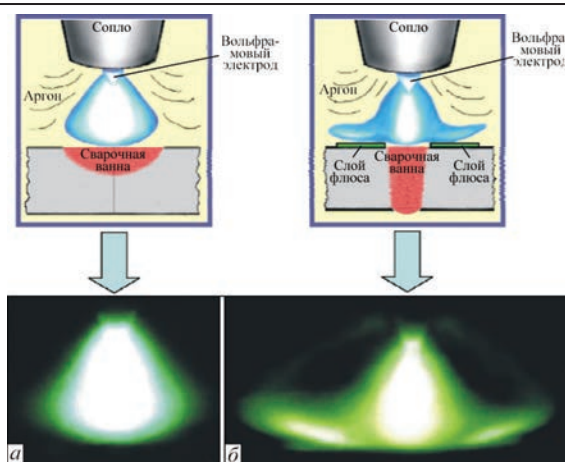


Рис. 3. Схема и фотография дуги баз флюса (а) и с флюсом (б)

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования влияния на процесс сварки вольфрамовым электродом фторидов щелочных и щелочноземельных металлов, таких, например, как LiF , CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 , KF , RbF , CsF , NaF , MgF_2 и др., исследованы двойные и тройные фторидные системы и в результате разработаны флюсы АНТ-17, АНТ-23 и АНТ-25, предназначенные для автоматической аргонодуговой сварки титана вольфрамовым электродом. Разработан способ аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) [1, 11] и с присадочной титановой порошковой проволокой (TIG-FW) [11, 12]. В обоих случаях защитная роль флюса второстепенна. Его главная функция — повышение технологических возможностей дуги. Глубокое проплавление металла, узкие швы, небольшая протяженность зоны термического влияния, относительно низкая погонная энергия и, как следствие, уменьшение остаточных сварочных деформаций — вот неполный перечень преимуществ процесса сварки TIG-F (рис. 3).

Добавление флюса в зону горения дуги при аргонодуговой сварке приводит к изменению пространственных характеристик и электрических параметров дуги. В частности, к сжатию столба дуги и увеличению плотности тока на аноде (рис. 4), и, как следствие, позволяет влиять на параметры сварных швов и, в первую очередь, на увеличение глубины проплавления [12, 13].

Наблюдаемые физические явления в дуге, зависящие, в первую очередь, от состава флюса, определяют и технологические преимущества сварки TIG-F и TIG-FW по сравнению со сваркой методом TIG. При неизменном значении сварочного тока и скорости сварки применение флюса значительно увеличивает глубину провара, уменьшает ширину швов, а также снижает погонную энергию (рис. 5). Однако при повышении тока свыше 200 А наносимого количе-

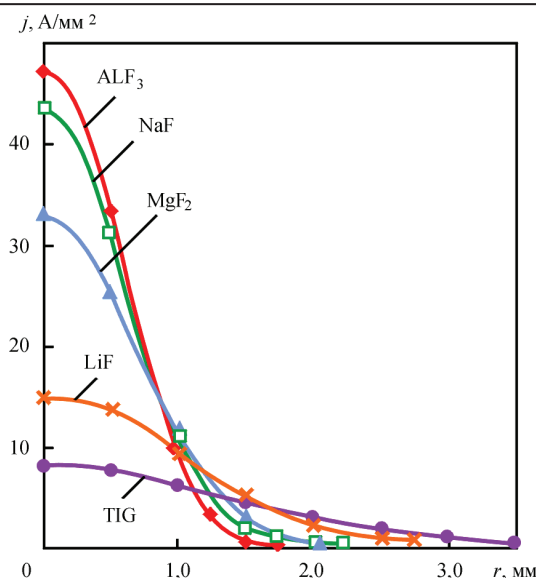


Рис. 4. Радиальное распределение плотности тока в анодном пятне при сварке титана с различными фторидами ($I_{св} = 100$ А; $v_{св} = 10$ м/ч)

ства флюса становится уже недостаточно и эффективность флюса резко падает. Учитывая такую особенность сварки TIG-F, этот способ сварки рекомендуется для выполнения швов на металле толщиной от 0,8 до 6,0 мм [14, 15]. Флюс АНТ-23 предназначен для сварки листов толщиной 0,8...3,0 мм, флюс АНТ-25 — для сварки листов толщиной 3...6 мм за один проход без разделки кромок. Малый объем сварочной ванны позволяет применить однопроводную автоматическую сварку по флюсу АНТ-25 для соединения металла толщиной до 6 мм на вертикальной плоскости.

Аргондуговая сварка титана вольфрамовым электродом с применением порошковых

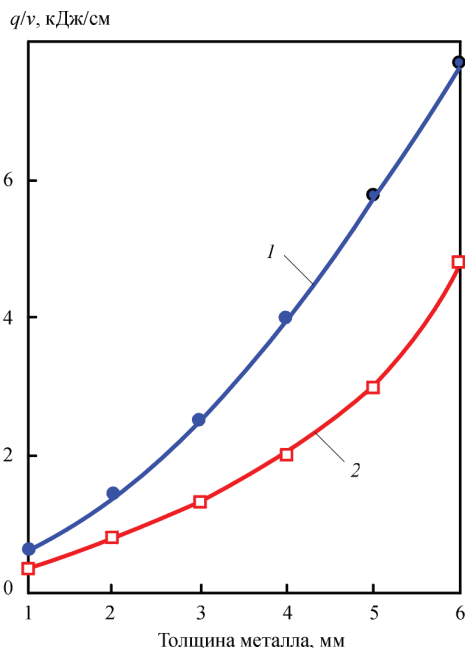


Рис. 5. Зависимость погонной энергии от толщины металла при сварке без флюса (1) и по флюсу (2) (флюсы АНТ-23А и АНТ-25А)

проволок. Как уже упоминалось, при повышении тока свыше 200 А предварительно нанесенного на свариваемые кромки количества флюса становится уже недостаточно и эффективность флюса падает. Наибольшее влияние на глубину проплавления оказывает количество флюса, вводимого в дугу, т. е. толщина наносимого слоя, так как большей толщине слоя флюса соответствует большая глубина провара. Поэтому для сварки титана толщиной более 6 мм разработан принципиально новый для титана сварочный материал — присадочная порошковая проволока (рис. 6), и технология сварки титана вольфрамовым электродом с применением порошковой проволоки TIG-FW. В своей основе порошковая проволока представляет собой оболочку из титановой фольги, заполненную флюсовым наполнителем [14, 15]. Разработано два типа порошковой проволоки — ППТ-1 и ППТ-2, отличающиеся как по химическому составу наполнителя, так и по конструкции. Проволоку марки ППТ-1 используют в тех случаях, когда по условиям эксплуатации не требуется усиление швов. Проволока марки ППТ-2, внутри которой находится титановая проволока сплошного сечения, позволяет получать швы с усилением.

Применение присадочной порошковой проволоки позволяет увеличить количество флюса в зоне сварки и благодаря этому метод TIG-FW (рис. 7) позволяет сваривать сплавы титана толщиной 6,0...16,0 мм за один проход без разделки кромок. Порошковая проволока может успешно

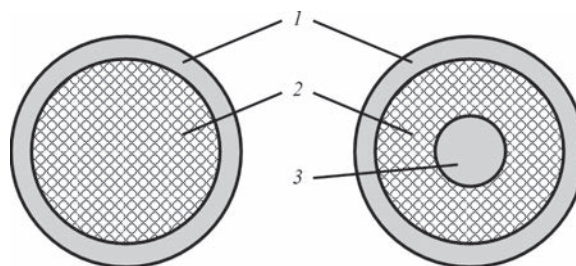


Рис. 6. Поперечное сечение порошковой проволоки: 1 — оболочка; 2 — флюсовый наполнитель; 3 — сердечник

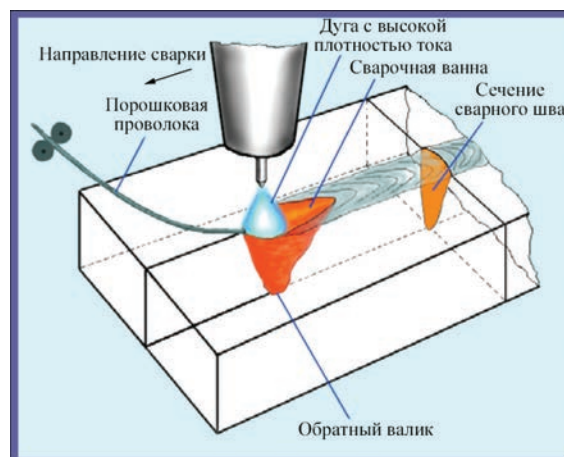


Рис. 7. Схема TIG сварки с порошковой проволокой

Таблица 4. Объемная доля пор в соединениях титана, выполненных различными способами сварки

Способ сварки	Металл	Объемная доля пор m_2 , %
Аргондугловая сварка (TIG)	Основной металл	0
	Шов, полученный при сквозном проплавлении пластины	0,82
	Шов, выполненный по слою флюса АНТ-17А	0,65
	Шов, выполненный по слою флюса АНТ-25А	0,43
Электронно-лучевая сварка (EBW)	Основной металл	0
	Шов, полученный при сквозном проплавлении пластины	1,40
	Стыковой шов	1,34
Электрошлаковая сварка (ESW)	Основной металл	0
	Шов	0,46

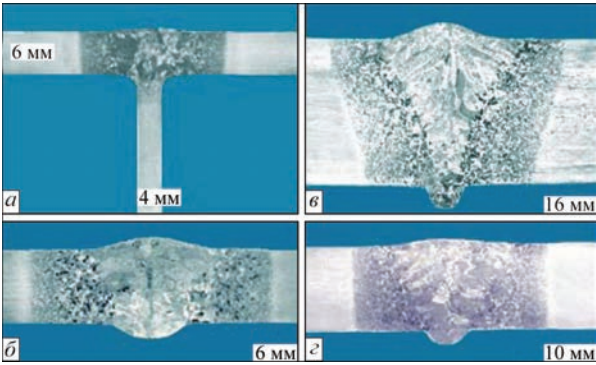


Рис. 8. Макрошлифы сварных соединений, выполненных по флюсу АНТ-25А (а, б); ППТ-2 (в); ППТ-1 (г)

применяться для выполнения не только стыковых, но и тавровых соединений. В качестве примера на рис. 8 представлены макрошлифы сварных соединений различных типов, выполненных TIG-F и TIG-FW методами.

После сварки на поверхности шва остается слой затвердевшего шлака, являющегося дополнительной защитой остывающего металла. Удаление его производится также, как и после сварки по флюсу. Кроме технологических преимуществ применение флюсов и порошковых проволок при аргондугловой сварке титана существенно влияет на металлургические процессы в сварочной ванне, в частности, предупреждает образование пор в швах. Известно, что пористость является основным типом металлургических дефектов сварных соединений титановых сплавов, выполненных как дуговой, так и лучевыми методами сварки. Наличие пор в швах мало влияет на свойства сварных соединений при статических нагрузках, но существенно снижает их работоспособность в условиях динамических нагрузок, резко уменьшая предел усталости.

Образующиеся в сварном шве дефекты в виде пор существенно снижают сопротивление усталости сварных соединений. Применение же галогенидных флюсов и порошковых проволок позволяет предотвратить образование пор в швах (табл. 4).

Как видно из приведенных данных, объемная доля пор в металле швов, выполненных на техническом титане различными способами сварки плавлением, существенно отличается по величине.

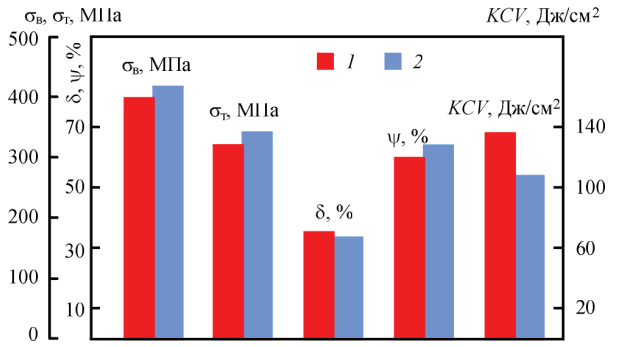


Рис. 9. Механические характеристики сварного соединения нелегированного титана марки Grade 2 (толщина 6 мм): 1 — основной металл; 2 — металл шва

не. Максимальное количество пор имеют швы, выполненные ЭЛС, а минимальную — ЭШС и TIG с применением флюса, что объясняется активным металлургическим взаимодействием флюса с расплавленным металлом сварочной ванны [16].

Исследования показали, что применение флюсов и порошковых проволок при сварке приводит к связыванию водорода в сварочной ванне фтором в гидридофториды типа TiF_xH_y , остающиеся в металле шва в виде микроскопических шлаковых включений, которые, как показали испытания, не оказывают существенного влияния на механические свойства сварных соединений (рис. 9), выполненные с применением флюсов.

Применение сварки по слою флюса позволяет существенно поднять технико-экономические показатели сварки [17]. Так, например, при сварке титанового листа толщиной 5 мм время сварки, расход сварочной проволоки и аргона снижается более чем на 60 %, а потребление электроэнергии — более чем на 50 %. При этом себестоимость 1 м шва (с учетом дополнительных затрат на флюс) уменьшается почти в два раза.

Выводы

1. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана серия бескислородных флюсов и технология сварки плавлением титана плавящимся электродом с использованием разработанных флюсов для сварки титана и сплавов на его основе.

2. Разработанные флюсы и метод сварки титана вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) расширяют технологические возможности сварки вольфрамовым электродом, обеспечивают увеличенную проплавливающую способность дуги, отсутствие пор в сварных швах и высокое качество получаемых соединений.

3. Применение порошковой проволоки и метод сварки титана вольфрамовым электродом TIG-FW позволяет проваривать металл толщиной до 16 мм за один проход и гарантирует отсутствие пор в швах и высокое качество получаемых соединений.

1. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
2. Hoefer H. W. Fusion welding of titanium in jet engine applications // Hawker-Siddley Techn. Journal. – 1958. – v.1, № 1. – P. 61–64.
3. Гуревич С. М. Флюсы для автоматической сварки титановых сплавов // Авиационная промышленность. – 1961. – № 5. – С. 55–59.
4. Гуревич С. М. Вопросы металлургии сварки титана // Титан и его сплавы. – 1960. – Вып. 3. – С. 127–132.
5. Гуревич С. М. Сварка титана под флюсом // Авиационная промышленность. – 1957. – № 4. – С. 13–16.
6. Гуревич С. М., Дидковский В. П. Технология электрошлаковой сварки покровов из титановых сплавов // Сб: Новые сварочные процессы. – М.: Машиностроение, 1960. – С. 187–191.
7. Гуревич С. М. Технология сварки деталей из титана и его сплавов // Передовой научно-технический и производственный опыт: сб. тр. – К.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 18–25.
8. Гуревич С. М. Некоторые особенности сварки титана под флюсом. // Автоматическая сварка. – 1957. – № 5. – С. 38–48.
9. А. с. 183303 (СССР). Способ аргоно-дуговой сварки титановых сплавов / А. Н. Тимошенко, А. Ф. Пиджарый, А. С. Бессонов; опубл. 1966; Бюл. № 3.
10. Маслюков О. А. Борьба с пористостью при аргонодуговой сварке титановых и других металлов и сплавов // Тезисы докладов всесоюзного совещания по сварке плавлением металлов малых толщин. – К.: Изд-во Координационного совета по сварке ИЭС им. Е. О. Патона, 1965. – С. 49–53.
11. Zamkov V. N., Akhonin S. V. New methods for welding titanium and manufacture of unique large-sized titanium semi-finished products // Paton Welding Journal. – 2001. – № 9. – P. 33–39.12.

12. Contraction of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding / B. E. Paton et al. // The Paton Welding Journal. – 2000. – № 1. – P. 5–11.
13. Prilutsky V. P., Yeroshenko L. E., Zamkov V. N. Distribution of Vapours of Metals and Welding Consumables in Arc During TIG Welding // Book of Proceedings. The ASM International European Conference on Welding and Joining Science and Technology, 10–12 March 1997, Madrid.
14. Zamkov V. N., Prilutsky V. P., Topolsky V. F. Consumables and Methods of for Welding Titanium for Aerospace Engineering Application // Journal of Advanced Materials. – 2000. – v. 32, № 3. – P. 57–61.
15. Paton B. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Le soudage A-TIG du titane et de ses alliages // Soudage et techniques connexes. – 1998. – vol. 52-n. – P. 11–12.
16. Прилуцкий В. П., Ахонин С. В. Сварка титановых сплавов вольфрамовым электродом в аргоне с применением флюсов // Тр. Междун. конф. «Титан-2007 в СНГ». – Ялта, 15–18 апр. 2007. – С. 441–448.
17. Prilutsky V. P., Akhonin S. V. TIG welding of titanium alloys using fluxes // Welding in the World. – 2014. – 58. – P. 245–251.

С. В. Ахонін, В. Ю. Білоус

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

АРГОНОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФЛЮСІВ (ОГЛЯД)

В ІЕЗ ім. Є. О. Патона в 1950–1980 рр. були закладені наукові основи розробки флюсів для зварювання і плавки титану і титанових сплавів. Розроблено технологію автоматичного зварювання титану плавким електродом із застосуванням безкисневих флюсів. Розроблено спосіб аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом по шару флюсу (TIG-F) і вольфрамовим електродом із застосуванням присадного титанового порошкового дроту (TIG-FW). Ці способи розширюють технологічні можливості дугового зварювання вольфрамовим електродом, забезпечують високу якість зварних з'єднань титану і гарантують відсутність пір в зварних швах. Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: автоматичне дугове зварювання, аргонодугове зварювання, титанові сплави, плавкий електрод, неплавкий електрод, безкисневі флюси, порошковий дріт

Поступила в редакцію 23.01.2016

НОВАЯ КНИГА

Сборник трудов восьмой Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2016. – 130 с. Мягкий переплет, 200x290 мм.

В сборнике представлены доклады восьмой Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (19–23 сентября 2016 г., Одесса, Украина), в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из разных стран. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

Заказы на сборник просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».

Сборники предыдущих семи конференций MMITWRP

за 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 гг. находятся в открытом доступе

на сайте Издательского Дома «Патон»: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings/mmwrp>.



ПОЛУЧЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОЛИБДЕН–НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ С ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНОЙ ПАЙКИ

С. В. МАКСИМОВА, В. В. ВОРОНОВ, П. В. КОВАЛЬЧУК, А. В. ЛАРИОНОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В данной работе показана возможность использования припоев со структурой твердого раствора на базе системы Cu–Mn–Ni для пайки разнородных соединений молибден–нержавеющая сталь, представлены результаты микрорентгеноспектральных исследований, прочностные характеристики паяных соединений. Микрорентгеноспектральными исследованиями установлено, что при получении разнородных соединений молибден–нержавеющая сталь с использованием припоев на базе системы Cu–Mn–Ni центральная зона паяного шва состоит из твердого раствора на основе меди. Диффузионная зона шва (со стороны молибдена) образована фазой на основе молибдена, которая выделяется в виде непрерывной полосы вдоль паяного шва. Применение припоя на базе системы Cu–Mn–Ni со структурой твердого раствора обеспечивает формирование плотных паяных швов без трещин. Прочность на срез находится на уровне 200...210 МПа при разрушении по паяному шву и 300 МПа – при разрушении по основному металлу (молибдену). Библиогр. 9, табл. 3, рис. 10.

Ключевые слова: разнородные соединения, вакуумная пайка, припой, структура, твердый раствор, шов, механические свойства

Оптимальные эксплуатационные свойства ряда конструкций можно обеспечить путем применения составных комбинированных узлов из разнородных металлов. В этом случае наиболее полно реализуются преимущества каждого из них и экономятся дорогие металлы [1]. Соединения разнородных материалов, полученные с помощью пайки, востребованы в разных отраслях промышленности [2, 3].

В частности, соединения молибден–нержавеющая сталь используются при изготовлении деталей, длительно работающих при высокой температуре в соплах ракет и электровакуумных приборах, в атомной энергетике при изготовлении ядерных реакторов, при производстве круглых анодов рентгеновских трубок, теплообменников, для изготовления оборудования, работающего в агрессивных средах и ряда других изделий [4, 5]. Многие современные конструкции удалось сделать наиболее технологичными главным образом за счет использования новейших достижений в области пайки. Выбор и использование разнородных металлов в качестве конструкционных материалов определяется эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к конструкции, и экономическими показателями.

Естественно, соединение разнородных металлов представляет более сложную задачу, чем соединение однородных. Обусловлено это разностью химического состава и физико-механических

свойств соединяемых материалов. Так, при пайке разнородных металлов большой проблемой является обеспечение смачивания обоих материалов и преодоление разницы в коэффициентах термического расширения, что может приводить к образованию хрупких интерметаллидных прослоек на межфазной границе, возникновению внутренних напряжений, появлению трещин.

Каждая пара разнородных соединяемых материалов требует индивидуального подхода при выборе припоев и параметров технологического процесса пайки [6]. Используемые припои должны обеспечить хорошее смачивание обоих металлов, температура плавления припоя не должна превышать температуру солидуса более легкоплавкого основного металла. Конечной целью технологического процесса пайки является формирование работоспособных соединений с заданными эксплуатационными характеристиками.

При пайке тугоплавких, химически активных металлов (молибдена и др.) с коррозионно-стойкими сталями необходимо использовать припои со структурой твердого раствора или пластичные припои на основе системы медь–серебро, которые будут способствовать релаксации напряжений в паяном соединении, и служить демпфером между двумя соединяемыми металлами. Однако припои на основе серебра характеризуются низкой температурой плавления и низкой стойкостью в условиях нейтронного облучения.

Таблица 1. Используемые припои и режимы пайки

Номер припоя	Базовая система легирования припоя	Температура пайки, °C/время, мин
1	Cu–Mn–Ni–Fe–Si	1050/3
2	Cu–Mn–Ni–Si	1100/5
3	Cu–Mn–Ni	1084/3

В данной работе рассмотрены особенности формирования паяных соединений молибден–нержавеющая сталь при использовании припоев со структурой твердого раствора на базе системы медь–марганец, представлены результаты микрорентгеноспектральных исследований паяных соединений и их прочностные характеристики.

В качестве основного металла использовали молибден, нержавеющую сталь 09X18H10T и припой на базе системы медь–марганец. Припои использовали в литом виде, получали их путем выплавки в лабораторной установке в защитной среде аргона. Полученные слитки переворачивали и переплавляли (до 5 раз) с целью усреднения химического состава и обеспечения однородного распределения элементов. Температуры солидуса и ликвидуса литых припоев определяли с помощью установки высокотемпературного дифференциального анализа в защитной атмосфере гелия с постоянной скоростью нагрева и охлаждения (40 °C/мин).

Для проведения металлографических исследований паяли нахлесточные соединения, вырезали образцы перпендикулярно шву, по стандартной методике изготавливали микрошлифы и исследовали с помощью электронного растрового микроскопа TescanMira 3 LMU. Распределение химических элементов исследовали методом локального микрорентгеноспектрального анализа с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments X-max (80 мм²), под управлением программного пакета INCA. Локальность микрорентгеноспектральных измерений не превышала 1 мкм, съемку микроструктур проводили в обратно-отраженных электронах (BSE), позволяющих исследовать микрошлифы без химического травления.

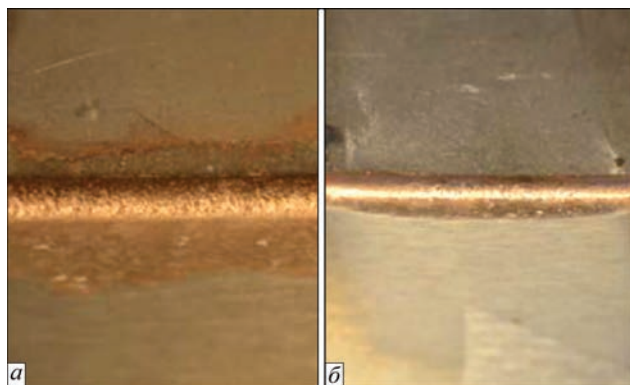


Рис. 1. Внешний вид паяных образцов молибден–сталь 09X18H10T: а — прямая; б — обратная галтель

Для проведения механических испытаний паяли плоские нахлесточные соединения размером 100×30×3 и испытывали с использованием установки MTS-810.

К особенностям молибдена принадлежит низкое сопротивление окислению при высоких температурах. Выше 500 °C начинается сублимация MoO₃, а при 600 °C она становится значительной и выше 800 °C MoO₃ плавится, что ведет к сверхактивному окислению в воздушной атмосфере [7]. Поэтому пайку молибдена проводили в вакууме. При сборке образцов под пайку припой укладывали у паяльного зазора. При нагреве припой плавился и за счет капиллярных сил затекал в зазор.

Визуальный осмотр внешнего вида паяных образцов показал, что при использовании припоев (табл. 1) формируется плавная полная прямая галтель (рис. 1, а). Обратная галтель отличается от прямой меньшим размером (рис. 1, б).

При пайке разнородных соединений нержавеющей стали–молибден припоем № 1 по режиму, приведенному на рис. 2, формируется широкий паяный шов на основе меди (рис. 3, а).

В центральной зоне паяного шва кристаллизуется твердый раствор на основе меди (92,58 %), содержащий, кроме составляющих элементов припоя, незначительное количество железа — 2,87 %.

В некоторых участках припой проникает в нержавеющую сталь на максимальную глубину до 20 мкм (рис. 3, а).

В периферийной зоне паяного шва, которая граничит с молибденом, наблюдаются два диффузионных слоя, выделяющиеся в виде узких сплошных полос вдоль паяного шва. Один из них на основе молибдена (51,21 %), обогащен железом (31,71 %), кремнием (до 5,88 %) и расположен

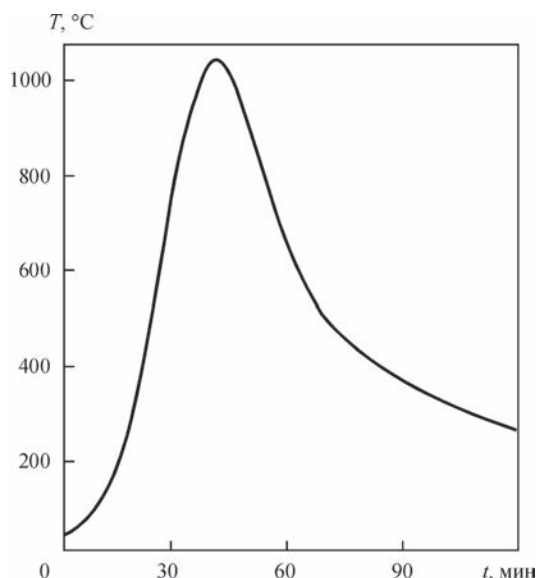


Рис. 2. Термограмма нагрева при пайке молибдена с нержавеющей сталью припоем № 1

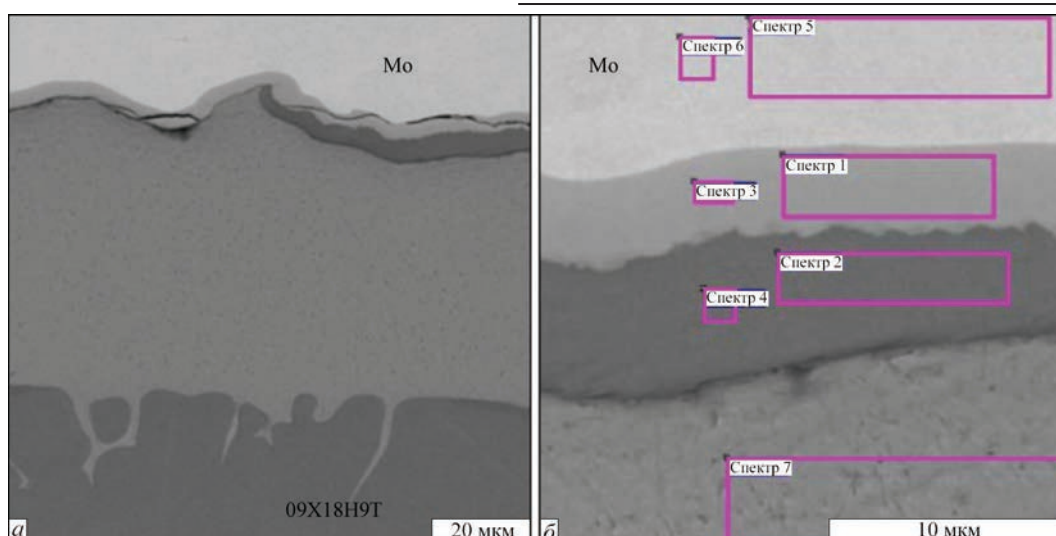


Рис. 3. Микроструктура (а) и исследуемые участки паяного соединения (б), полученного при использовании припоя № 1

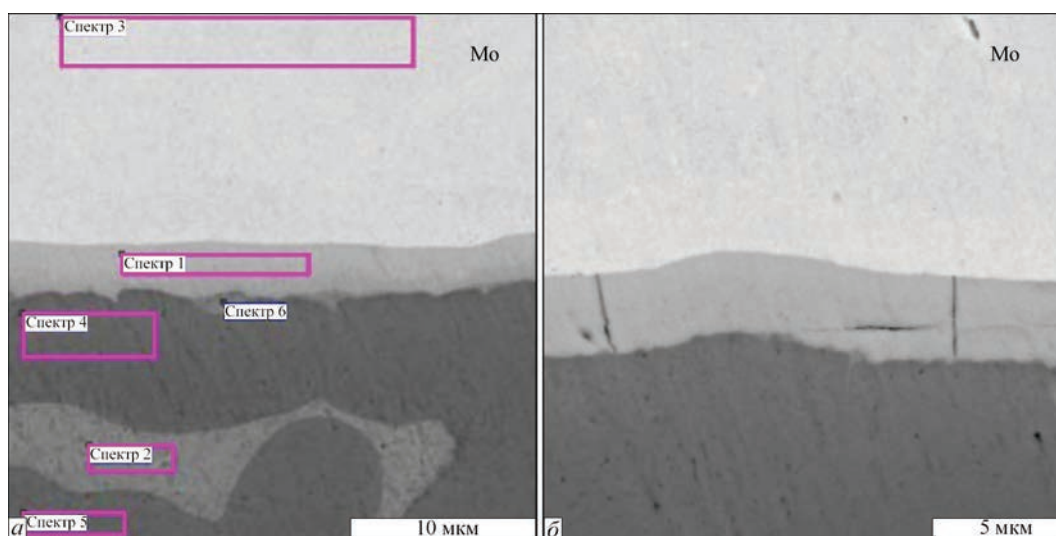


Рис. 4. Исследуемые участки шва паяного соединения, полученного при использовании припоя № 2

ближе к молибдену (рис. 3, б). Второй — на основе железа (68,02 %) и не содержит молибдена, но тоже обогащен кремнием, граничит с твердым раствором на основе меди. Ширина их переменная, но для каждого не превышает 5 мкм. Общим для этих слоев является присутствие повышенной концентрации кремния от 4,83 до 5,88 % (табл. 2).

Очевидно, что во время пайки кремний взаимодействует с железом и молибденом, но при охлаждении паяных соединений в неравновесных условиях (при снижении температуры и ограниченной растворимости кремния) образуются фазы, обогащенные последним.

Наличие градиента концентраций химических элементов в этих участках способствует образованию продольных трещин (рис. 3, а) вдоль шва со стороны молибдена по диффузионному слою на основе молибдена (51,21...52,59 %), обогащенном железом (31,71...32,07 %) (табл. 2, спектр 1, 3). Такое формирова-

ние паяных соединений обусловлено взаимными диффузионными процессами, протекающими на межфазной границе припой – нержавеющая сталь.

При пайке припоем со сниженной (0,2 %) концентрацией кремния (№ 2) формирование галтельных участков внешне не отличается от предыдущего образца. Припой хорошо смачивает основные металлы, тоже проникает в основной металл (нержавеющую сталь) по границам зерен. Исследование структуры паяных швов при больших увеличениях показало, что между не-

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа отдельных фаз паяного соединения при использовании припоя № 1

Номер спектра	Химические элементы, мас. %							
	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	-	5,88	7,08	0,77	31,71	2,54	0,81	51,21
2	-	4,83	16,79	2,23	68,02	4,46	3,67	-
3	-	5,65	6,56	0,86	32,07	2,27	0,00	52,59
4	-	4,92	16,50	2,48	66,79	4,63	4,68	-
5	1,74	-	-	-	-	-	-	98,26
6	1,85	-	-	-	-	-	-	98,15
7	-	-	0,30	3,04	2,87	1,21	92,58	-

Таблица 3. Химический состав исследуемых участков при использовании припоя № 2

Номер спектра	Химические элементы, мас. %							
	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0,92	0,00	8,41	0,69	23,55	2,52	0,49	63,41
2	0,09	0,00	0,98	4,93	4,65	2,22	87,13	0,00
3	0,08	0,11	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	99,65
4	0,69	0,qq	13,66	2,92	61,36	9,84	5,66	5,87
5	0,61	0,00	15,52	2,55	64,90	8,75	6,12	1,55
6	1,11	0,00	11,55	1,97	36,83	3,43	4,27	40,84

ржавеющей сталью и молибденом наблюдается диффузионный слой в виде сплошной полосы шириной 2,5 мкм на основе молибдена, который содержит до 23,55 % железа, но концентрация кремния в нем меньшая и не превышает 0,92 % (рис. 4, табл. 3).

В соответствии с бинарными диаграммами металлических систем в системе молибден–железо имеются значительные области растворимости при высоких температурах, но при снижении температуры эти области быстро уменьшаются и при комнатной температуре взаимная растворимость практически отсутствует. Между рассматриваемыми элементами имеется ряд интерметаллидных фаз, которые могут играть негативную роль, приводя к хрупкости паяного соединения [8].

Полученные результаты исследований показывают, что в некоторых участках по диффузионному слою наблюдаются микротрещины (рис. 4, б), расположены они перпендикулярно паяемым пластинам, но в паяном шве они отсутствуют.

С целью исключения образования трещин в паяных соединениях для пайки использовали припой № 3, который не содержит кремния. Тройные сплавы системы Cu–Mn–Ni характеризуются неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии (рис. 5).

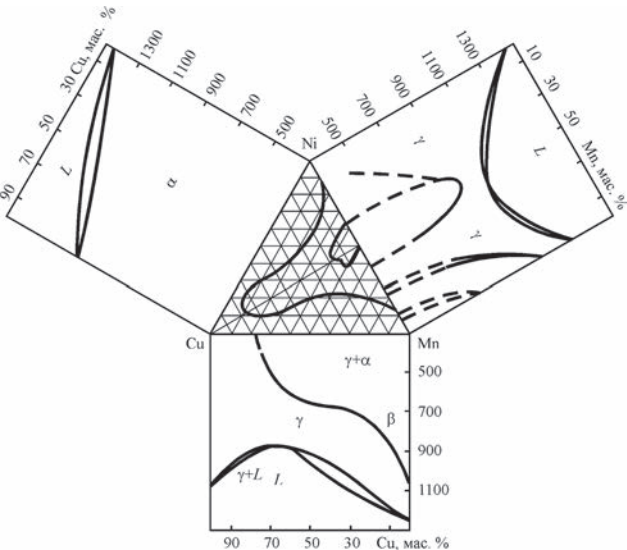


Рис. 5. Тройная диаграмма состояния Cu–Mn–Ni с прилегающими бинарными системами [9]

В системе Mn–Ni при снижении температуры происходит упорядочение твердого раствора с образованием фазы Mn–Ni [8].

Применение припоев со структурой твердого раствора при пайке разнородных соединений с протяженными паяными швами позволяет уменьшить влияние разницы коэффициентов термического расширения. Припой выступает в качестве мягкой прослойки, которая обеспечивает релаксацию возникающих при нагреве и охлаждении внутренних напряжений.

Результаты высокотемпературного дифференциального термического анализа хорошо согласуются с диаграммами состояния металлических систем. На термической кривой нагрева зафиксирован один тепловой эффект, который показывает интервал плавления и соответствует температуре солидуса и ликвидуса данного сплава (рис. 6).

Режим пайки данным припоем соответствовал температуре 1084 °C, но при исследовании паяных швов трещины не обнаружены, наблюдаются плотные паяные швы (рис. 7, а).

Использование незначительного давления во время пайки не оказывает влияния на образование и химический состав диффузионных слоев, при этом обеспечивает формирование плотных паяных швов без трещин (рис. 7, б).

После проведения металлографических и микро-рентгеноспектральных исследований отработаны параметры технологического процесса пайки и изготовлены плоские образцы нахлесточных соединений (по три образца на каждый припой) для проведения механических испытаний на растяжение при комнатной температуре (рис. 8, а, б).

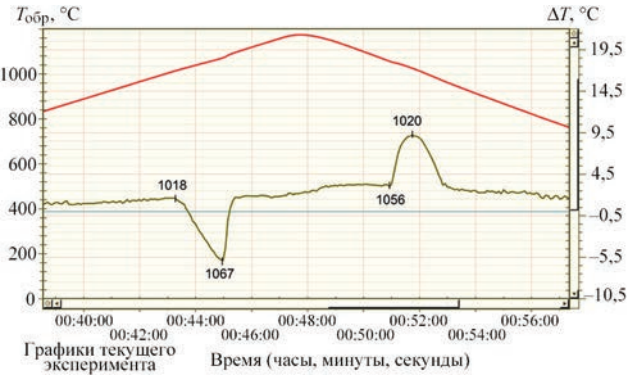


Рис. 6. Температурные интервалы плавления сплава системы Cu–Mn–Ni

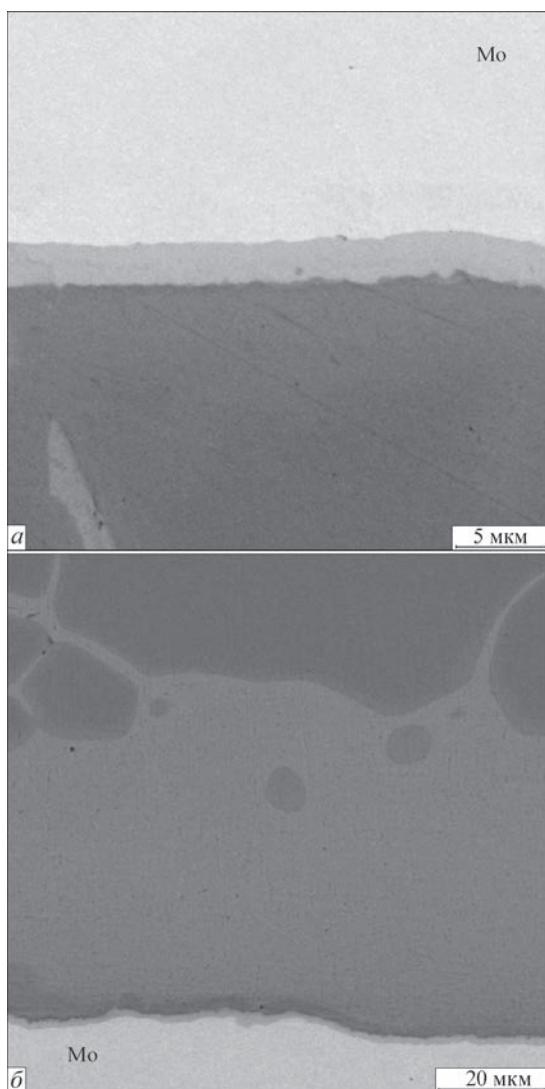


Рис. 7. Микроструктура паяного соединения, полученного при пайке без (а) и с давлением (б) при использовании припоя № 3

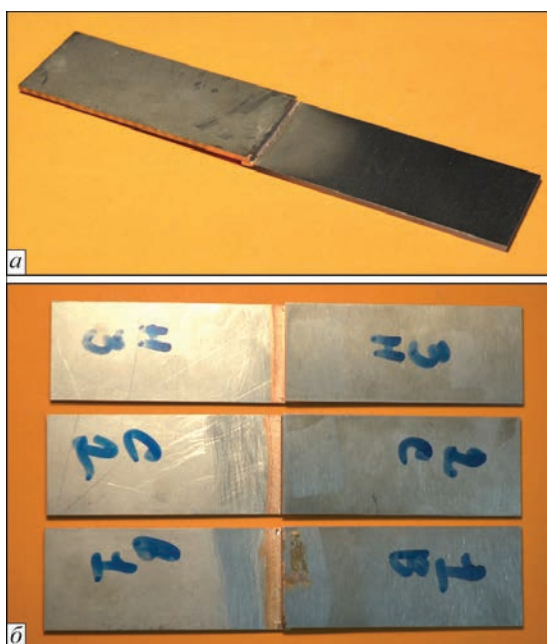


Рис. 8. Внешний вид образцов для механических испытаний

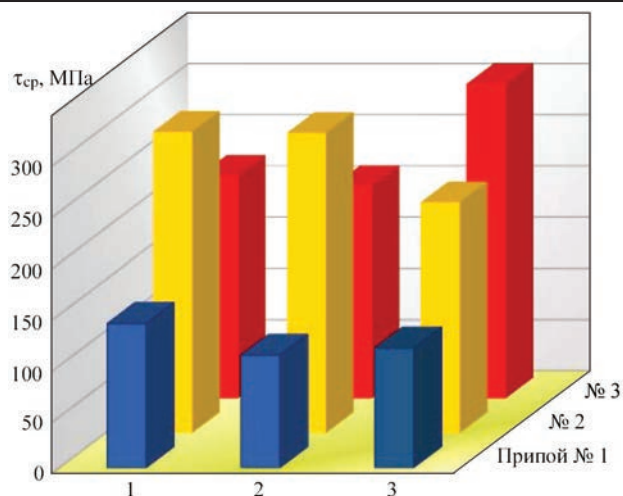


Рис. 9. Прочность на срез паяных соединений молибден–нержавеющая сталь

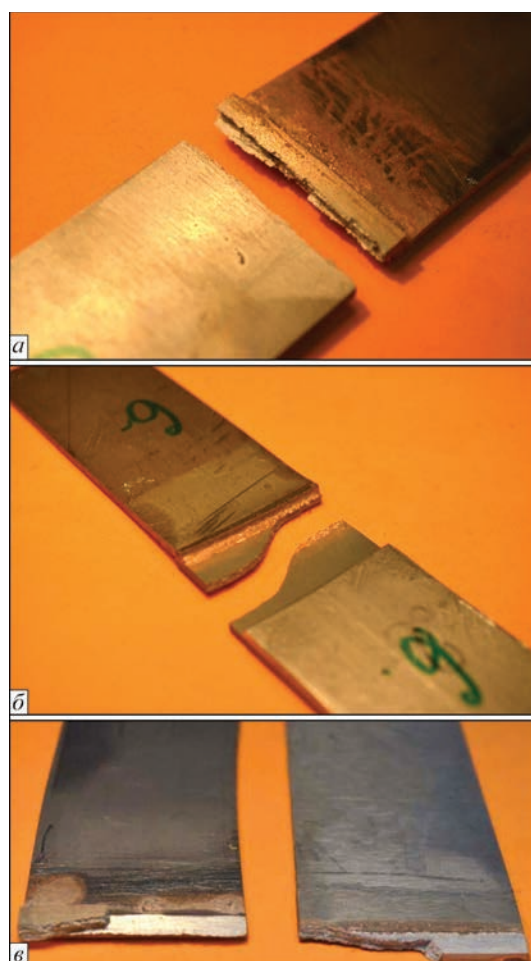


Рис. 10. Паяные образцы после механических испытаний (описание а–в см. в тексте)

Проведенные испытания показали, что использование припоя на базе системы Cu–Mn–Ni, содержащего кремний (1 %), не позволяет получить прочность на срез выше 110 МПа (рис. 9).

Снижение концентрации кремния в припое № 2 обеспечило повышение прочности на срез. Применение припоя на базе системы Cu–Mn–Ni (№ 3), со структурой твердого раствора, не содер-

жащего кремний, позволило повысить прочность паяных соединений до 300 МПа (рис. 9).

Следует отметить, что при испытаниях паяных образцов, полученных с использованием припоя № 3, разрушение образцов происходило по паяному шву (рис. 10, а) и по основному металлу — молибдену (рис. 10, б).

При разрушении по шву прочность на срез находилась на уровне 200...210 (среднее значение 205) МПа. При разрушении по молибдену максимальная прочность на срез составляла 300 МПа. В некоторых случаях наблюдался смешанный характер разрушения — частично по шву и частично по основному металлу (рис. 10, в).

Выводы

Микрорентгеноспектральными исследованиями установлено, что при получении разнородных соединений молибден–нержавеющая сталь с использованием припоев на базе системы Cu–Mn–Ni–(Fe–Si) центральная зона паяного шва состоит из твердого раствора на основе меди. Периферийная зона шва (со стороны молибдена) образована диффузионными фазами на основе железа и молибдена, которые выделяются в виде непрерывных полос вдоль паяного шва. При концентрации кремния в припое 1 % данные зоны обогащаются последним, их состав и свойства существенно отличаются от химического состава и свойств паяного шва. Таким образом, наличие концентрационного градиента на межфазной границе приводит к образованию продольных трещин и низким механическим свойствам паяных соединений.

Проведенные механические испытания паяных соединений показали, что использование припоя на базе системы Cu–Mn–Ni со структурой твердого раствора, не содержащего кремний, обеспечивает формирование плотных паяных швов без трещин. Прочность на срез находится на уровне 200...210 МПа при разрушении по паяному шву, и 300 МПа — при разрушении по основному металлу (молибдену).

1. Электронный ресурс: Режим доступа: <http://stroirem.net/board/i-121776/svarka-svarivanie-raznorodnykh-tsvetnykh-metallov/> (дата звернення 21.10.2016).
2. НЕФТЬ-ГАЗ Электронный ресурс: Режим доступа: <http://www.tehn.oglib.ru/bgl/4010/577.html> (дата звернення 21.10.2016).

3. Метотехника Электронный ресурс: Режим доступа: http://www.metotech.ru/art_molibden_1.htm (дата звернення 21.10.2016).
4. ТК РЗМ-Металлургия Электронный ресурс: Режим доступа: <http://uralferrum.ru/molibden> (дата звернення 21.10.2016).
5. Palmer A. J. Brazing refractory metals used in high-temperature nuclear instrumentation / A. J. Palmer, C. J. Woolstenhulme // First international conference advancements in nuclear instrumentation measurement methods and their applications (ANIMMA), 7–10 June 2009, Marseille, France. — Publisher: IEEE, 2009. — CD-ROM ISBN: 978-1-4244-5208-8.
6. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. // Технология сварки, пайки и резки. — Т. 3-4 / В. К. Лебедев и др.; под ред. Б. Е. Патона. — М: Машиностроение, 2006. — 768 с.
7. Титц Т. Тугоплавкие металлы и сплавы / Т. Титц, Дж. Уилсон; пер. с англ. — М.: Metallurgia, 1968. — 352 с.
8. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей [и др.]. — М: Наука, 1979. — 248 с.
9. Чжан-Бао-Чан. Изучение тройных медных сплавов Cu–Ni–Mn / Чжан-Бао-Чан // Известия вузов. Цветная металлургия. — 1958. — № 5. — С. 107–115.

С. В. Максимова, В. В. Воронов, П. В. Ковальчук,
А. В. Ларіонов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ОТРИМАННЯ РІЗНОРІДНИХ З'ЄДНАНЬ МОЛІБДЕН – НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ВАКУУМНОЇ ПАЙКИ

У даній роботі показана можливість використання припоїв зі структурою твердого розчину на базі системи Cu–Mn–Ni для пайки різнорідних з'єднань молибден–нержавіюча сталь, представлені результати микрорентгеноспектральних досліджень, характеристики міцності паяних з'єднань. Микрорентгеноспектральними дослідженнями встановлено, що при отриманні різнорідних з'єднань молибден–нержавіюча сталь з використанням припоїв на базі системи Cu–Mn–Ni центральна зона паяного шва складається з твердого розчину на основі міді. Дифузійна зона шва (зі сторони молибдену) утворена фазою на основі молибдену, яка виділяється у вигляді безперервної смуги уздовж паяного шва. Застосування припою на базі системи Cu–Mn–Ni зі структурою твердого розчину забезпечує формування щільних паяних швів без тріщин. Міцність на зріз знаходиться на рівні 200...210 МПа при руйнуванні по паяному шву і 300 МПа — при руйнуванні по основному металу (молибдену). Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 10.

Ключові слова: різнорідні з'єднання, вакуумна пайка, припій, структура, твердий розчин, шов, механічні властивості

Поступила в редакції. 24.10.2016

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРУ И СКЛОННОСТЬ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 15Х1М1ФЛ, ВЫПОЛНЕННЫХ БЕЗ ПОДОГРЕВА

Н. Г. ЕФИМЕНКО¹, С. В. АРТЕМОВА², С. Н. БАРТАШ¹

¹НТУ «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21. E-mail: svarka126@ukr.net

²ПАО «Турбоатом». 61037, г. Харьков, Московский просп., 199

Исследовалась структура и свойства металла высокотемпературной области ЗТВ и шва при сварке стали 15Х1М1ФЛ на повышенных режимах способом поперечной горки без подогрева. При сравнении полученных результатов с данными исследования процесса сварки на умеренных режимах (160...170 А) установлено, что повышение тока до 200...210 А приводит к возрастанию склонности к хрупкому разрушению высокотемпературной области ЗТВ и металла шва, причиной которого является высокая твердость, обусловленная присутствием в структуре бейнита мартенситной составляющей. Библиогр. 3, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: сталь, сварка, подогрев, бейнит, мартенсит, хрупкость, свойства, структура

Формирование структуры и свойств в различных зонах сварных соединений определяется толщиной свариваемого металла и его химическим составом, а также параметрами технологического процесса — воздействием термического цикла сварки на металл [1].

В ранее выполненных исследованиях [2] показано, что способ сварки поперечной горкой стали 15Х1М1ФЛ на умеренных режимах без подогрева и термической обработки обеспечивает высокие показатели механических свойств сварных соединений. Вместе с тем целесообразным с практической точки зрения является исследование влияния повышенных режимов на структуру и механические свойства, чему и была посвящена настоящая работа.

Экспериментальные исследования проводились на плитах размером 250×200×110 мм, отлитых в заводских условиях и подвергнутых после литья термической обработке, состоящей из гомогенизации: 1010...1030 °С; нормализации:

970...1000 °С и высокого отпуска при температуре 720...740 °С.

Для выполнения швов в средней части плит вдоль длины 250 мм механическим способом проводились выборки металла, которые заваривались способом поперечной горки электродами ТМЛ-3У диаметром 4 мм без предварительного и сопутствующего подогрева при токе 200...210 А. Последующая термообработка не проводилась.

Образцы для механических испытаний и структурных исследований изготавливались из темплетов, вырезанных в поперечном направлении в верхней, средней и донной частях сварного шва (рис. 1). Изучалась макро- и микроструктура, величина зерна, которая определялась по ГОСТ 5639–82 и по методу случайных секущих [2]. Измерялась твердость (HV_5), определялись характеристики прочности, пластичности, ударной вязкости KCV при температурах –20; 0; 20 и 100 °С. Полученные результаты испытаний сравнивались

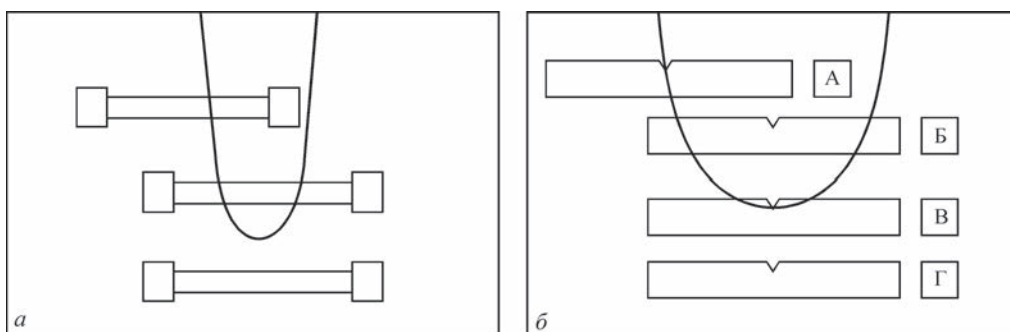


Рис. 1. Схема вырезки образцов из сварного соединения стали 15Х1М1ФЛ: а — образцы для испытания на растяжение; б — образцы для испытания на ударный изгиб (А–Г — иллюстрация мест надреза)

Показатели твердости HV5 металла высокотемпературной области ЗТВ сварного соединения стали 15X1M1ФЛ в сечениях на различных уровнях от поверхности шва

Номер варианта	Сварочный ток I , А	Расстояние от поверхности шва, мм		
		10	25	40
		Твердость HV5		
1	160...170	277...278	276...278	281...287
2	200...210	360...368	388...405	365...366
3	В соответствии с типовой технологией	—	355...358	—

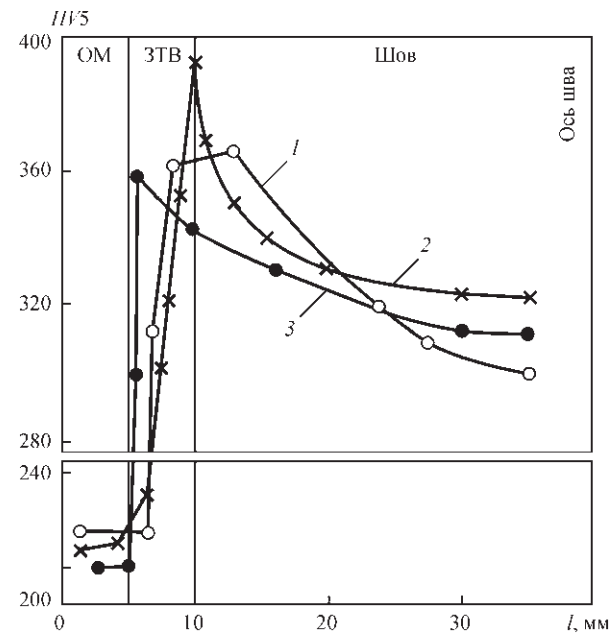


Рис. 2. Изменение твердости металла сварного соединения на стали 15X1M1ФЛ, выполненного без подогрева, на уровнях от поверхности шва: 1 — 10; 2 — 25; 3 — 40 мм. Ток сварки 200...210 А

с данными ранее выполненными нами исследований после сварки на токах 160...170 А [2].

При макроанализе установлено, что высота шва составляет 65 мм, ширина — 55 мм, а зона термического влияния имеет ширину 3...4 мм. Макродефектов в шве не обнаружено. График изменения твердости приведен на рис. 2.

Для сравнения в таблице приведены данные о твердости в высокотемпературной области ЗТВ и металле шва в сравнении с основным металлом после сварки поперечной горкой на различных значениях тока, а также после сварки по типовой технологии.

Следует отметить, что при сварке на повышенных режимах (табл., вар. 2) на всех уровнях поперечного сечения сварного соединения твердость в околошовной зоне и металле шва значительно превышает твердость в этих зонах в соединениях, заваренных на умеренных режимах (табл., вар. 1). Вместе с тем уровни твердости в сварных соединениях, выполненных СПГ и по типовой технологии, близки (см. таблицу).

На основании результатов испытаний образцов на растяжение установлено, что повышение режимов сварки приводит к снижению прочно-

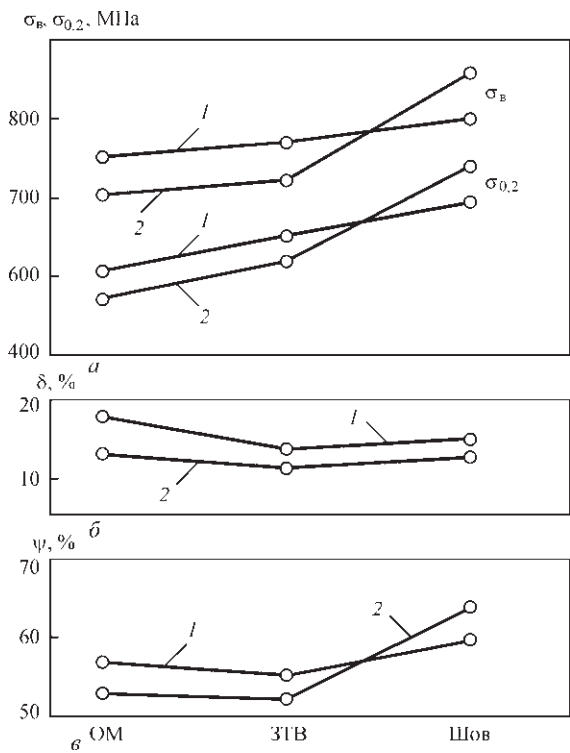


Рис. 3. Механические свойства различных зон сварного соединения стали 15X1M1ФЛ: 1 — 160...170 А; 2 — 200...210 А

сти и пластичности металла ЗТВ по отношению к металлу шва (рис. 3, а). При этом прочность металла ЗТВ несколько выше, а пластичность ниже основного металла. Наиболее высокими показателями прочности и пластичности характеризуется металл шва (рис. 3, б, в). Если сравнивать варианты сварки, то для второго варианта прочностные и пластические характеристики шва выше, однако ниже степень равнопрочности сварного соединения. Прочность и пластичность металла ЗТВ несколько ниже для второго варианта, что может быть отнесено на счет повышения неоднородности твердости и структуры.

При металлографических исследованиях установлено, что структура высокотемпературной области ЗТВ, то есть перегретого металла и частично расплавленных зерен, неоднородная. Микроструктура состоит из бейнита различной морфологии, наряду с верхним бейнитом присутствуют участки нижнего бейнита с достаточно выраженной ориентацией карбидной фазы (рис. 4, б). Эти участки расположены в переходной области зоны сплавления основной металл–шов. Участки высокотемпературной

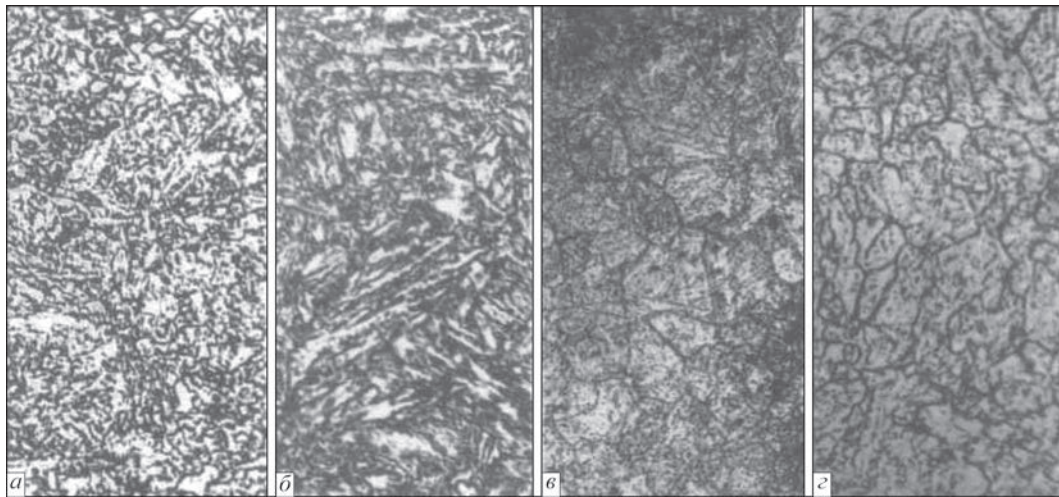


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения стали 15X1M1Φ, выполненного СПГ на повышенных режимах ($I_{\text{св}} = 200 \dots 210$ А): а — металл шва ($\times 500$); б — граница сплавления ($\times 500$); в — зерно в металле ЗТВ на участке перегрева ($\times 100$); г — зерно в металле ЗТВ вдали от участка перегрева ($\times 500$)

неоднородности имеют незначительные размеры и они дискретно расположены вдоль условной линии перехода.

Зерно в участках зернистого бейнита в металле ЗТВ и металле шва мелкое (зерно аустенита $\bar{D}_{\text{усл}} = 0,0138 \dots 0,0083$ мм, соответствует 9-10 баллу шкалы ГОСТ 5639–82). При этом следует отметить, что при сварке на умеренных режимах (табл., вар. 1) величина зерна в таких участках соответствует 7-8 баллу ($\bar{D}_{\text{усл}} = 0,0192$ мм).

Зерно аустенита (рис. 4, в) в участках с игольчатым бейнитом крупнее ($\bar{D}_{\text{усл}} = 0,053$ мм), однако находится в пределах допустимых норм и соответствует 9-10 баллу шкалы ГОСТ 5639.

На рис. 5 представлен график изменения ударной вязкости при испытании образцов с острым надрезом (типа Шарпи), на котором сравниваются результаты, полученные при сварке на повышенных режимах, с данными ранее проведенных исследований (см. табл., вар. 1, умеренный режим). Как видно из графика, KCV металла ЗТВ сварных соединений, выполненных на повышенных режимах, при испытании в интервале температур $-20^\circ \dots 20^\circ \text{C}$ на $30 \dots 50$ Дж/см² ниже (рис. 5, кривые 1, 2).

Тенденция снижения KCV наблюдается и при испытании металла сварного шва (рис. 5, кривые 3, 4). Повышение температуры испытания нивелирует разницу в показателях. Существенной разницы в показателях KCV в верхней, средней и донной частях сварного соединения не выявлено, в том числе и для образцов с поперечной ориентацией зоны сплавления. Тем самым показана достаточная степень однородности металла из различных мест с различной ориентацией зоны сплавления.

Из полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующее заключение. Известно [3], что в ЗТВ при сварке

сталей, содержащих энергичные карбидообразователи (Cr, Mo, V и др), при высоких скоростях нагрева и последующего охлаждения, что характерно для сварочных процессов, гомогенизация аустенита перед началом его превращения не завершена. Не обеспечивается процесс полного растворения карбидов. Указанные факторы понижают устойчивость аустенита. В таких условиях процесс превращения сдвигается в бейнитную область. Важным фактором, влияющим на кинетику процесса гомогенизации, является исходное структурное состояние металла.

Для литой стали 15X1M1Φ, используемой в данном эксперименте, характерна грубая разноразмерная структура (см. рис. 4, в) со значительной дендритной и химической неоднородностью.

Сварка этой стали СПГ без подогрева на умеренных режимах, как нами установлено ранее [2], обеспечивает формирование структуры верхнего

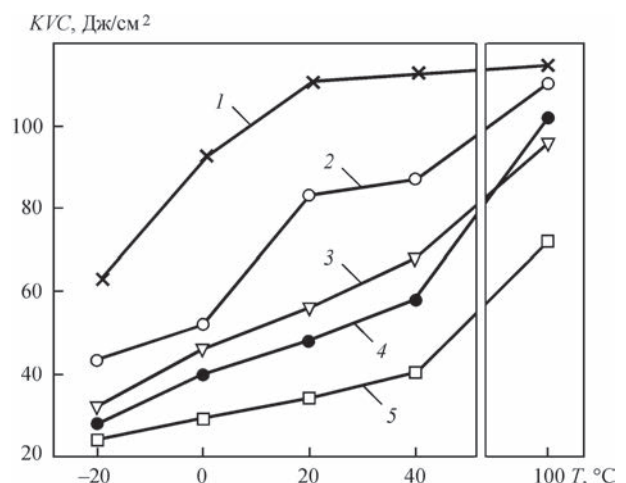


Рис. 5. Ударная вязкость KCV зон сварного соединения стали 15X1M1Φ, выполненного СПГ без подогрева токами: 1 — 160...180 А, ЗТВ (А, В); 2 — 200...210 А, ЗТВ (А, В); 3 — 160...180 А, шов (Б); 4 — 200...210 А, шов (Б); 5 — основной металл (Г) (см. рис. 1)

бейнита, характеризующейся достаточно высокими вязкопластическими свойствами. Повышение режимов сварки (повышение скорости нагрева), цикличность нагрева (при многослойном наложении швов) ставит участки металла ЗТВ в различные временные температурные условия, что приводит к образованию аустенита с различной степенью гомогенности. В результате при охлаждении образуется неоднородная структура. Наряду с зернистым бейнитом формируются участки игольчатого бейнита (рис. 4, б). По-видимому, в выросшем зерне аустенита с более высокой завершенностью гомогенизации процесс превращения сдвинут в интервал более низких температур, а образовавшаяся игольчатая структура является продуктом распада аустенита в области температур «нижний бейнит–мартенсит». При этом отмечается повышение твердости в этой зоне (см. рис. 2).

Таким образом, повышенные режимы при СПГ без подогрева толстостенных литых конструкций из стали 15Х1М1ФЛ отрицательно влияют на сопротивление хрупкому разрушению металла высокотемпературной области ЗТВ. Основной причиной, вероятнее всего, является образование бейнита неоднородной морфологии, где наряду с верхним бейнитом зернистой формы присутствует структура игольчатого строения, идентифицируемая как нижний бейнит. При этом металл указанной зоны имеет повышенную твердость, характерную для бейнито-мартенситных структур.

Выросшее зерно в ЗТВ не является прямой причиной охрупчивания этой области, а оказывает опосредованное влияние. Известно [3], что рост зерна в сталях с энергичными карбидообразователями является признаком повышенной степени гомогенизации аустенита, следовательно, приводит к повышению его устойчивости и, соответственно, сдвигу температуры превращения в мартенситную область.

Выводы

1. При сварке литой стали 15Х1М1ФЛ способом поперечной горки без подогрева на повышенных

режимах в высокотемпературной области ЗТВ образуется бейнит различной морфологии — зернистый и игольчатый. Причиной образования такой структуры является исходный разнотемпературный аустенит с различной степенью гомогенизации и устойчивости к превращению.

2. Сварка на повышенных режимах приводит к росту значений твердости в металле ЗТВ, снижению ударной вязкости в интервале температур $-20...20\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является признаком повышения склонности к хрупким разрушениям.

1. Назарчук А. Т., Снисарь В. В., Демченко Э. Л. Получение равнопрочных сварных соединений закаливающих сталей без подогрева и термической обработки // Автоматическая сварка. — 2003. — № 5. — С. 41–46.
2. Структура и свойства сварных соединений стали 15Х1М1ФЛ при исправлении дефектов литья способом поперечной горки / Н. Г. Ефименко и др. // Там же. — 2014. — № 3. — С. 44–48.
3. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. Атлас. — К: Наука, 1972. — 220 с.

М. Г. Єфіменко¹, С. В. Артемова², С. М. Барташ¹

¹НТУ «Харківський політехнічний інститут».
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21. E-mail: svarka126@ukr.net

²ПАТ «Турбоатом».
61037, м. Харків, Московський просп., 199

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, СТРУКТУРУ І СХИЛЬНІСТЬ ДО КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ СТАЛІ 15Х1М1ФЛ, ВИКОНАНИХ БЕЗ ПІДГРІВУ

Досліджувалась структура і властивості металу високотемпературної області ЗТВ і шва при зварюванні сталі 15Х1М1ФЛ на підвищених режимах способом поперечної гірки без підігріву. При порівнянні отриманих результатів з даними дослідження процесу зварювання на помірних режимах (160...170 А) встановлено, що підвищення струму до 200...210 А призводить до зростання схильності до крихкого руйнування високотемпературної області ЗТВ і металу шва, причиною якого є висока твердість, обумовлена присутністю в структурі бейніта мартенситної складової. Бібліогр. 3, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: сталь, зварювання, підігрів, бейніт, мартенсит, крихкість, властивості, структура

Поступила в редакцию 04.08.2016

Международная конференция «Роботизация и автоматизация сварочных процессов»

12–13 июня 2017 г.

г. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Организаторы:

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Международная Ассоциация «Сварка»

E-mail: journal@paton.kiev.ua
E-mail: patonpublishinghouse@gmail.com
http://pwi-scientists.com/rus/robotweld_2017

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

В. В. СОМОНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, РФ. E-mail: ballak@inbox.ru

Рассмотрены проблемы управления сварочной ванной при сварке ферритных нержавеющей сталей. Проведен сравнительный анализ работ в области влияния ультразвуковых и вибрационных колебаний на сварной шов. Отражены результаты предварительных экспериментальных и металлографических исследований образцов соединений, выполненных лазерной сваркой при дополнительном ультразвуковом воздействии на сварочную ванну. Исследовано влияние позиционирования прижимов и источника ультразвуковых волн относительно границы стыка на характер колебаний, возникающих в нем. Определены наиболее благоприятные частоты и амплитуды колебаний для генерации колебаний в области стыка. Получены результаты влияния толщины материала на возникающие в нем колебания, которые могут оказать воздействие на стабильность и скорость охлаждения сварочной ванны и, как следствие, на микроструктуру металла сварного шва. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: лазерная сварка, ультразвуковые волны, ферритные нержавеющей стали, сварочная ванна, микроструктура

Все чаще для сварки ферритных нержавеющей сталей используются современные лазеры, например, волоконные или дисковые. Это сводит к минимуму термические деформации конструкции при высоких скоростях сварки и последующую обработку сварных швов, сокращая этапы производства. Однако при сварке этих сталей существуют проблемы повышения склонности сварных швов к межкристаллитной коррозии (МКК) и снижения механических свойств (прочности и твердости) по сравнению с основным металлом. Традиционно с проблемой МКК борются следующими методами: стабилизацией (легирование Ti и Nb), снижением содержания углерода в стали меньше, чем 0,03 % или термической обработкой. Технологии стабилизации и снижения содержания углерода в стали являются материально затратными, а термическая обработка является энергоемким и неэкологичным технологическим процессом, требующим больших производственных площадей. В связи с этим исследователи пытались создать более простые способы решения проблемы. Одним из способов может быть использование вибрационных или ультразвуковых колебаний сварочной ванны в процессе сварки, но до конца не ясно, каковы возможности применения этого дополнительного источника для управления свойствами сварного шва.

Целью настоящих исследований было изучение влияния позиционирования источника ультразвуковых механических колебаний и при-

жимных устройств на образование колебаний в области сварного стыка для управления формированием микроструктуры металла сварного шва при лазерной сварке ферритных нержавеющей сталей, улучшая при этом его механические, металлургические характеристики и снижая склонность к МКК.

Анализ результатов исследований по материалам опубликованных работ. Исследованием влияния механических колебаний в сварочной ванне на снижение склонности к МКК занимались ученые в г. Уфа [1–3]. Они пришли к выводам, что вибрационная и ультразвуковая ударная обработки в процессе сварки позволяет увеличить стойкость металла шва сварного соединения из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T к МКК. Ультразвуковая ударная обработка при частоте в интервале 25...27 кГц повышает сопротивление усталостному разрушению на 24...26 % больше, чем вибрационная. Последняя позволяет уменьшить величину зерна, что способствует образованию более однородной структуры в металле шва. В работах [4, 5] показано, что ультразвуковые механические колебания при лазерной сварке высокоуглеродистых сталей приводят к перемещению различных слоев металла в сварочной ванне. Расплавленный металл перемещается на край ванны расплава, что свидетельствует об эластичности ванны. Установлено влияние колебаний на форму сварного шва и распределение элементов в нем. Силы, действующие на расплавленный металл во

время ультразвуковых колебаний, улучшают контакт между ванной расплава и твердой подложкой, что зависит от скорости сварки и акустической мощности.

В ходе этого воздействия расплавленный металл располагается симметрично вокруг вертикальной оси симметрии шва. Он из центра сварочной ванны вытесняется на края, приводя к глубокому проплавлению и образуя полусферические области с небольшим уклоном в области центральной полусферы в ванне расплава. Применение ультразвука способствует повышению механических свойств металла шва при его кристаллизации благодаря измельчению структуры и лучшему удалению газов.

Обычно используется диапазон частот 18...80 кГц. Такие колебания позволяют сваривать металлы с окисленной поверхностью, покрытые слоем лака и т. п., уменьшая или снимая остаточные напряжения, возникающие при этом. Ультразвуком можно стабилизировать структурные составляющие металла шва, устраняя возможность самопроизвольного деформирования сварных конструкций со временем [6, 7]. В ИТПМ СО РАН были выполнены исследования влияния ультразвука на повышение пластических свойств соединений. В результате экспериментов предел текучести и временное сопротивление разрушению заметно не изменились, но более, чем на 20 % возросла пластичность [8]. Из литературных источников известно, что в зависимости от конструкции волновода и крепления инструмента в зоне сварки можно получить продольные, поперечные и крутильные колебания. Их амплитуда обычно бывает в пределах 10...30 мкм [9, 10]. Из сказанного выше видно, что ультразвуковые механические колебания оказывают сильное влияние на свойства получаемого сварного шва, но, к сожалению, до конца не изучено влияние позиционирования источника и прижимных устройств относительно друг друга и стыка на величину, качество и глубину создаваемого эффекта в сварочной ванне. Из-за этого нет полного понимания происходящих при этом процессов.

Экспериментальные исследования и анализ результатов. В качестве экспериментальных образцов использовались пластины размером 100×100×2 мм из ферритной нержавеющей стали марки 1.4016 (X6Cr17) химического состава (мас. %): 0,08 C; 1,0 Si; 1,0 Mn; 0,04 P; 0,015 S; 16...18 Cr. Согласно BS EN 10088-1:2005 [11] химические характеристики этой марки стали: $\delta = 20\%$; $\sigma_{0,2} = 260$ МПа; $\sigma_b = 400...630$ МПа; $HV_{126} = 126...197$.

Для проверки эффекта влияния колебаний, вызываемых ультразвуком, на свойства металла полученного шва, были выполнены предвари-

тельные эксперименты по лазерной сварке. Использовался разработанный экспериментальный стенд на базе технологического комплекса для лазерной сварки фирмы Reis. В качестве источника излучения применялся иттербиевый волоконный лазер модели ЛС-10 производства фирмы IPG Laser GmbH (Германия) с максимальной выходной мощностью излучения 10 кВт, а для доставки его к поверхности свариваемых образцов — лазерная головка модели MWO 54 фирмы Laseroptik REIS Lasertec, снабженная воздушным кроссджемтом для защиты оптики от паров и брызг металла, с фокусирующей линзой, имеющей фокусное расстояние 300 мм и диаметр луча в фокусе $df\ 0,4$ мм. Перемещение образцов относительно лазерного луча осуществлялось при помощи четырехосевого манипулятора фирмы Reis. Для создания колебаний использовались два пьезошейкера модели PS-X03-6/500 фирмы Isi-sys GmbH (Германия) с частотой колебаний F в пределах 0...30 кГц и амплитудой колебаний, регулирующейся в интервале 0...5 В, закрепляемые на поверхности образцов. Сами образцы и два пьезошейкера фиксировались на оси манипулятора при помощи специально изготовленной технологической оснастки. Сварка осуществлялась по прямой с отступом по 15 мм в обе стороны от пьезошейкеров. Сначала были получены швы без колебаний, а затем с добавленными колебаниями. Расположение пьезошейкеров на образцах в ходе экспериментов поясняет рис. 1.

В результате получено несколько сварных стыков соединений без и с воздействием колебаний в области стыка. При этом мощность лазерного излучения P (кВт), скорость сварки v (м/мин), положение фокуса относительно поверхности свариваемых образцов zf (мм) выбирались для обеспечения сквозного провара. Из полученных швов вырезались образцы и изготавливались металлографические шлифы для изучения микроструктуры с помощью микроскопов Leica Z16 APO A и Leitz Ergolux ($\times 1000$). Также проведены механические испытания на растяжение на стенде модели Z100 фирмы Zwick/Roell с нагрузкой до 10 кН и изме-

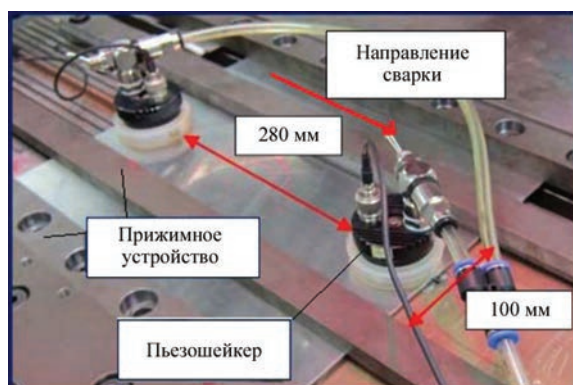


Рис. 1. Вид образцов с зафиксированными пьезошейкерами перед лазерной сваркой

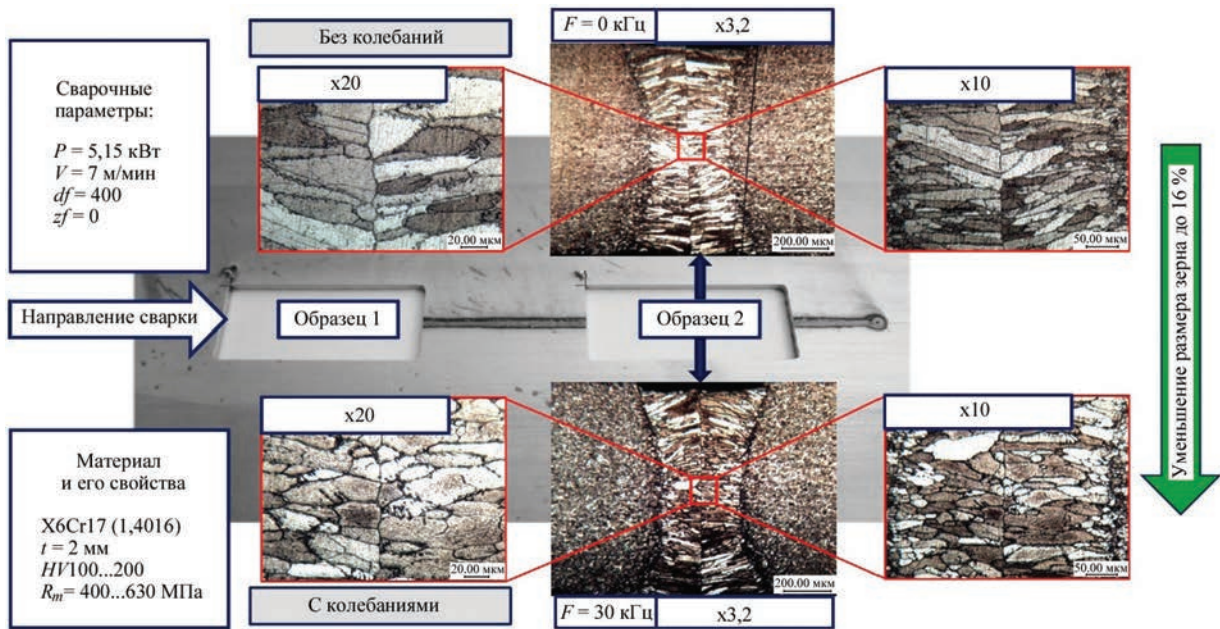


Рис. 2. Микроструктура сварных швов после лазерной сварки без и с дополнительными механическими колебаниями, созданными пьезошейкером

рена микротвердость металла сварного шва и прилегающей зоны по методу Виккерса при нагрузке в 1000 Н на автоматическом твердоме UT200 фирмы ВАQ. Микроструктура полученных образцов приведена на рис. 2. Характер разрушения образцов после испытаний и результаты измерения микротвердости приведены на рис. 3. С целью получения более подробного представления о влиянии параметров колебаний и усиления эффекта проведены исследования, позволившие определить оптимальное положение для пьезошейкеров и прижимов относительно будущего сварного стыка. Был разработан экспериментальный стенд, состоящий из камеры для сдвиговой спекл-интерферометрии (ширографии), снабженной системой диодной лазерной подсветки, пьезошейкера модели PS-X03-6/500, усилителя сигнала пьезошейкера фирмы Isi-sys GmbH и вакуумного насоса, обеспечивающего фиксацию пьезошейкера на поверхности образцов.

В ходе этих экспериментов регистрировались собственные колебания поверхности образцов, вызываемые пьезошейкером. Для разработки концепции оптимального положения пьезошейкеров было рассмотрено влияние на образование механических колебаний различных факторов, таких как: параметры самого пьезошейкера (амплитуда колебаний A (В), определяемая подаваемым напряжением, частота колебаний f (кГц), создаваемых пьезошейкером; позиция пьезошейкера относительно стыка (расстояние между краем пьезошейкера и стыком $x1$ (мм) и относительно края образца $y1$ (мм), а также расположение на лицевой или обратной стороне образца); толщина образца h (мм), расположение прижимов под но-

мерами 1–4 относительно краев образца и будущего стыка (рис. 4). В ходе экспериментов прижимы 1 и 2 изменяли свое положение относительно стыка, оно определялось расстоянием между центром прижима и границей стыка $x2$ (мм). Перед началом экспериментов поверхность образца покрывалась тонким слоем белой краски, предназначенной для ширографии, что снижало отражение и давало возможность получить более четкий сигнал. Схема расположения пьезошейкера, прижимов 1–4 приведена на рис. 4. Стрелками обозначены направления изменения положения пьезошейкера и прижимов 1 и 2. Границей будущего стыка считалась ближайшая к наблюдателю кромка образца.

Результаты измерений пластичности и микротвердости образцов металла шва (см. рис. 2), полученного без воздействия колебаний: $\delta = 15 \%$; $HV_{0,1} = 205...381$, после дополнительных колебаний с частотой 30 кГц: $\delta = 40 \%$; $HV_{0,1} = 223...434$.

Результаты (см. рис. 3) свидетельствуют о влиянии создаваемых при помощи ультразвука механических колебаний на свойства сварного шва (пластичность и микротвердость). В основном микротвердость металла шва после использования дополнительных механических колебаний стала распределяться равномернее в пределах $HV 284...314$, тогда как до этого присутствовало большое количество хаотично расположенных областей с повышенной по значению микротвердостью $HV 331...381$.

Эксперименты по ширографии проводились сериями с изменением одного из параметров. В ходе них изменялась амплитуда колебаний A (3,

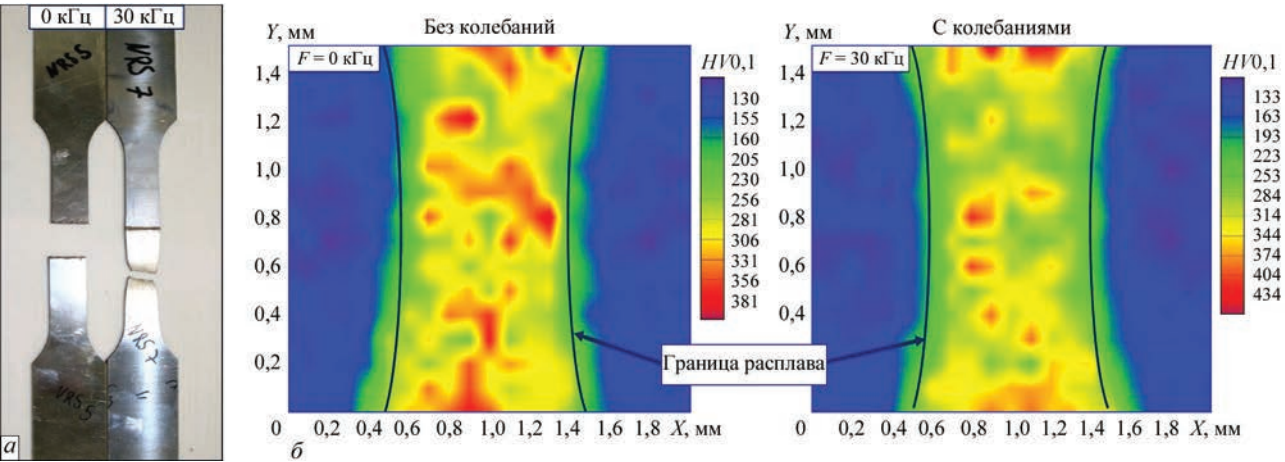


Рис. 3. Результаты механических испытаний: а — характер разрушения образцов при испытаниях на растяжение; б — результаты измерения микротвердости

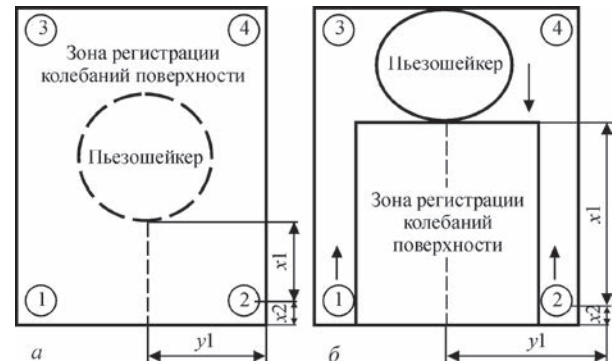


Рис. 4. Схема расположения пьезошейкера и прижимов (1–4) относительно поверхности образца: а — с обратной стороны образца без перемещения; б — с лицевой стороны образца с изменением его позиции, а также прижимов 1 и 2

5 В), частота колебаний f в интервале от 10 до 30 кГц с шагом 100 Гц, изменялась толщина используемых образцов в интервале от 2 до 8 мм путем совмещения пластин толщиной 2 мм друг с другом с помощью прижимов, менялось расположение прижимов и пьезошейкера относительно поверхности образца и менялась сама поверхность, на которой он располагался (лицевая или обратная сторона). Значения параметров экспериментов по ширографии приведены в таблице.

При сварке рассматриваемых сталей металл шва, как правило, имеет ферритную микроструктуру.

Это вызвано отсутствием α - γ -превращения при 1000 °С, необходимого для роста зерна. Эти стали при сварке характеризуются образованием в зоне сплавления крупнозернистой структуры (см. рис. 2, образец 2, верхний), что невозможно предотвратить традиционными способами. После сварки обычно наблюдается снижение ударной вязкости при увеличении содержания хрома в сварном шве. Это ведет к увеличению склонности к МКК. В результате исследований выяснилось, что при лазерной сварке данной стали ультразвуковые волны влияют на сварочную ванну, способствуя измельчению кристаллической структуры сварного шва (уменьшение размера зерна до 16 %) (см. рис. 2, образец 2, нижний), сопротивляемости деформациям при более низкой микротвердости и более равномерном ее распределении в объеме металла шва за счет перемешивания расплава в сварочной ванне.

Из этих экспериментов выяснилось, что механические колебания, создаваемые в образце при помощи пьезошейкера, расположенного в центре обратной стороны образца, даже на выставленных немаксимальных параметрах распространяются на глубину более 8 мм. Были зарегистрированы заметные зоны колебаний в области будущего стыка при увеличении толщины образца с 2 до 8 мм. Это позволит применять этот метод воздей-

Параметры, изменяемые в ходе экспериментов по ширографии образцов, выполненных с применением УЗ-колебаний

Номер серии экспериментов	Расположение пьезошейкера относительно образца	Расположение пьезошейкера на поверхности образца (x_1 ; y_1), мм	Толщина образца h , мм	A , В	Позиция зажимов 1 и 2 (x_2), мм
1	Обратная сторона образца	В центре образца	2	3	5
2			2+2	3	5
3			2+2+2	3	5
4			2+2+2	3	5
5	Лицевая сторона образца	5...45 (с шагом 10);50	2	3;5	5
6		15...45 (с шагом 10);50	2	3;5	10
7		15...45 (с шагом 10);50	2	3;5	15
8		15...45 (с шагом 10);50	2	3;5	30

Примечание. Частота УЗ-колебаний f во всех экспериментах менялась от 10 до 30 кГц с (с шагом 100 Гц).

ствия для сварки конструкций из плоских листов, так как обычно толщина листа из данной стали не превышает 8 мм. Самые стабильные и сильные колебания в области стыка при расположении пьезошейкера на лицевой поверхности образца возникали на частотах 13,4; 18,6 и 24,7 кГц. Наибольший эффект на границу будущего стыка оказывает частота 18,6 кГц. С увеличением амплитуды колебаний с 3 до 5 В эффект усиливался незначительно. При приближении пьезошейкера к границе стыка колебания, возникающие на ней, дробились на части, но при этом они объединялись из отдельных зон в новую небольшую. Удаление прижимов 1 и 2 от границы стыка приводит к ослаблению передачи колебаний от пьезошейкера и, соответственно, ослаблению регистрируемого сигнала. Так как во время сварки близко располагать прижимы и пьезошейкеры нежелательно для обеспечения их сохранности, было выбрано минимально возможное для реализации своих функций расстояние, а именно 15 мм от края стыка.

В качестве оптимальной комбинации параметров, связанных с механическими колебаниями, для продолжения дальнейших экспериментов по лазерной сварке были выбраны следующие: частоты колебаний 18,6 и 24,7 кГц; амплитуда колебаний — 5 В; позиция шейкера относительно стыка в интервале от 15 до 25 мм; позиции прижимов относительно стыка не более 15 мм.

Пример регистрации колебаний при сочетании таких параметров приведен на рис. 5.

На рисунке видно изменение контрастности цвета возникших зон колебаний в области стыка, а также их уплотнение, что свидетельствует о большой величине оказываемого ими влияния на будущую сварочную ванну.

В заключение следует отметить следующее. Разработан экспериментальный стенд для лазерной стыковой сварки с воздействием ультразвука на сварочную ванну. Проведены исследования вибрационных характеристик ферритной нержавеющей стали 1.4016. Определены оптимальные параметры для создания максимальных механических колебаний в области стыка: частота — 18,6 кГц; амплитуда колебаний — 5 В; позиция пьезоэлектрического шейкера относительно стыка — 15 мм; расположение прижимов относительно стыка — 15 мм. Выяснено, что при сварке применение колебаний сварочной ванны позитивно влияет на образование мелкозернистой структуры или уменьшение размера зерна, приводя к увеличению сопротивляемости деформациям при более низкой микротвердости металла шва. Замечено влияние этих колебаний на степень перемешивания расплава, что подтверждается получением бо-

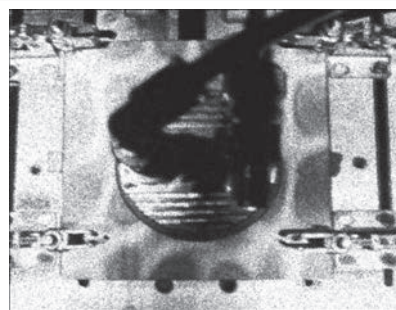


Рис. 5. Зарегистрированные колебания поверхности образца при частоте колебаний пьезошейкера 18,6 кГц, амплитуде 5 В, расстоянии между границей будущего стыка и пьезошейкером 15 мм, расстоянии между границей будущего стыка и позицией центра прижимов 15 мм

лее однородной структуры в сварном шве и равномерным распределением микротвердости в нем.

Результаты можно применить при дальнейших исследованиях по лазерной сварке сталей подобного класса, а также перенести их для дуплексных нержавеющей сталей и мелкозернистых сталей, либо учесть для соединений другого типа и толщины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Михаил Ломоносов» (2016–2017).

1. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12X18H10T / М. З. Зарипов и др. // Нефтегазовое дело. – 2010. – № 2. – С. 1–12.
2. Повышение качества изготовления сварных нефтехимических аппаратов применением вибрационной обработки в процессе сварки / А. Л. Карпов и др. // Башкирский химический журнал. – 2005. – Том 12, № 1. – С. 27–29.
3. Manufacturing technology upgrading of welded sheets of vessels for oil and gas refining / D. V. Karetnikov et al. // Electronic scientific journal «Oil and Gas Business». – 2012. – № 4. – P. 490–500.
4. Герике А., Банасик Р., Хенкель К.-М. Повышения вязкости расплава вибрацией. Отчет DVS. – Научный конгресс в Нюрнберге, 2015.
5. Watanabe T. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Group 210, Issue 12. – P. 1646–1651.
6. Venkannah S., Mazumder J. Changes in Laser Weld Bead Geometry with the Application of Ultrasonic Vibrations // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2009. – Vol II, WCE 2009, July 1–3, 2009, London, U.K.
7. Venkannah S., Mazumder J. Effects of Ultrasound on the Weld Bead Surface of High Carbon Steel Sheets // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2011. – Issue 1. – P. 87–99.
8. Оришич А. М. Лазерное преобразование сварки // Наука из первых рук. – 2010. – № 2(32). – С. 18–19.
9. Николаев Г. А. Сварка в машиностроении. Справочник. – Т. 1. – С. 375–376.
10. Банников Е. А., Ковалев Н. А. Сварочные работы. Современное оборудование и технология. – М.: Астрель, 2009. – 448 с.
11. British standart BS EN 10088-1:2005 «Stainless steels — Part 1: List of stainless steels», Standards Policy and Strategy Committee. – 30.06.2005. – 42 p.

В. В. Сомонов

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого.
195251, м. Санкт-Петербург, вул. Политехническая, 29, РФ.
E-mail: ballak@inbox.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛИВАНИЙ НА СТРУКТУРУ
ТА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА
ПОД ЧАС ЛАЗЕРНОГО ЗАРЯДОВАНИЯ
ФЕРИТНЫХ СТАЛЕЙ

Розглянуто проблеми управління зварювальною ванною при
зварюванні феритних нержавіючих сталей. Проведено порівняльний аналіз робіт в області впливу ультразвукових та

вібраційних коливань на зварний шов. Відображено результати попередніх експериментальних та металографічних досліджень зразків з'єднань, виконаних лазерним зварюванням при додатковому впливі ультразвуковими коливаннями на зварювальну ванну. Досліджено вплив позиціонування притискачів та джерела ультразвукових хвиль щодо границі стику на характер коливань, що виникають в ньому. Визначено найбільш сприятливі частоти і амплітуди коливань для генерації коливань у зоні стику. Отримано результати впливу товщини матеріалу на виникаючі в ньому коливання, які можуть вплинути на стабільність і швидкість охолодження зварювальної ванни і, як наслідок, на мікроструктуру металу зварного шва. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: лазерне зварювання, ультразвукові хвилі, феритні нержавіючі сталі, зварювальна ванна, мікроструктура

Поступила в редакцію 01.11.2016

СВАРКА И РЕЗКА-2017

17-я Международная специализированная выставка

4.04.2017–7.04.2017, Республика Беларусь, г. Минск, проспект Победителей, 20/2
<http://www.minskexpo.com/svarka-i-rezka>

Тематика

- Материалы для сварки, наплавки и пайки
- Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- Научное и информационное обеспечение сварки
- Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- Сертификация сварочного оборудования.

Выставка проводится одновременно с международными специализированными выставками «Металлообработка» и «Порошковая металлургия», а также 10-м Международным симпозиумом «ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ: инженерия поверхности, новые композиционные материалы, сварка» (5–7 апреля 2017 г., Институт порошковой металлургии, г. Минск, ул. Платонова, 41, <http://pmiinstitute.by>).



IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии WRTYS-2017»

23–26 мая 2017 г.

г. Киев, Украина

Организаторы конференции:

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Международный институт сварки
Представительство Польской академии наук в Киеве
Национальная академия наук Украины
Посольство Франции в Украине
Французский институт в Украине

Детальную информацию можно найти на сайте конференции: <http://wrtys.com.ua>

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОРИСТОГО СПЛАВА АЛЮМИНИЯ С МОНОЛИТНЫМ СПЛАВОМ МАГНИЯ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГАЛЛИЕМ

Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, М. А. ХОХЛОВ, Ю. А. ХОХЛОВА, В. С. СИНЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В рамках отработки технологической задачи — получение сверхлегких сварных конструкций из пористых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Zn с монолитными магниевыми сплавами (стандартный сплав МЛ4 системы Mg–Al–Zn и экспериментальный сплав системы Mg–Ga) проведено комплексное исследование механических и физических свойств диффузионной зоны полученных соединений с целью оценки влияния на них цикла нагрева, характерного для разных видов сварки. Сварку проводили двумя способами с максимальной температурой нагрева до 300 °С: диффузионную сварку, сопровождающуюся длительным циклом нагрева в вакууме, и сварку проходящим током на воздухе, для которой характерен кратковременный цикл нагрева. Для формирования сплошного соединения и активации диффузии использовали галлий. Установлено, что на стороне пористого алюминия формируется диффузионная зона шириной около 10 мкм с незначительным снижением микромеханических свойств в стенках пор, что типично для алюминиевых сплавов при контакте с галлием. В магниевых сплавах, при обоих способах сварки, вдоль линии соединения формируется обширная (60...100 мкм) волнистая интерметаллидно-упрочненная диффузионная зона, преимущественно состава Mg_3Ga_2 с температурой плавления 456 °С, что выше температуры сварки. Таким образом, показана возможность соединения пористых сплавов с монолитными при незначительном их нагреве и химической активации зоны соединения галлием. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: магний, пористый алюминий, галлий, диффузионная сварка, сварка проходящим током, механохимическая активация

Использование сверхлегких пористых сплавов позволяет создавать конструкции с высокой удельной прочностью, т. е. рациональным соотношением прочности к массе. В зависимости от плотности и типа пористости, такие материалы легче монолитных на 50...80 % [1]. Несмотря на разнообразие пористых металлов промышленного производства, широкое их применение до сих пор затруднено по причине дороговизны и сложности производства, но вполне оправдано для технических решений, направленных на создание корпусных или многослойных защитных элементов микроэлектроники аэрокосмического назначения, когда приоритетным показателем является минимизация массы конструкции [2]. Пористые металлы входят в десятку рейтинга «Материалов Будущего», как и магниевые сплавы, масса которых на 30 % меньше традиционно используемых алюминиевых сплавов.

Имеющиеся для проведения экспериментов новые пористые материалы на основе алюминия (ПА) производства фирмы «MetalFoam» (Германия) (рис. 1), а также опыт получения сварных соединений при температурах порядка 300 °С [3–6], разработанный для создания биметаллических блоков капсулирования микроэлектроники, позволил нам актуализировать и продолжить исследования, на-

правленные на создание сверхлегких многослойных биметаллических сэндвич-панелей с использованием пористых и монолитных сплавов, в различной последовательности и комбинации.

Целью работы являлось получение биметаллических соединений сэндвич-панелей ПА с монолитными магниевыми сплавами на основе механохимической активации галлием, ограничения



Рис. 1. Панели пористого алюминия производства фирмы «MetalFoam» с и без монолитных стенок

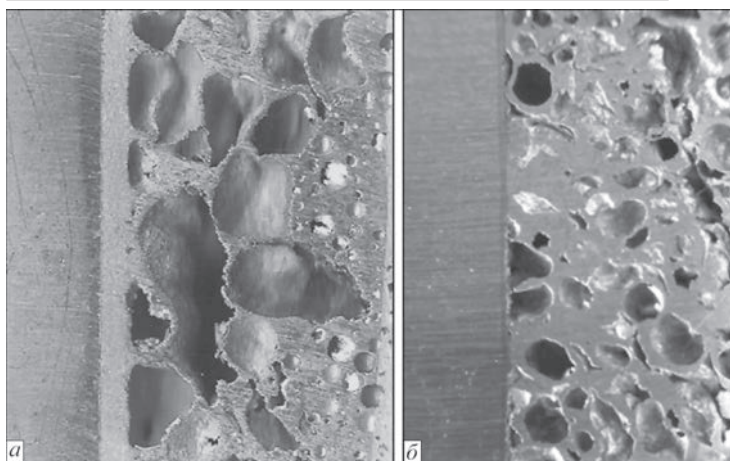


Рис. 2. Сварные соединения монолитного магниевого сплава МЛ4 с панелями ПА: с монолитными стенками (а) и без них (б)

температуры сварки до 300 °С и применения двух способов сварки с различной скоростью и продолжительностью нагрева. Для технологической оценки оптимальности применения кратковременного или продолжительного нагрева было проведено комплексное исследование особенностей формирования микроструктуры, химического и фазового состава, микромеханических свойств диффузионной зоны полученных образцов.

Соединяемые пары сплавов: ПА (системы Al–Mg–Zn) со стандартным магниевым сплавом МЛ4 (системы Mg–Al–Zn) и ПА с экспериментальным легированным сплавом (системы Mg–Ga).

ПА содержит большое количество наполненных газом пор диаметром 1...2 мм, пустоты составляют около 80 % общего объема материала.

Содержание основных химических элементов соединяемых материалов, мас. %

Материал	Al	Mg	Zn	Ga
ПА	83,2	6,7	5,9	-
МЛ4	5,0...7,0	88,4...92,9	2,0...3,5	-
МЛ4+Ga	5,0	80,0	2,5	10,0

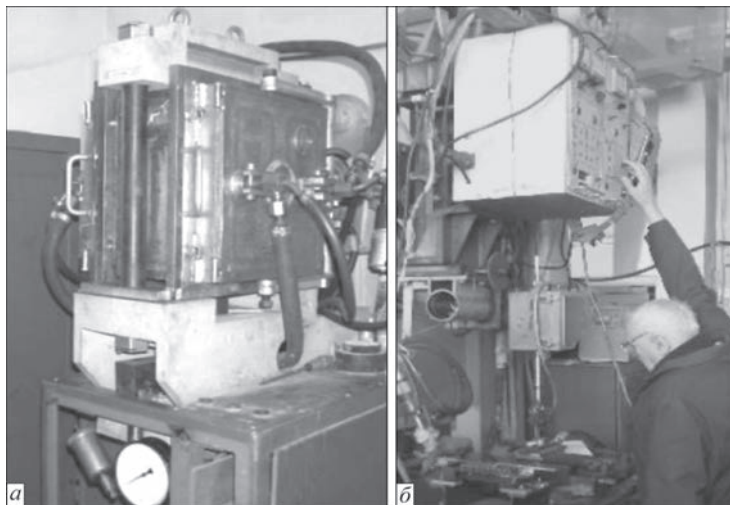


Рис. 3. Оборудование для сварки с различными скоростями нагрева: а — установка П-115; б — лабораторная установка

При деформации ПА показывает нелинейное поведение, характерное для пористых структур, поэтому материал имеет высокий коэффициент ударопоглощения (способен адсорбировать кинетическую энергию удара). ПА характеризуется низкой гигроскопичностью (1...3 %), нетоксичен, термостоек, не разрушается при воздействии горюче-смазочных веществ, растворителей, ультрафиолета и радиации. При воздействии открытого огня он постепенно размягчается, если температура в зоне нагрева достигает температуры плавления 650 °С. Микротвердость (по Мейеру) стенок пор ПА составляет 1,5 ГПа, модуль упругости Юнга 69 ГПа.

Магнийевый литейный сплав МЛ4 применяется для изготовления деталей двигателей и других агрегатов, работающих в условиях статических и динамических нагрузок. Предельная рабочая температура: 150 — длительная, 250 °С — кратковременная. Температура плавления 720...750 °С. Микротвердость (по Мейеру) 1,2 ГПа, модуль упругости Юнга 43 ГПа.

Экспериментальный магнийевый сплав системы Mg–Ga (64Mg + 32Mg₅Ga₂ мас. %) на основе стандартного МЛ4, легированного галлием и модифицированного высокодисперсными частицами диоксида циркония (диаметром 20 нм), был получен при индукционном переплаве в среде аргона [7] без последующей обработки. Температура плавления 750 °С. Сплав дисперсионно упрочнен интерметаллидами Mg₅Ga₂ и модификаторами, поэтому имеет повышенные значения микротвердости (по Мейеру) 4...16 ГПа, модуль упругости Юнга 120...250 ГПа.

Содержание основных химических элементов соединяемых материалов приведено в таблице.

Соединения из панелей ПА толщиной 10 мм и листов МЛ4 толщиной 6 мм (рис. 2) проводили двумя разными способами: диффузионной сваркой в течение 3 ч в условиях вакуума и сваркой проходящим током низкого напряжения в течение 2 мин, в условиях комнатной среды. Для диффузионной сварки применяли установку П-115 (рис. 3, а), а для сварки проходящим током — лабораторную установку (рис. 3, б).

Для удаления оксидных пленок и активации свариваемых поверхностей проводили смачивание предварительно шлифованных соединяемых поверхностей расплавленным при 27,75 °С техническим галлием.

Исследования микроструктуры диффузионной зоны образцов и распределение

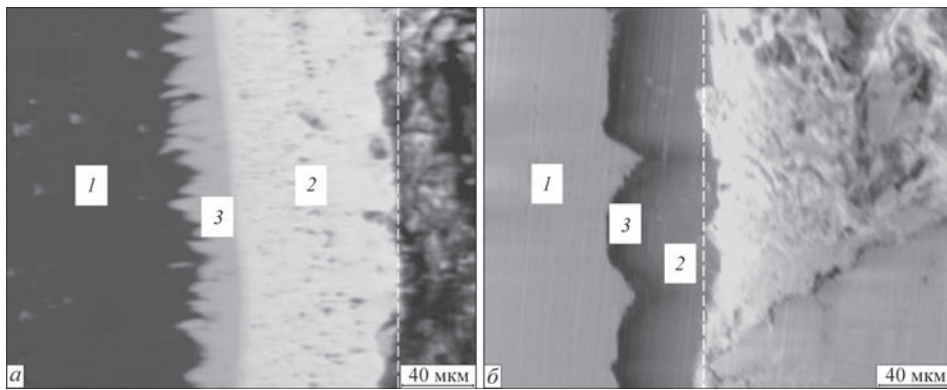


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения, полученной при длительном нагреве в условиях ДСВ (а) и кратковременном нагреве проходящим током (б) (пунктиром обозначена линия нанесения галлия, справа от линии — ПА, слева — магниевый сплав МЛ4; обозначения 1–3 см. в тексте)

химических элементов проводили сканирующим электронным микроскопом JSM-35CF «JEOL», оснащенный спектрометром INCA Energy-350 «Oxford Instruments» (СЭМ).

Коэффициент диффузии оценивали по упрощенной формуле $D = x^2/T$, где x — максимальная глубина внедрения галлия, T — продолжительность сварки.

Диффузия галлия в ПА характеризуется диапазоном глубины около 10 мкм и отсутствием четкой зоны, концентрация 5...20 мас. %, экспериментальный коэффициент диффузии при длительном нагреве (со скоростью 5 °С/мин) в вакууме составляет $0,0092 \cdot 10^{-12}$ м²/с и при кратковременном (со скоростью 150 °С/мин) нагреве проходящим током $0,5555 \cdot 10^{-12}$ м²/с.

Волнистый фронт диффузии на стороне МЛ4 наблюдался при обоих способах сварки (рис. 4). При длительном нагреве формируется диффузионная зона шириной 85...100 мкм, а при кратковременном нагреве с пропусканием тока шириной до 35...60 мкм. Экспериментальный коэффициент диффузии составляет, соответственно: $0,92 \cdot 10^{-12}$ и $20 \cdot 10^{-12}$ м²/с.

Исследование количественного химического состава диффузионной зоны со стороны магниевового сплава (рис. 4, зона 1 — основной металл) показало наличие двух областей с отличным хи-

мическим составом. Зона 2 (ближе к месту нанесения активатора) содержит, мас. %: 35Mg и 64Ga, зона 3 — 73Mg и 24Ga. Основываясь на упрощенной схеме анализа легирования магния при диффузии в него галлия [8] и согласно бинарной диаграмме этой химической системы, формируются интерметаллидные соединения MgGa, Mg₂Ga и Mg₅Ga₂ с температурой плавления 373...456 °С, что является выше температуры сварки.

В предварительно легированном галлием экспериментальном магниевом сплаве на основе стандартного МЛ4 при активации соединения галлием происходит выравнивание химического состава приконтактной зоны и основного материала (рис. 5). Четко выделенная диффузионная зона отсутствует.

Микромеханическое тестирование диффузионной зоны соединений проводили по стандартным методикам [9, 10] согласно ISO / FDIS 14577-1: 2002 трехгранной алмазной пирамидкой Берковича [11] и использованием прибора «Микрон-гамма». Прибор фиксирует микротвердость по Мейеру и модуль упругости Юнга при автоматической регистрации перемещения индентора Берковича, в зависимости от приложенной к нему нагрузки. Максимальная нагрузка 500 г; погрешность по нагрузке 0,001 г; погрешность по глубине внедрения индентора 5 нм; максимальная глубина инденти-

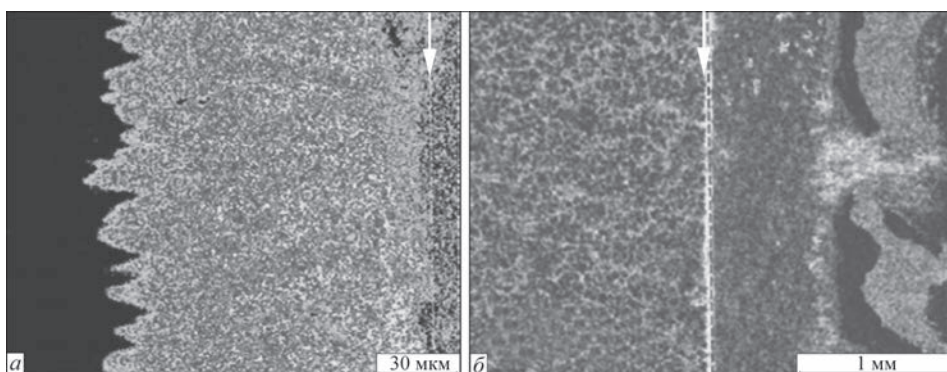


Рис. 5. Элементная карта распределения галлия в базовом сплаве МЛ4 (а) и в легированном (б). Пунктиром и стрелкой обозначена линия нанесения галлия, справа от линии — ПА, слева — магниевые сплавы

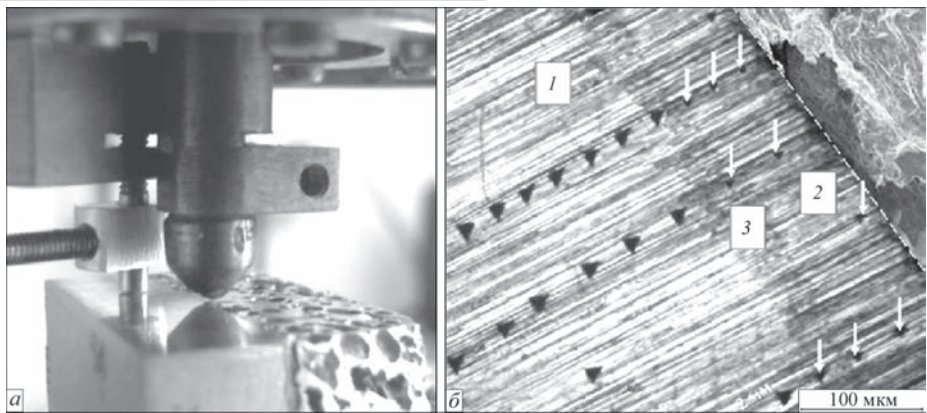


Рис. 6. Микромеханическое испытание соединения МЛ4+ПА на приборе «Микрон-гамма» (а) и отпечатки индентора в диффузионной зоне на стороне магниевого сплава МЛ4 (б) (стрелочками указаны отпечатки меньшей площади, характеризующие упрочнение; пунктиром обозначена линия нанесения галлия)

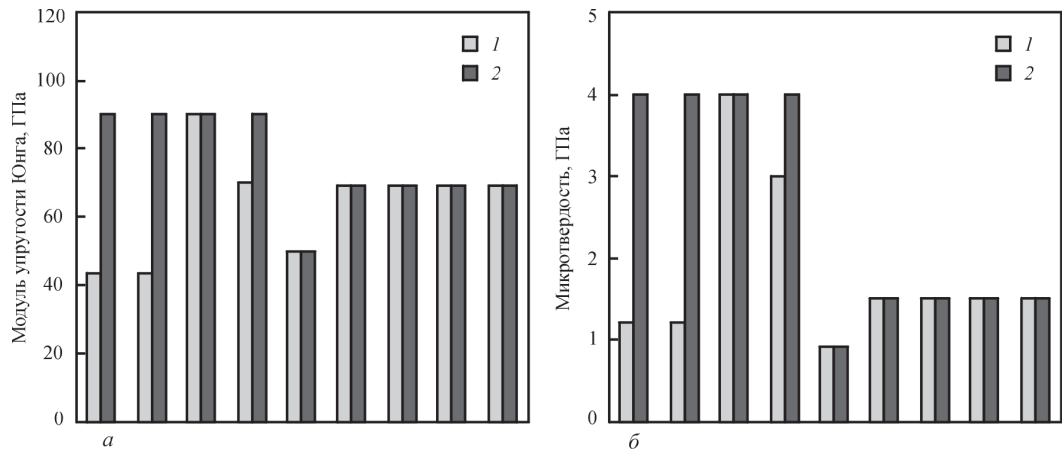


Рис. 7. Диаграмма тенденций распределения модуля упругости Юнга (а) и твердости (б) поперек диффузионной зоны соединения: 1 — МЛ4/ПА; 2 — Mg+Ga/ПА

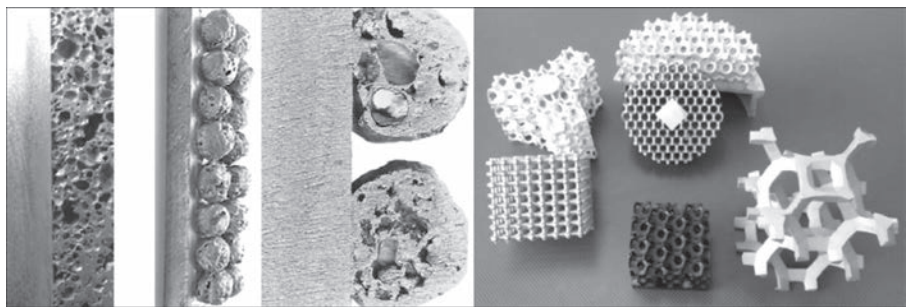


Рис. 8. Крепление разнообразных промышленно производимых ячеисто-пористых металлов на монолитную основу

рования 200 мкм. Результаты представлены в виде диаграмм индентирования при нагрузке 20 г с шагом 50 мкм. Подготовку образцов для индентирования проводили в соответствии со стандартной процедурой полировки легких сплавов до образования зеркальной поверхности и без травления.

Со стороны ПА ширина диффузионной зоны имеет снижение твердости от 1,5 до 1,0 ГПа, модуля Юнга от 70 до 50 ГПа. В диффузионной зоне со стороны сплава МЛ4 (рис. 6) наблюдается значительное повышение модуля Юнга от 42 до 73...110 ГПа и микротвердости от 1,2 до 4,5 ГПа.

Предварительное легирование галлием магниевого сплава приводит к равномерному уровню мо-

дуля Юнга и микротвердости основного материала и приконтактной зоны (рис. 7).

С помощью сварки с применением химической активации галлием возможно крепление разнообразных промышленно производимых ячеисто-пористых металлов на монолитную основу (рис. 8).

Выводы

1. Показана возможность получения соединений при 300 °С двумя способами сварки, существенно отличающимися продолжительностью и скоростями нагрева, применительно к производству сверхлегких многослойных биметаллических сэндвич-панелей с использованием пористых и мо-

нолитных сплавов на основе алюминия и магния, в различной последовательности и комбинации, с применением химической активации галлием.

2. Исследование микроструктуры и карт распределения химических элементов в диффузионной зоне соединения показало, что волнообразный фронт диффузии галлия в монолитном магниевом сплаве является типичным по химическому составу для обоих способов сварки. Микро-механические исследования диффузионной зоны соединений показали значительное повышение микротвердости и модуля упругости Юнга со стороны монолитного магниевого сплава МЛ4, выравнивание этих значений в диффузионной зоне и основном металле в легированном галлием сплаве МЛ4, а также незначительное снижение микро-механических свойств в стенках пор алюминиевого сплава. Таким образом, продолжительность и скорость нагрева, в зависимости от используемой технологии сварки и оборудования, влияет только на ширину диффузионной зоны.

Результаты исследований получены при выполнении ведомственной программы НАН Украины «Исследование структурных превращений в швах и разработка технологий сварки тонколистовых оболочечных и спутниковых конструкций из алюминиевых и разнородных материалов для обтекателей и адаптеров ракетно-космической техники» и молодежной научно-исследовательской поисковой программы НАН Украины для молодых ученых «Отработка способа соединения в твердой фазе монолитных магниевых сплавов с вспененным алюминием».

1. Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications; ed. by H.-P. Degischer and B. Kriszt 2002 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – P. 392.
2. Хохлов М. А., Ищенко Д. А. Технологические свойства сверхлегких пористых металлов (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3-4. – С. 60–65.
3. Патон Б. Е., Ищенко А. Я., Устинов А. И. Применение нанотехнологии неразъемного соединения перспективных легких металлических материалов для аэрокосмической техники // Там же. – 2008. – № 12. – С. 5–12.
4. Изготовление переходников нержавеющей сталь-алюминий способом сварки давлением в вакууме / Г. К. Харченко и др. // Там же. – 2012. – № 1. – С. 30–32.
5. Пат. 69145 UA, МПК (2012.01) B01B 1/00, B23K 1/00. Способ з'єднання біметалевого блока для термоізоляції елементів мікроелектроніки / М. А. Хохлов, Ю. А. Хохлова; заявники та патентовласники. – № 201110712; заявл. 05.09.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
6. Khokhlova J. Inter-Granular Phase Formation during Reactive Diffusion of Gallium with Al Alloy // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 768–769. – P. 321–326.

7. Khokhlova J., Khokhlov M., Synyuk V. Magnesium alloy AZ63A reinforcement by alloying with gallium and using high-disperse ZrO_2 particles // Journal of Magnesium and Alloy. – 2016. – Vol. 4, Dec. – P. 265–269.
8. Khokhlov M., Ishchenko D., Khokhlova J. Peculiarities of forming diffusion bimetallic joints of aluminum foam with a monolithic magnesium alloy // Ibid. – 2016. – Vol. 4, December. – P. 326–329.
9. Kazuhisa Miyoshi. NASA/TM-2002-211497 Surface Characterization Techniques: An Overview. – 2002. – P. 12–22. (Электронный ресурс: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020070606.pdf>).
10. Oliver W. C., Pharr G. M. An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research. – 1992. – № 7. – P. 1564–1583.
11. Nano indenters from micro star technologies. Revision 2.3. P.9. (Электронный ресурс: <http://www.microstartech.com/index/nanoindenters.pdf>).

Ю. В. Фальченко, М. А. Хохлов,
Ю. А. Хохлова, В. С. Синюк

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ФОРМУВАННЯ ДИФУЗІЙНОЇ ЗОНИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПОРИСТОГО СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ З МОНОЛІТНИМ СПЛАВОМ МАГНІЮ ПРИ ХІМІЧНІЙ АКТИВАЦІЇ ГАЛІЄМ

В рамках відпрацювання технологічного завдання — отримання надлегких зварних конструкцій з пористих алюмінієвих сплавів системи Al–Mg–Zn з монолітними магнієвими сплавами (стандартний сплав МЛ4 системи Mg–Al–Zn і експериментальний сплав системи Mg–Ga) проведено комплексне дослідження механічних та фізичних властивостей дифузійної зони отриманих з'єднань, з метою оцінки впливу на них циклу нагрівання, характерного для різних видів зварювання. Зварювання проводили двома способами з максимальною температурою нагрівання до 300 °С: дифузійне зварювання, що супроводжується тривалим циклом нагрівання у вакуумі, і зварювання прохідним струмом на повітрі, для якого характерний короткотривалий цикл нагрівання. Для формування суцільного з'єднання і активації дифузії використовували галій. Встановлено, що на стороні пористого алюмінію формується дифузійна зона шириною близько 10 мкм з незначним зниженням мікромеханічних властивостей в стінках пор, що є типовим для алюмінієвих сплавів при контакті з галієм. У магнієвих сплавах, при обох способах зварювання, уздовж лінії з'єднання формується велика (60...100 мкм) хвиляста інтерметалідно-зміцнена дифузійна зона, переважно складу Mg_5Ga_2 з температурою плавлення 456 °С, що вище температури зварювання. Таким чином, показана можливість з'єднання пористих сплавів з монолітними при незначному їх нагріванні та хімічній активації зони з'єднання галієм. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: магній, пористий алюміній, галій, дифузійне зварювання, зварювання прохідним струмом, механохімічна активація

Поступила в редакцію 21.12.2016

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВУАРА РВС-200 ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В АНТАРКТИДЕ НА СТАНЦИИ «АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ»

Г. В. ЖУК¹, И. В. МОРОЗ², А. Ю. БАРВИНКО³, Ю. П. БАРВИНКО³, Ю. Н. ПОСЫПАЙКО³

¹ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 15.

E-mail: oktbpaton@gmail.com

²Национальный антарктический научный центр. 01601, г. Киев, б-р Тараса Шевченко, 16.

E-mail: uac@uac.gov.ua

³ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведен анализ материалов экспертного обследования сварного резервуара РВС-200 для дизельного топлива на украинской антарктической станции «Академик Вернадский», выполненного ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ». Показано, что по региону расположения резервуар вместимостью всего 200 м³ переходит по ответственности в высший класс — ССЗ с установленным сроком эксплуатации не менее 40 лет. В этих условиях требования к экологической чистоте объекта и окружающей среде, при полной изоляции и ограниченных возможностях ремонта, предопределяют необходимость неординарных конструктивных решений по обеспечению безремонтного срока эксплуатации. Даны конкретные технические решения рассматриваемого вопроса. Библиогр. 7, рис. 5.

Ключевые слова: сварной резервуар, высший класс ответственности ССЗ, коррозионные повреждения, нержавеющая аустенитная сталь, защита от коррозии

В 2007 г. на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» на острове Галиндез в архипелаге Аргентинских островов (Антарктида) был построен сварной цилиндрический резервуар РВС-200 для хранения дизельного топлива (рис. 1). Проект резервуара разработан ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция», металлоконструкции изготовлены и смонтированы ООО «Кировоградский завод технологического оборудования». Природные условия в районе строительства довольно благоприятные для эксплуатации емкости. Климат морской, субантарктический, минимальная температура за годы наблюдений не ниже –8 °С. Однако есть данные о минимальной температуре зимой –47 °С (вестник «Вокруг света», Украина, 2010 г., вып. 11). Ветер 30...35 м/с, снег 300 дней в году.

Требование о строительстве резервуара содержится в меморандуме о передаче Англией Украине станции «Фарадей» от 20.07.1996 г. (ныне станция «Академик Вернадский»). Несколько ранее, в 1992 г., Украина присоединилась к Антарктическому договору, в котором изложены особые требования по сохранению экологической среды в Антарктиде. До этого времени для хранения жидкого топлива англичанами на станции «Фарадей» было построено две емкости. Основная емкость в виде прямоугольника в плане высотой около 6 м. Емкость успешно эксплуатируется более 20 лет и

на станции «Академик Вернадский». Конструкция емкости проста и принятая простота гарантирует ее полную безопасность при отсутствии ремонтов в течение более 50 лет. Из стальных балок на болтовых соединениях смонтирована пространственная система с вертикальными и горизонтальными стойками и ригелями, обшитая изнутри листами толщиной 6 мм из нержавеющей стали аустенитного класса. Листы крепятся к каркасу болтами через герметизирующие прокладки. В стенке и крыше имеются технологические патрубки и люки для закачки и забора топлива и осмотра его конструкции. Отметим, что на время проектиро-



Рис. 1. Общий вид резервуара РВС-200 на антарктической станции «Академик Вернадский»

вания рассматриваемого резервуара, в Украине не было государственных норм относительно системы обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. В первой редакции приведенные нормы Украины были приняты в 2009 г. [1].

Проект вновь построенного резервуара выполнен в соответствии с требованиями норм Украины ВБН В.2.2-58.2-94. Данные нормы распространяются на резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов, которые строятся на территории Украины. Повышенная экологическая безопасность резервуара обеспечивается применением конструкции типа «стакан в стакане». Это два стальных сварных резервуара, каждый из которых имеет свою стенку, днище и крышу. Геометрические размеры резервуара: внутренний (основной) резервуар: высота стенки 5,96 м, внутренний диаметр 6,63 м; внешний (защитный) резервуар: высота стенки 6,58 м, внутренний диаметр 6,96 м. Расстояние между стенками 160 мм. Материал всех конструкций сталь ВСт5пс. Толщина стенки и днища основного резервуара 5 мм. Толщина стенки защитного резервуара 5 мм и днища 8 мм. Внутренний резервуар предназначен для постоянного хранения дизельного топлива. Внешний резервуар является аварийным. При нарушении непроницаемости стенки или днища основного резервуара внешний резервуар должен локализовать разлив дизельного топлива в своих пределах. После этого из внешнего резервуара топливо должно быть перекачено в запасную емкость, весь резервуар выведен на огневые работы с возможностью нахождения людей внутри емкости, выявления повреждений и их причин и выполнения необходимого ремонта. После выполнения гидравлического испытания в установленном порядке двустенный резервуар сдается в эксплуатацию для дальнейшего хранения дизельного топлива. Принятая схема восстановления работоспособности рассматриваемого резервуара исходит из наличия в рабочем состоянии продуктопровода для перекачки дизельного топлива в запасную емкость. Защита от коррозии предусмотрена утолщением днища внешнего резервуара — 8 мм и нанесением на днище и нижний пояс стенки основного резервуара защитного покрытия, стойкого к дизельному топливу. Вопрос применения пескоструйной очистки поверхности стенки и днища и нанесения более стойких покрытий проектом не рассматривался. При строительстве резервуара допущены отступления от проекта — не смонтированы два люка-лаза диаметром 500 мм в нижнем поясе стенки и внесены изменения в схему подачи топлива в емкость.

После 10 лет эксплуатации, в соответствии с действующим стандартом Украины [2], ГП



Рис. 2. Общий вид устройства основания резервуара РВС-200 «ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ», на договорной основе с Национальным антарктическим научным центром Украины, выполнено в январе-марте 2016 г. полное техническое диагностирование рассматриваемого резервуара РВС-200.

Цель работы:

- на основе результатов, полученных при полном обследовании резервуара инструментальными и расчетными средствами, подготовить выводы относительно соответствия конструкций и работоспособности резервуара РВС-200 нормам Украины [3; 4];
- разработать конкретные предложения по приведению резервуара РВС-200 к требованиям действующих норм относительно надежности и конструктивной безопасности.

Результаты технического диагностирования подробно изложены в отчете по договору [5] и в публикации [6].

Фундамент резервуара. Резервуар построен на монолитном скалистом основании, что представляет собой характерную поверхность острова Галиндез. Основание резервуара выполнено в виде двухъярусной системы балок (рис. 2). Ниж-

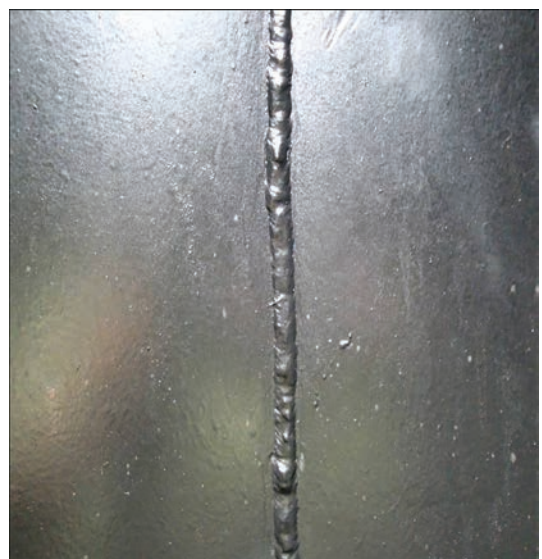


Рис. 3. Общий вид вертикальных сварных швов на внутренней поверхности стенки основного резервуара

ний ярус состоит из семи параллельных железобетонных балок высотой 650 мм, шириной внизу 460 и сверху 330 мм. Балки крепятся к основанию анкерами. Анкера закреплены в пробуренных в скале шпурах и приварены к арматуре балок. Расстояние между балками в осях 1,20 м. Верхний ярус балок состоит из 15 стальных балок (двутавр № 14), которые приварены к закладным деталям на верхней поверхности нижних балок. Расстояние между балками в осях приблизительно 0,41 м. На верхние балки опирается днище внешнего резервуара. Согласно проекту, на днище внешнего резервуара уложены деревянные балки (бруски сечением 100×100 мм) с шагом 300 мм. Нижнее днище сверху и снизу, а также деревянные и стальные балки недоступны для визуального осмотра и инструментального контроля. На деревянных балках лежит днище основного резервуара. Существующая конструкция основания резервуара фактически исключает просадку внешнего и внутреннего днища резервуара. По замерам максимальное отклонение контура внешнего и внутреннего днища равно 6 мм. Есть замечания относительно мелкого ремонта железобетонных балок и ежегодного осмотра и выполнения работ по недопущению коррозии арматуры нижних балок, стальных анкеров и балок верхнего яруса.

Техническое состояние внешнего резервуара. Стенка внешнего резервуара. Стенка смонтирована из отдельных, предварительно завальцованных на радиус резервуара, листов 3,0×1,5 м, толщиной 5 мм, что соответствует проекту. Размер листа во многом диктовался условиями перевозки, особенно от корабля до причала базы, выгрузки на причал и монтажом имеющимися механизмами. Отклонение стенки от вертикали составляет: наружу +22 мм, вовнутрь –26 мм, что не превышает нормативные допуски. Все сварные соединения выполнены с наружной стороны без подварки корня шва, что объясняется монтажом наружной стенки после монтажа внутренней. Осмотр и замеры сварных соединений в процессе их обследования показали, что состояние швов удовлетворительное [5]. При конструктивной толщине стенки 5 мм и трехкратному запасу прочности по расчетным кольцевым напряжениям, односторонняя сварка обеспечивает достаточную прочность вертикальных и горизонтальных швов. Важно и то, что внешняя стенка нагружается только при аварийной ситуации, когда нарушается целостность внутреннего (основного) резервуара. Это исключает ее циклическое нагружение. Имеющиеся в швах отклонения от стандартов не влияют на работоспособность сварных соединений.

Днище внешнего резервуара. Оценка днища выполнена по результатам осмотра и замеров тол-

щины выступающей части днища (окраек). Толщина днища равна 7,5...7,8 мм. В днище варен патрубок для слива конденсата из межстенного пространства. Патрубок выведен в пространство между железобетонными балками и заканчивается вентилем. По данным работы [5] нижнее днище является работоспособным.

Расчет на статическую прочность стенки внешнего резервуара показал, что расчетные напряжения в первом (снизу) и во втором поясах составляют 45 и 35 МПа, что в 4-5 раз меньше допустимых значений для стали ВСт5пс, равных 147 и 171 МПа [5]. Расчет подтверждает, что толщины приняты конструктивно как минимально допустимые по нормам для данной емкости. Отметим, что под нагрузкой внешний резервуар может быть только при его гидравлическом испытании и при повреждении основного (внутреннего) резервуара с вытеканием из него хранимого дизельного топлива. Состояние стенки отвечает требованиям проекта.

Техническое состояние внутреннего (основного) резервуара. Внутренний резервуар предназначен для постоянного хранения дизельного топлива. Соответственно в его стенку варенный трубопровод для отбора дизельного топлива из резервуара, на крыше установлена дыхательная арматура. Внутренняя поверхность днища и стенки постоянно контактирует с продуктом хранения. Люки в нижнем поясе для доступа вовнутрь резервуара для осмотра конструкций техническим персоналом отсутствуют. Доступ в резервуар возможен только через верхний световой люк и вертикальную лестницу-стремянку у стенки. Отметим, что при отсутствии открытых люков пребывание человека в резервуаре запрещено.

Стенка внутреннего резервуара. Стенка смонтирована из отдельных, предварительно завальцованных листов, аналогично наружной стенке. Геометрическая форма стенки отвечает требованиям норм. На поверхности отсутствуют вмятины и выпуклости. Отклонение образующих от вертикали составляет +38 и –31 мм, разность отметок наружного контура не превышает 6 мм [5]. Вертикальные и горизонтальные сварные соединения выполнены двусторонними стыковыми швами с полным проплавлением. Обнаруженные отдельные отклонения формы валиков швов, подрезы и смещения кромок до 1 мм (рис. 3) не влияют на работоспособность сварных соединений. Толщина стенки 5 мм назначена из условия минимально нормативно допустимой толщины для данной емкости, что подтверждено расчетом внешнего резервуара [5].

Днище резервуара. Днище внутреннего резервуара изготовлено из отдельных листов. Сна-

чала листы сваривались в пять мерных полос с учетом диаметра резервуара. После сварки поперечных швов на верхней стороне, полосы кантовали и выполняли сварку швов с обратной стороны. При толщине днища 5 мм принятая технология обеспечивала непроницаемость швов. Затем мерные полосы затягивали на бруски с нахлестом по длинным сторонам и сваривали между собой внахлест. Можно предположить, что по данной технологии было изготовлено и нижнее днище. Выполненные визуальный осмотр всей поверхности днища и вакуумный контроль всех сварных его соединений подтвердили непроницаемость днища. Более подробно техническое состояние днища изложено в [6]. В днище есть патрубок системы удаления подтоварной воды и чистки резервуара. Патрубок проходит через два днища в пространство между железобетонными балками и заканчивается вентилем.

Крыша резервуара. Каждый резервуар (внешний и внутренний) имеет свою сварную коническую балочную крышу. Между крышами просвет около 300 мм. Каждая крыша монтировалась из двух щитов, собранных внизу. Настил каждой крыши по периметру приварен сплошным швом к окантовочному уголку на внешней и внутренней стенке. Толщина настила равна 4 мм, что соответствует проекту. Все патрубки люков и клапанов проходят через настил обеих крыш с приваркой к ним по контуру. Общий вид крыши резервуара показан на рис. 4. На поверхности крыши отсутствуют недопустимые дефекты в виде прогибов и изломов от снеговой нагрузки. Поверхность имеющихся отдельных вмятин, с отсутствием на них слоя краски, подвержена мелкой атмосферной коррозии глубиной 0,2...0,3 мм. Состояние крыши работоспособно.

Коррозионные повреждения резервуара. При общем технически удовлетворительном состоянии металлоконструкций рассматриваемого резервуара (статическая прочность и устойчивость), надежность резервуара определяется величиной коррозионных повреждений основных несущих

конструкций. Выполненное диагностирование резервуара показало, что больше всего поражены коррозией днище внутреннего резервуара и нижняя внутренняя поверхность его стенки на высоту до 300 мм. Это зона скопления отстойной воды и различных солевых отложений: сульфидов, хлоридов и др. Отдельные участки днища, в основном примыкающие к сварным швам, имеют протяженные язвенные повреждения. Язвенные повреждения сосредоточены участками площадью 10...20 см² при глубине до 2,0 мм. Повреждение примыкающей к днищу стенки носит более равномерный характер с глубиной отдельных язв до 1...1,5 мм. Имеющиеся коррозионные повреждения показывают, что состояние поверхности основного днища и нижней части внутренней стенки будут определять расчетный срок службы резервуара. При этом надо учесть, что при коррозионном повреждении в отдельных местах на глубину 50 % и более толщины, днище подлежит замене [7].

Поиск оптимального варианта защиты от коррозии резервуара РВС-200 в условиях Антарктиды. По классификации норм Украины [1], данный резервуар РВС-200 с дизельным топливом, при расположении его в Антарктиде, относится к классу ответственности ССЗ как биологически опасный объект. Срок эксплуатации такого резервуара должен составлять не менее 40 лет. Принятый срок в данном случае имеет и другое обоснование. Очень высокая стоимость доставки конструкций и рабочей силы на место монтажа, отсутствие на месте какой-либо ремонтной базы и требования к безотказной работе резервуара также диктуют необходимость в максимально длительном сроке службы. В обычных условиях на «большой земле» это достигается применением покрытий на эпоксидной основе, плазменным напылением цинка, базальтовым покрытием и рядом других. Все перечисленные покрытия требуют очистки поверхности до стального блеска до класса Sa 3 по ISO 8501.

С учетом малых объемов работ, доставка в Антарктиду комплекта оборудования в оба конца, песка, компонентов покрытия и рабочих будет превышать стоимость самого резервуара. Многократно засвидетельствовано в Украине и в других странах, что фактический срок службы перечисленных покрытий не превышает 12 лет (при нормативном сроке 10 лет [4]).

С учетом уже прошедших 10 лет эксплуатации резервуара, к достижению срока службы 40 лет необходимо будет три раза обновлять покрытие, с выполнением каждый раз его пескоструйной зачистки. Логичный вывод — в таких условиях необходимо неординарное решение по повышению срока службы данного резервуара, нужен принци-



Рис. 4. Общий вид крыши резервуара РВС-200

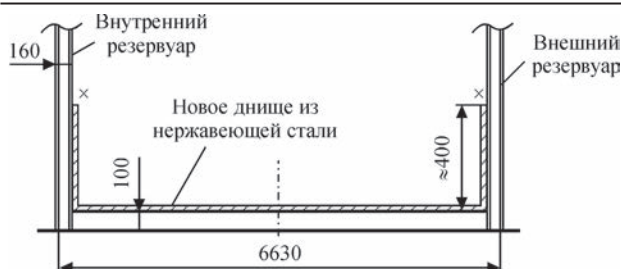


Рис. 5. Схема конструктивного решения по защите внутреннего днища от коррозии

пиально другой подход для гарантирования требуемого срока.

Как один из вариантов, предлагается устройство на днище внутреннего резервуара нового днища со стенкой высотой до 400 мм (рис. 5). Днище и стенка выполняются сварными, из листов нержавеющей аустенитной стали толщиной 3 мм. Листы оптимальных размеров укладываются и свариваются на существующее днище без особой его зачистки. Затем собирается и выполняется сварка листов стенки между собой и по всему верхнему периметру к стенке внутреннего резервуара. Все работы должны выполняться по проекту. Фактически будет выполнена полная непроницаемая облицовка нижней поверхности основного резервуара, которая подвергается активной коррозии. Предлагаемое решение гарантирует безремонтный срок работоспособности днища не менее 40 лет.

Выводы

1. Проект резервуара РВС-200 и его строительство выполнены с неполным учетом особенностей расположения и длительной эксплуатации резервуара на станции «Академик Вернадский». Реализация выводов и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации резервуара, изложенных в отчете [5] и настоящей публикации, позволит обеспечить требуемую надежность при его эксплуатации.

2. Техническое состояние резервуара РВС-200 на момент обследования отвечает требованиям норм Украины ВБН В.2.2-58.2-94 относительно статической прочности и устойчивости, с учетом которых выполнен проект и строительство. Внутренний (основной) резервуар имеет недопустимые коррозионные повреждения днища, что требует выполнения в течение 2...3 лет решений по защите от коррозии днища и нижней части его стенки с учетом расчетного срока эксплуатации, равным 40 лет. Считаем, что одним из таких решений может быть предлагаемое в данной публикации устройство дополнительного защитного днища и части стенки из нержавеющей аустенитной стали.

3. Допущенные при строительстве резервуара РВС-200 отклонения от проекта не позволяют выполнять его техническое обслуживание в период эксплуатации с соблюдением принятых правил техники безопасности. В течение ближайших 2-3 лет надо привести резервуар к требованиям проекта.

1. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 32 с.
2. ДСТУ-Н Б А.3.-10:2008. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів.
3. ВБН В.2.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти та нафтопродуктів.
4. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів.
5. Технічний звіт (експертний висновок) про технічний стан резервуара РВС-200, встановленого на українській антарктичній станції «Академік Вернадський». – К.: ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ», 2016. – 59 с.
6. Посипайко Ю. М. Дефектоскопія в Антарктиці: Технічне діагностування резервуара РВС-200 на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» // Техн. діагностика і неразруш. контроль. – 2016. – № 4. – С. 46–51.
7. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. – М.: Недра, 1988. – 264 с.

Г. В. Жук¹, І. В. Мороз², А. Ю. Барвінко³,
Ю. П. Барвінко³, Ю. М. Посипайко³

¹ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ».
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 15.
E-mail: oktbpaton@gmail.com

²Національний антарктичний науковий центр.
01601, м. Київ, б-р Тараса Шевченка, 16.
E-mail: uac@uac.gov.ua

³ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ОСОБЛИВОСТІ БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРА РВС-200 ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА В АНТАРКТИДІ НА СТАНЦІЇ «АКАДЕМІК ВЕРНАДСЬКИЙ»

Наведено аналіз матеріалів експертного обстеження зварного резервуару РВС-200 для дизельного палива на українській антарктичній станції «Академік Вернадський», виконаного ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ». Показано, що по регіону розташування резервуар місткістю всього 200 м³ переходить по відповідальності у вищий клас — СС3 з встановленим терміном експлуатації не менше 40 років. У цих умовах вимоги до екологічної чистоти об'єкта і навколишнього середовища, при повній ізоляції і обмежених можливостях ремонту, зумовлюють необхідність неординарних конструктивних рішень по забезпеченню безремонтного терміну експлуатації. Дано конкретні технічні рішення розглянутого питання. Бібліогр. 7, рис. 5.

Ключові слова: зварний резервуар, вищий клас відповідальності СС3, корозійні пошкодження, нержавіюча аустенітна сталь, захист від корозії

Поступила в редакцію 18.01.2017

ВЛИЯНИЕ ВИБРООБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ И ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины.
01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В работе на основе комплексной диаграммы предельных напряжений цикла предложен метод выбора неповреждающих режимов виброобработки элементов металлоконструкций с целью эффективного снижения в них остаточных напряжений без опасности усталостного повреждения на стадии технологической обработки. Данный метод апробирован на примере испытаний конструктивных элементов из стали 20 и концевой пятника из стали 20ГФЛ соединительной балки восьмиосной железнодорожной цистерны. Сравнительные усталостные испытания показали увеличение долговечности обработанных сварных образцов в 2,5 раза и повышение их предела выносливости на 40 %. В процессе виброобработки кольцевого элемента из стали Ст.3 уменьшение остаточных напряжений сопровождается увеличением его демпфирующей способности. С ростом максимальных напряжений цикла повышение декремента колебаний происходит на большую величину, а его стабилизация по времени совпадает со стабилизацией остаточного напряжения. Это позволяет судить об окончании процесса по изменению и последующей стабилизации декремента колебаний. Установленное уменьшение демпфирующей способности исследуемого образца после виброобработки свидетельствует о его деформационном старении, указывающем на пластическое деформирование в ходе обработки. С повышением амплитуды напряжений цикла уменьшается деформация образца при последующем после виброобработки вылеживании до 1500 ч, а снижение исходных остаточных напряжений растяжения до 0,51 предела текучести материала приводит к его геометрической стабильности. Библиогр. 25, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: виброобработка, сварное соединение, остаточные напряжения, предел выносливости, амплитуда напряжений цикла, предел циклической ползучести, декремент колебаний

Целесообразность и эффективность экологически чистого технологического процесса виброобработки (ВО) сварных и литых деталей для снижения в них остаточных напряжений (ОН) растяжения, которые могут уменьшить срок службы изделия [1, 2], или изменить его форму [3], характеризующегося низкими энергозатратами, подтвержден мировым и отечественным опытом [4, 5]. Производительность метода (продолжительность обработки занимает не более 40 мин) заключается в том, что, подвергая циклическому нагружению в целом всю конструкцию, ОН снижаются в ее элементах, обладающих разной жесткостью, за один технологический цикл.

Однако недостаток ВО в том, что величина переменных напряжений, создаваемых механическими вибраторами, подбирается опытным путем. Это может привести к тому, что амплитуда напряжений окажется либо недостаточной для требуемого снижения ОН, либо настолько большой, что может привести к возникновению усталостных повреждений уже на технологической стадии обработки [6]. Наряду с косвенными способами контроля процесса ВО, в частности, по изменению тока, потребляемого вибратором [7, 8], смещению резонансных пиков по

шкале частот [9], используется способ контроля по изменению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) [10], заключающийся в том, что к концу ВО одновременно уменьшается ширина резонансного пика и увеличивается амплитуда колебаний. Это явление указывает на уменьшение рассеиваемой энергии в обрабатываемом изделии. Подтверждением тому имеются литературные данные [11] виброобработки половинок сварной станины машины постоянного тока массой 7000 кг каждая, которые показали снижение декремента колебаний δ с 12,3 до 9 %.

Декремент определялся по ширине резонансных пиков, записанных до и после ВО [12]. Однако известно, что снижение ОН в материале конструкции происходит только в результате пластической деформации [13], наличие которой должно приводить к увеличению рассеяния энергии в материале [12]. Явное противоречие в направленности изменения декремента колебаний материала с наблюдаемым на практике декрементом колебаний изделия может быть объяснено тем, что в располагаемых на полу обрабатываемых изделиях наряду с рассеянием энергии в материале имеет место также конструкционное рассеяние энергии, изменение которого главным образом и отражается на АЧХ. Данное предполо-

жение подтверждают, во-первых, большие получаемые абсолютные значения δ при ВО образца, имитирующего конструкцию чугуновой станины металлорежущих станков (8,3 %) [14], и оболочки из титанового сплава с приваренными ребрами жесткости, а также стального вала (4,0 и 3,5 % соответственно) [15]. Во-вторых, само изменение декремента колебаний изделия в процессе ВО, например, станины машины постоянного тока 3,3 %, а также двух сварных корпусов координатно-измерительных машин [11] 4,2 и 2,8 % соответственно, в несколько раз превышает абсолютное значение декремента колебаний материала, который при напряжении, свойственном ВО, в условиях комнатной температуры для углеродистых сталей составляет 0,2...1,0 %, для титановых сплавов 0,05...0,15 %, для чугунов 2...5 % [16].

Таким образом, существующее до настоящего времени противоречие в направленности изменения декремента колебаний материала с наблюдаемым в промышленных условиях, указывает прежде всего на необоснованность контроля процесса ВО по критерию, основанному на определении интегральной характеристики рассеяния энергии в конструкции, изменение которого в процессе ВО, во-первых, не связано непосредственно с изменением остаточных напряжений, во-вторых, многократно превышает рассеяние энергии в материале. Поскольку изменения ОН происходят в материале обрабатываемого изделия, то этот процесс следует оценивать по изменению рассеяния энергии в материале.

В связи с этим цель настоящей работы состоит в оптимизации метода ВО элементов металлоконструкций и оценке ее влияния на их сопротивление усталости и установление взаимосвязи изменения рассеяния энергии в обрабатываемом элементе с кинетикой остаточных напряжений.

Объекты исследования, испытательное оборудование. Исследования оптимизации метода ВО проводились как в лабораторных условиях на образцах из стали 20 ($\sigma_b = 440$ МПа, $\sigma_t = 290$ МПа) размером 100×400×420 мм с приваренным вдоль длинной стороны образца ребром, так и в производственных условиях. Приварка ребра полуавтоматическим способом в среде углекислого газа при погружении образца на половину толщины в воду позволила создать высокие остаточные напряжения растяжения, величину и знак которых в направлении, совпадающем с направлением приложения нагрузки, определяли магнитошумовым методом, основанным на использовании эффекта Баркгаузена [17]. Эпюра ОН показала, что на границе перехода шва к основному металлу они максимальны и составили в среднем 220 МПа, т. е. 0,76 σ_t , а на расстоянии 12 мм

уже равны нулю и далее переходят в сжимающие. В дальнейшем при анализе кинетики ОН использовалось значение максимального остаточного напряжения растяжения $\sigma_{ост}^H$. В производственных условиях ВО подвергались балки коробчатого сечения (далее балки) размером 190×170×2000 мм и зоны приварки концевых пятников к элементам соединительной балки восьмиосной железнодорожной цистерны из стали 09Г2С. Пятники сложной конфигурации изготовлены электрошлаковым литьем из стали 20ГФЛ ($\sigma_b = 740$ МПа, $\sigma_t = 590$ МПа), а балки — сваркой из листовой стали 20 толщиной 20 мм. Необходимость проведения ВО концевого пятника объясняется его частым усталостным разрушением в процессе эксплуатации.

ВО металлоконструкций осуществлялась как посредством электромеханического вибратора ИВ107 путем создания переменных напряжений на резонансных или околорезонансных частотах, так и пульсатором ЦДМ-200пу в режиме вынужденных колебаний, позволяющем проводить испытания при любой асимметрии цикла. Амплитуда напряжений измерялась тензометрическим методом.

Испытания образцов на усталость при изгибе проводились на установке ДСО-2 [18] при заданном коэффициенте асимметрии цикла напряжений R в условиях гармонического нагружения с частотой 20 Гц. Амплитуда напряжений измерялась тензометрическим методом.

Для исследований изменения рассеяния энергии в материале были выбраны образцы, вырезанные из трубы стали Ст.3 диаметром 275 мм, толщиной 8 мм в состоянии поставки. Механические характеристики при растяжении цилиндрических образцов, вырезанных из стенки трубы в тангенциальном направлении, составили: $\sigma_{0,2} = 235$ МПа, $\sigma_b = 450$ МПа. Кольцевой образец шириной 115 мм с разрезом закреплялся в верхней своей части в узле колебаний посредством струбины, которая в свою очередь подвешивалась на струнах. Благодаря такой схеме закрепления исключена возможность конструкционного демпфирования. В установке реализуется резонансный принцип возбуждения изгибных колебаний образца посредством электромагнитов, закрепленных на его торцах. Циклические напряжения создавались за счет периодического сближения и удаления концов образца и рассчитывались по деформации тензорезистора, наклеенного в области действия максимального изгибающего момента. Для создания ОН на наружной поверхности по окружности посередине образца выполнялась наплавка, а внутренняя его поверхность охлаждалась проточной водой. Оценка величины и зна-

ка ОН в околошовной зоне, действующих вдоль наплавки, проводили магнитошумовым методом [17]. Значения $\sigma_{ост}^H$ на расстоянии 2 мм от наплавки составляли в среднем 200 МПа, т. е. $0,85\sigma_{0,2}$, а на расстоянии 8 мм — 50 МПа. Декремент колебаний определялся методом записи виброграммы свободных затухающих колебаний образца [19] с использованием для этой цели указанного тензорезистора. Ввиду того, что при нанесении наплавки существовала опасность повреждения датчика, определение δ дублировалось еще одним способом. Для измерения размаха колебаний образца использовалась промышленная телевизионная установка ПТУ-61. Для увеличения точности измерений телевизионная камера через специальный переходник подсоединялась к микроскопу МБС-1, закрепленному на корпусе испытательной установки. Для измерения количества циклов колебаний образца, соответствующих половинному затуханию их размаха, использовался частотомер. Декремент колебаний определялся при амплитуде напряжений цикла $\sigma_a = 7$ МПа. Минимальная σ_a при ВО составляла 15, максимальная 60 МПа.

Анализ результатов исследований. Оптимизация метода ВО заключалась в выборе неповреждающих режимов нагружения металлоконструкций с целью снижения в них ОН без опасности возникновения усталостного повреждения. Он основан на использовании комплексной диаграммы предельных напряжений цикла (ДПНЦ) (рис. 1). По полученным пределам выносливости σ_R образцов с приваренным ребром из стали 20 на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений при $R = 0$ и $0,7$ определялась линия предельных напряжений 1, которая ограничена пределом выносливости при симметричном цикле нагружения (на рис. не показано) и пределом прочности σ_B . Линии 2, 3 соответствуют экспериментально определенным пределам циклической ползучести $\sigma_{ц.п.R}$ [20] стали 20 при растяжении и изгибе, полученным при $R = 0,7$ и $0,85$, т. е. максимальным напряжениям, под действием которых на заданной базе испытаний в режиме циклической ползучести достигается заданное значение остаточной деформации $\epsilon_{пл}$. В данном случае $\epsilon_{пл} = 0,2\%$. Они ограничены пределом ползучести при статическом нагружении (допускается σ_T) и пределом выносливости, названным минимальным пределом циклической ползучести $\sigma_{ц.п}$. Поскольку испытания образцов проводилась при изгибе, то для назначения напряжений от внешней нагрузки $\sigma_{вн}$ использовался участок ДПНЦ, полученный также в этих условиях. Перед началом ВО исходное максимальное остаточное напряжение $\sigma_{ост}^H$, изменяющееся в каждом образце в пределах 210...220 МПа, откладывалось на диаграмме (т. А). Напряжение от

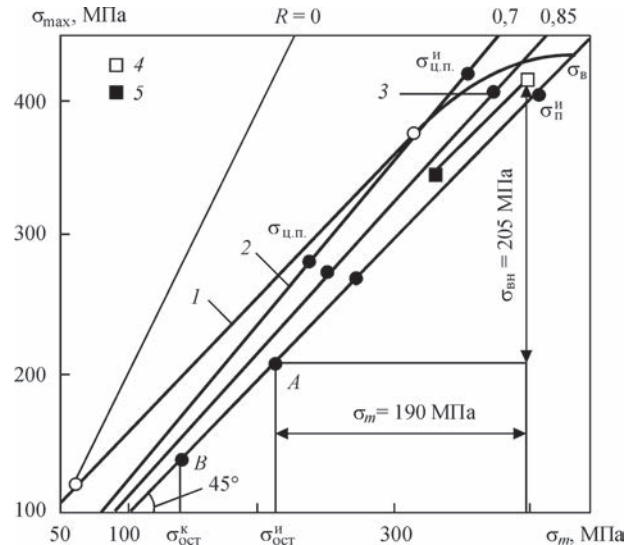


Рис. 1. Диаграмма предельных напряжений сварного соединения стали 20 (1), линии пределов циклической ползучести материала при растяжении (2) и изгибе (3), суммарные напряжения в исходном состоянии (4) и после 10^5 циклов нагружений (5)

внешней нагрузки, которое необходимо приложить к образцу, определяется из условия

$$\sigma_{ц.п.R} < \sigma_{вн} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R,$$

где σ_R , $\sigma_{ц.п.R}$ — напряжения, соответствующие точкам пересечения действия циклических напряжений с линиями предельных напряжений 1 и 3 соответственно. Условие $\sigma_{вн} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R$ обеспечивает отсутствие усталостных повреждений после ВО, а $\sigma_{ц.п.R} < \sigma_{вн} + \sigma_{ост}^H$ — эффективное снижение ОН. Согласно методике $\sigma_{вн}$ следует рассчитать так, чтобы максимальные напряжения находились ниже линии 1, но выше линии 3, что обеспечит отсутствие усталостных повреждений, но эффективное снижение ОН. Если бы $\sigma_{ост}^H$ было больше среднего напряжения, соответствующего $\sigma_{ц.п}$, то для снижения ОН достаточно приложить симметричную циклическую нагрузку. Поскольку в данном случае такого не наблюдается, то для снижения ОН необходимо приложить асимметричную нагрузку, оставаясь в безопасной области нагружения. При значении $\sigma_{ост}^H = 215$ МПа рассчитывались параметры внешней нагрузки (их значения представлены на рис. и в табл. 1). Продолжительность ВО составляла 10^5 циклов нагружения. В течение этого времени режимы нагружения поддерживались постоянными. Видно, что после ВО снижение произошло более, чем на 40 % (на рис. затемненный квадрат) и оно составило в среднем $0,45\sigma_T$ стали 20 (т. В). Для оценки влияния низких ОН были проведены сравнительные усталостные испытания. Анализ полученных результатов при нулевом цикле нагружения в условиях комнатной температуры (рис. 2) свидетельствует об увеличении долговечности виброобработанных образцов во всем диапазоне приложения напряжений (кривая 2). Для сравнения на

Таблица 1. Результаты снижения максимальных остаточных напряжений растяжения в зависимости от вида используемого оборудования при ВО

Объекты исследований	Оборудование	Значения напряжений при неповреждающих режимах обработки для снижения ОН в сварных конструкциях, МПа							
		$\sigma_{ост}^И$	σ_R	$\sigma_{ц.п.Р}$	$\sigma_{вн}$		σ_{max}	$\sigma_{ост}^К$	$\sigma_{ост}^К / \sigma_{ост}^И, \%$
					амплитуда	статистическое			
Балка	Вибратор	245	290	275	40	0	285	190	78
	Пульсатор	230	330	265	20	70	320	155	67
		230	330	265	22	70	322	150	65
		200	320	265	28	88	316	145	72
		175	315	265	24	109	308	120	69
Пятник	Вибратор	480	530	515	35	0	515	385	80
Образец	ДСО-2	215	430	405	15	190	420	125	58
Балка	Термообработка	240	-	-	-	-	-	100	42
Пятник	Термообработка	480	-	-	-	-	-	210	44

рисунке приведена кривая усталости *1* образцов с высокими ОН, полученная в исходном состоянии. Видно, что с понижением нагрузки их действие проявляется в большей мере, вследствие чего кривые усталости расходятся. Например, при снижении напряжений от 180 МПа до напряжения на уровне предела выносливости, равного 100 МПа, долговечность виброобработанных образцов увеличивается от 1,5 до 2,7 раза. При этом предел выносливости, определенный на базе $5 \cdot 10^6$ циклов нагружений, повысился на 40 %. ВО балок и пятников проводилась посредством электромеханического вибратора ИВ107 на околорезонансной частоте продолжительностью примерно 20 мин, что соответствовало 10^5 циклам нагружений. О снижении остаточных напряжений до $\sigma_{ост}^К$ судили по изменению тока, потребляемого вибратором. Амплитуды напряжений определялись исходя из приведенного выше условия, а значения $\sigma_{ц.п.Р}$ при $\varepsilon_{пл} = 0,2 \%$. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Анализ результатов показал, что при максимально достигнутой амплитуде напряжений σ_a

технология ВО позволила снизить исходные ОН на 20...22 %, которые составили, в среднем, $0,65\sigma_T$ соответствующей стали. В некоторых балках ОН были таковы, что для их снижения требовалась амплитуда напряжений, превосходящая линию *1* (см. рис. 1). В этих случаях использовалось асимметричное циклическое нагружение пульсатором ЦДМ-200пу в режиме вынужденных колебаний с частотой 10 Гц. Асимметричное нагружение позволяет значительно расширить возможности ВО за счет увеличения напряжений от внешней нагрузки, значения которых приведены в табл. 1, оставляя их в безопасной области. Видно, что обработка в этом случае снизила исходные ОН в среднем на 32 %, которые составили $0,5\sigma_T$. В качестве сравнения отметим, что значения ОН в балках и пятниках после термообработки составили в среднем $0,35\sigma_T$.

Таким образом, проведенные испытания показали, что для увеличения долговечности и сопротивления усталости неотвественных конструкций ВО вполне может конкурировать с отжигом, особенно если учесть высокую стоимость и продолжительность технологического цикла последнего.

При ВО исследовалось также влияние амплитуды напряжений цикла и времени на изменение ОН в кольцевых образцах и их декремент колебаний. Конструкция образца и схема его нагружения позволили определять не только изменение декремента колебаний в материале, но и его геометрическую стабильность. Эпюры распределения ОН по ширине образца через разное количество циклов нагружения показали, что наиболее интенсивно уменьшаются максимальные ОН, а на расстоянии 6 мм от шва, где исходные ОН равны примерно $0,5\sigma_{0,2}$, их изменение не наблюдалось. Результаты относительного изменения декремента и максимального ОН приведены на рис. 3, где $\delta^И$ и $\sigma_{ост}^И$ — декремент колебаний и остаточное напряжение в исходном состоянии, а δ , $\sigma_{ост}$ — их те-

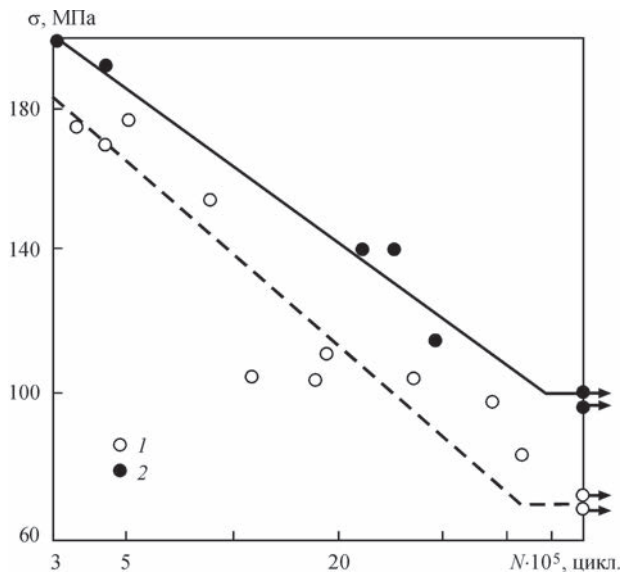


Рис. 2. Кривые усталости сварного соединения в исходном состоянии (1) и после ВО (2) ($R = 0$)

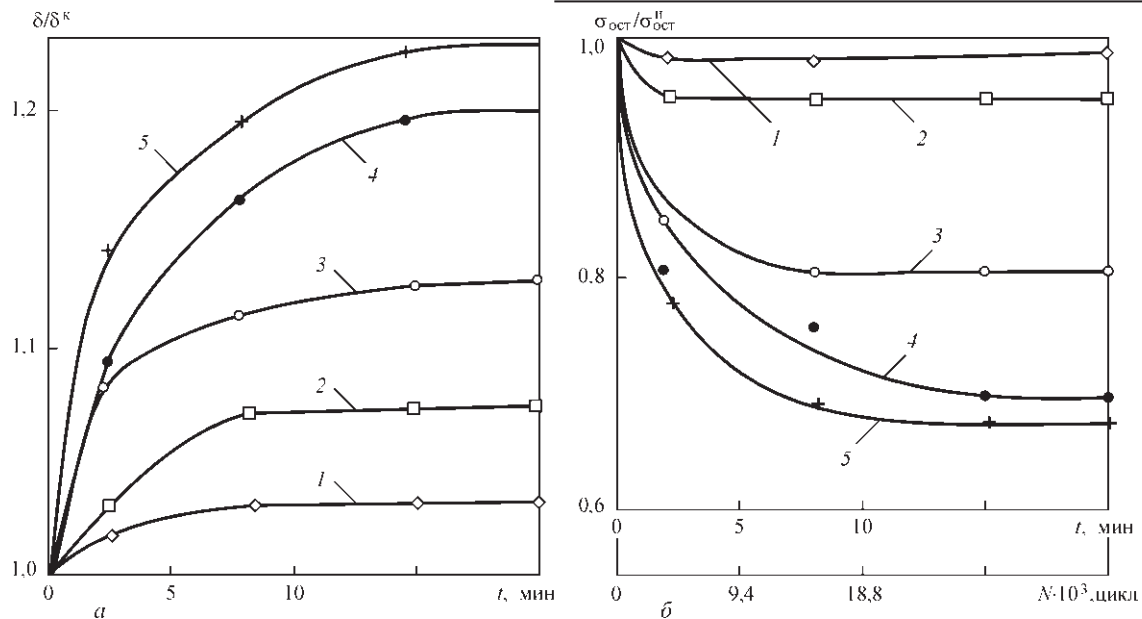


Рис. 3. Зависимость относительного изменения декремента колебаний (а) и максимального остаточного напряжения (б) от времени ВО при разных максимальных напряжениях цикла σ_{\max} : 1 — 185 МПа ($\sigma_a = 15$ МПа); 2 — 205 МПа (15 МПа); 3 — 230 МПа (50 МПа); 4 — 235 МПа (30 МПа); 5 — 265 МПа (60 МПа)

кущие значения в процессе ВО. Значения $\delta^н$ при $\sigma_a = 7$ МПа и $\sigma_{\text{ост}}^н$ для каждого испытуемого образца приведены в табл. 2.

Полученные результаты свидетельствует о том, что при циклическом нагружении образцов происходит одновременное уменьшение ОН и увеличение декремента колебаний, что может быть следствием пластического деформирования материала [12]. О том, что в образцах протекает пластическая деформация свидетельствуют данные об относительном изменении декремента колебаний $\delta/\delta^к$ с течением времени после ВО образцов при разных максимальных напряжениях цикла (рис. 4), где δ — текущее значение декремента, $\delta^к$ — конечное значение декремента по завершении ВО (определен по кривым, приведенным на рис. 3). Представленные графики (рис. 4) показывают, что с течением времени во всех образцах декремент колебаний уменьшается, что свидетельствует о протекании в материале образцов после ВО процесса деформационного старения, который возникает только в результате пластического деформирования материала [21]. Чем на большую величину увеличивался декремент при ВО, тем большее его снижение наблюдалось во времени.

Таблица 2. Исходные значения декремента колебаний материала и максимального остаточного напряжения растяжения

Номер образца	$\sigma_{\text{ост}}^н$, МПа	$\delta^н$, %
1	170	0,107
2	180	0,112
3	190	0,12
4	205	0,111
5	205	0,13

Через 1000...1500 ч, в зависимости от максимальных напряжений цикла, его значение практически стабилизировалось.

Известно влияние статических напряжений на декремент колебаний образцов [16]. Можно ожидать аналогичного влияния остаточных напряжений. Чтобы оценить изменение декремента только за счет уменьшения остаточных напряжений, воспользовались литературными данными [22], где показано, что в образцах из низкоуглеродистой стали изменение статической составляющей от 150 до 100 МПа при амплитуде изгибных напряжений 60 МПа приводит к относительному увеличению декремента колебаний примерно на 3 %. Результаты испытаний образцов из стали 45 [23] вообще не показали изменения декремента при снижении статического напряжения от 250 до 150 МПа. При такой же амплитуде напряжений относитель-

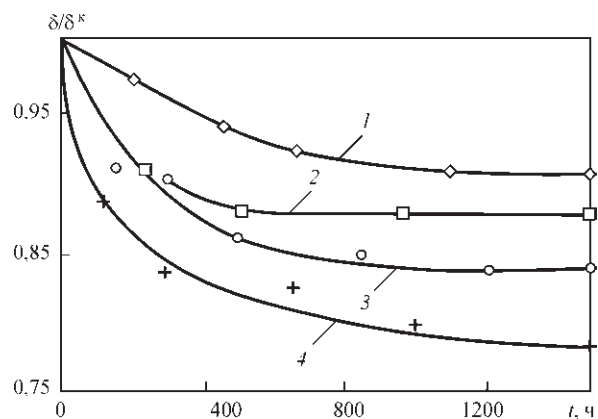


Рис. 4. Относительное изменение декремента колебаний с течением времени после ВО образцов при разных максимальных напряжениях цикла σ_{\max} : 1 — 185 МПа ($\sigma_a = 15$ МПа); 2 — 205 МПа (15 МПа); 3 — 230 МПа (50 МПа); 4 — 265 МПа (60 МПа)

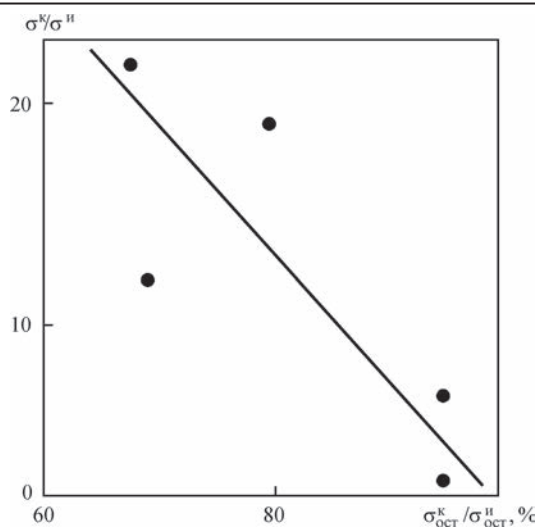


Рис. 5. Зависимость относительного изменения декремента колебаний δ^k от относительного изменения остаточного напряжения $\sigma_{ост}^k$, определенного в конце ВО при разных режимах циклического нагружения

ное увеличение δ кольцевого образца в конце ВО составило 1,22, т. е. 22 % (см. рис. 3). Очевидно, что главной причиной изменения декремента колебаний материала кольцевых образцов явилось их пластическое деформирование при циклическом нагружении. Измерения ОН в образцах через разное время после ВО не показали их изменения. По мере увеличения максимальных напряжений цикла, равных $\sigma_{max} = \sigma_{ост}^H + \sigma_a$, увеличение декремента колебаний и снижение ОН проявляется в большей степени (см. рис. 3). Наиболее интенсивное уменьшение ОН и увеличение δ наблюдается в течение 5...10 мин, что соответствует $(9,4...18,8) \cdot 10^3$ циклов нагружения. Причем чем меньше максимальное напряжение, тем за меньшее время наступают в образце стабилизационные процессы. Дальнейшее увеличение времени ВО практически не влияет на ОН и δ . Анализ литературных данных [24] также подтверждает полученный результат о влиянии количества циклов нагружения при ВО на снижение ОН. Заслуживает внимания также тот факт, что стабилизация декремента колебаний и ОН по количеству циклов практически совпадает. Следовательно, по изменению и последующей стабилизации δ можно судить о процессе снижения и последующей стабилизации ОН в обрабатываемом изделии, а следовательно, и о времени, необходимом для его ВО. Поскольку, согласно данным рисунка, при амплитудах напряжений от 15 МПа и выше имеет место изменение и последующая стабилизация процессов, происходящих в материале образца, то, видимо, только по характеру изменения δ , не располагая его численным значением, нельзя судить об эффективности ВО с точки зрения количественного снижения остаточных напряжений.

Количественная связь относительного изменения декремента колебаний и ОН, определенных после 20 мин ВО образцов при разной амплитуде напряжений, приведена на рис. 5, где конечные значения декремента колебаний и ОН определены по данным рис. 3. Несмотря на то, что максимальные напряжения цикла при ВО большинства образцов были меньше предела текучести, наблюдалось снижение ОН. ВО при наиболее интенсивном в эксперименте режиме нагружения ($\sigma_a = 60$ МПа) привела к относительному увеличению декремента колебаний на 22 % и снизила исходные ОН (205 МПа) на 32 %. В абсолютном значении уменьшению исходных ОН на 65 МПа соответствует увеличение декремента колебаний материала $\Delta\delta = \delta^k - \delta^H$ всего на 0,024 %. Наличие такого графика может быть полезным при нахождении оптимального режима ВО. Полученные экспериментальные результаты показали, что при таком малом значении декремента колебаний материала, а тем более при еще меньшем его изменении в процессе снижения ОН в материале, оценивать эффективность ВО по критерию общего рассеяния энергии в конструкции, если не будет учитываться конструкционное рассеяние энергии, невозможно.

Чтобы оценить эффективность ВО были проведены наблюдения за относительным изменением декремента колебаний и ОН в образце через разное время после создания продольной наплавки при условии, что ВО образец не подвергался. Анализ результатов, приведенных на рис. 6, показал, что до 150 ч также, как и в образцах, подвергавшихся ВО, δ увеличивается, а ОН уменьшаются. Причем момент стабилизации исследуемых характеристик по времени совпадает. Затем в результате процесса деформационного старения декремент колебаний уменьшается практически до исходной величины, а ОН остается неизменным. Уменьшение δ свидетельствует о том, что даже при отсутствии ВО только за счет действия высокого ОН в образце протекает пластическая деформация, что приводит к снижению исходного ОН. Сравнивая экспериментальные данные на рис. 3 и 6, можно отметить, что, несмотря на одинаковый характер изменения декремента колебаний и ОН, стабилизационный процесс при естественном старении наступает через более длительный срок (в данном случае через 150 ч). Из этого следует важный практический вывод о том, что ВО значительно ускоряет (в 450 раз) процесс снижения ОН в сварных конструкциях. Поэтому в более ранних работах [25] термин «виброобработка» употреблялся как «вибростарение».

Поскольку задачей ВО, в том числе, является предотвращение коробления элементов конструк-

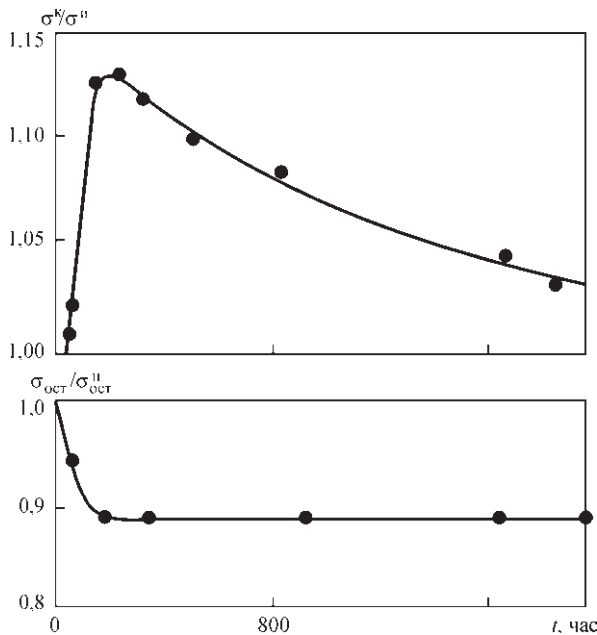


Рис. 6. Зависимость относительного изменения декремента колебаний и максимального ОН от времени в образце, не подвергнутому ВО

ций при хранении или эксплуатации, то в данной работе также исследовалось влияние амплитуды напряжений на изменение линейного размера кольцевого образца, который выражался в изменении зазора Δ между его свободными концами как в течение ВО, так и после нее. Полученные результаты показали, что преимущественное уменьшение зазора происходит в течение $7,5 \cdot 10^3$ циклов нагружения и после $15 \cdot 10^3$ циклов нагружения он

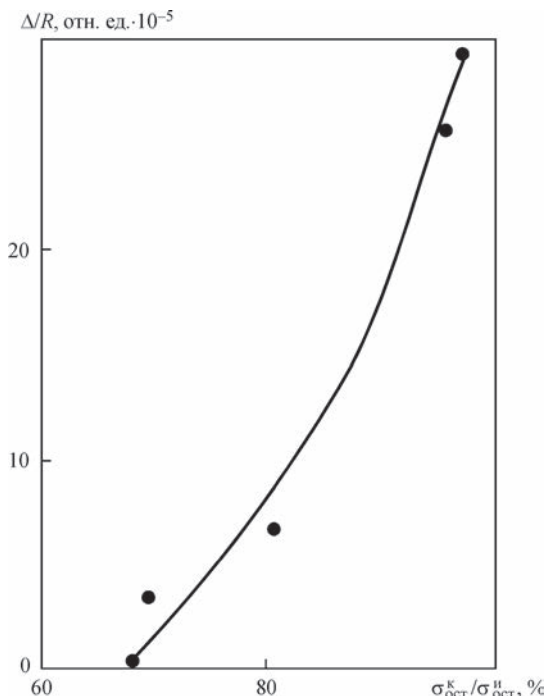


Рис. 7. Зависимость изменения относительного зазора в кольцевых образцах от относительного изменения ОН, определенных через 1500 ч вылеживания после виброобработки при разной амплитуде напряжений цикла ($\sigma_a = 15, 15, 30, 50, 60$ МПа). R — радиус кольцевого элемента

не изменяется независимо от величины σ_a (на рис. не показано). Также можно отметить, что по мере увеличения прикладываемой амплитуды σ_a величина последующего после ВО коробления образца уменьшается, а при $\sigma_a = 60$ МПа изменения зазора в процессе вылеживания образца в течение 1500 ч не наблюдалось. Оценку изменения относительного зазора в кольцевых образцах от относительного изменения ОН, определенных через 1500 ч после ВО, дает зависимость, представленная на рис. 7. Большей величине снижения остаточных напряжений соответствует меньшее изменение зазора после ВО. Установлено, что при снижении исходного ОН на 32 %, что соответствует $0,51\sigma_{0,2}$ исследуемого материала, изменения зазора в образце не наблюдалось. Результаты испытаний показали, до какого уровня в данном случае следует снижать ОН, чтобы добиться геометрической стабильности исследуемого элемента.

Выводы

1. На основе комплексной диаграммы предельных напряжений цикла разработан и экспериментально апробирован метод выбора неповреждающих режимов виброобработки сварных элементов металлоконструкций, обеспечивающих эффективное снижение в них остаточных напряжений и повышение пределов выносливости.

2. Установлено, что уменьшение при виброобработке остаточных напряжений приводит к увеличению демпфирующей способности материала изделия. С ростом максимальных напряжений цикла повышение декремента колебаний происходит на большую величину, а его стабилизация и стабилизация остаточного напряжения по времени совпадают. Это позволяет судить об окончании процесса по началу стабилизации декремента колебаний.

3. Уменьшение декремента колебаний после ВО свидетельствует о протекании в материале процесса деформационного старения, указывающего на пластическое деформирование образцов при виброобработке, в результате чего происходит снижение остаточных напряжений.

4. Виброобработка также обеспечивает геометрическую стабильность сварных элементов. Установлено, что снижение исходных максимальных остаточных напряжений растяжения до $0,51$ предела текучести материала приводит к геометрической стабилизации кольцевого образца.

1. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — К: Наукова думка, 1978. — 193 с.
2. Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 271 с.
3. Шпеер Ф. З., Панов В. И. Вибрационная обработка сварных крупногабаритных конструкций с целью уменьше-

- ния деформации и склонности к образованию трещин // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 13–15.
4. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений / А. Я. Недосека и др. // Автоматическая сварка. – 1974. – № 3. – С. 66–69.
 5. Dreger D. R. Good vibes reduce stresses in metall parts // Machine Design. – 1978. – V. 50, № 13. – P. 100–103.
 6. Зимницкий Ю. А., Хвалынский В. Н. Экспериментальная проверка влияния низкочастотной виброобработки на эксплуатационную надежность корпусных конструкций // Судостроение. – 2004. – № 1. – С. 50–52.
 7. Сутырин Г. В. Снижение остаточных напряжений в сварных соединениях низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. – 1983. – № 2. – С. 22–23.
 8. Зубченко О. И., Грузд А. А., Орехов Г. Т. Применение вибрационного нагружения для снятия остаточных напряжений в сварных рамах // Автоматическая сварка. – 1974. – № 9. – С. 64–66.
 9. Галяш А. А., Козин М. Ю., Коломеец Н. П. Применение низкочастотной вибрационной обработки для стабилизации размеров сварных и литых изделий машиностроения // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 30–32.
 10. Пат. США № 3622404. Способ и устройство для снятия напряжений в детали путем вибрации / Л. Томпсон. – Опубл. 23.11.1971.
 11. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных корпусных деталей электрических машин и гидрогенераторов // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 23–25.
 12. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – К.: Наукова думка, 1971. – 375 с.
 13. Ряхин В. А., Мошкарев Г. Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. – М: Машиностроение, 1984. – 230 с.
 14. Адоян Г. А., Алдошин Ю. С., Герчиков А. М. Вибростарение чугуновых деталей металлорежущих станков // Литейное производство. – 1979. – № 11. – С. 24–25.
 15. Галяш А. А., Васильченко К. И., Чернецов Г. П. Определение частоты нагружения при низкочастотной виброобработке сварных конструкций // Сварочное производство. – 1992. – № 8. – С. 35–36.
 16. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. – К: Наукова думка, 1985. – 264 с.
 17. Гришаков С. В., Ковалев А. И. Использование эффекта Баркгаузена для оценки напряжений и повреждений в ферромагнитных материалах // АН УССР. – Институт проблем прочности. – Препринт. – Киев, 1988. – 48 с.
 18. Дегтярев В. А. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла // Проблемы прочности. – 1982. – № 10. – С. 110–113.
 19. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – К: Наукова думка, 1985. – 248 с.
 20. Дегтярев В. А. Влияние коэффициента асимметрии цикла напряжений на усталость и циклическую ползучесть низколегированных сталей. Сообщ. 2 // Проблемы прочности. – 1991. – № 2. – С. 27–31.
 21. Влияние упрочнения и охрупчивания на рассеяние энергии при деформационном старении корпусных сталей для АЭС / А. А. Астафьев и др. // Там же. – 1977. – № 10. – С. 94–102.
 22. Писаренко Г. С., Хильчевский В. В., Гончаров Т. И. Исследование рассеяния энергии в материале при изгибных колебаниях в поле статических нормальных напряжений // Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. – К.: Наукова думка, 1968. – С. 276–281.
 23. Писаренко Г. С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. – К.: Изд-во АН Украинской ССР, 1962. – 436 с.
 24. Снижение виброобработкой остаточных напряжений в сварных элементах / Е. П. Оленин и др. // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 11–13.
 25. Рагульскис К. М., Стульпинас Б. Б., Толутис К. Б. Вибрационное старение. Сер. Вибрационная техника. – Л.: Машиностроение, 1987. – Вып. 9. – 68 с.

В. О. Дегтярев

Институт проблем міцності
ім. Г. С. Писаренка НАН України.
01014, м. Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2.
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

ВПЛИВ ВІБРООБРОБКИ НА ОПІР ВТОМІ ТА ДЕМПФОВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

У роботі на основі комплексної діаграми граничних напружень циклу запропоновано метод вибору непошкоджуючих режимів віброобробки елементів металоконструкцій з метою ефективного зниження в них залишкової напруженості без небезпеки руйнування від втоми на стадії технологічної обробки. Даний метод перевірено на прикладі випробувань конструктивних елементів зі сталі 20 та кінцевого п'ятника зі сталі 20ГФЛ з'єднуючої балки восьмиосної залізничної цистерни. Порівняльні випробування втоми показали збільшення довговічності оброблених зварних зразків в 2,5 рази і підвищення їх межі витривалості на 40 %. В процесі віброобробки кільцевого елемента зі сталі Ст.3 зменшення залишкових напружень супроводжується збільшенням його демпфувальної здатності. З ростом максимальних напружень циклу підвищення декременту коливань відбувається на значну величину, а його стабілізація за часом збігається із стабілізацією залишкового напруження. Це дозволить судити про закінчення процесу зміни та подальшої стабілізації декременту коливань. Встановлене зменшення демпфувальної здатності досліджуваного зразка після віброобробки свідчить про його деформаційне старіння, що вказує на пластичне деформування в ході обробки. З підвищенням амплітуди напружень циклу зменшується деформація зразка при подальшому після віброобробки вилежуванні до 1500 год, а зниження вихідних залишкових напружень розтягування до 0,51 межі текучості матеріалу призводить до його геометричної стабільності. Бібліогр. 25, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: віброобробка, зварне з'єднання, залишкові напруження, межа витривалості, амплітуда напружень циклу, межа циклічної повзучості, декремент коливань

Поступила в редакцію 07.12.2016

МОБИЛЬНЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РАБОЧИХ МЕСТ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО, А. Ю. АРЛАМОВ

НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115.

E-mail: levchenko.opcb@ukr.net

Приведены результаты анализа средств защиты работающих от ультрафиолетового излучения, создаваемого сварочной дугой. Показано, что интенсивность ультрафиолетового излучения при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и механизированной в защитных газах может многократно превышать допустимые нормы на расстоянии нескольких десятков метров от места сварки. Таким образом, под опасное излучение может попасть вспомогательный персонал, который находится рядом и, как правило, не имеющий средств индивидуальной защиты, другие рабочие, а также случайные люди, которые оказались (проходили) на небезопасном расстоянии от нестационарных рабочих мест дуговой сварки. С учетом полученных результатов разработан и изготовлен опытный образец мобильного защитного экрана для нестационарных рабочих мест сварщиков. Приведены результаты разработки и испытаний предложенного мобильного защитного экрана. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: дуговая сварка, ультрафиолетовое излучение, нестационарные рабочие места, мобильный защитный экран

При применении всех видов электродуговой сварки согласно требований безопасности сварщик использует средства индивидуальной защиты (СИЗ): глаза защищены светофильтром, который подбирают с учетом яркости и спектрального состава оптического излучения (ОИ); маска, спецодежда и перчатки не оставляют открытых участков кожи. Таким образом, при соблюдении сварщиком требований безопасности опасным влиянием ОИ можно пренебречь. Но как зарубежные [1–4], так и собственные результаты исследований [5] доказывают, что уровни интенсивности ультрафиолетового излучения (УФИ) превышают предельно допустимый уровень (ПДУ) на расстоянии нескольких десятков метров от места сварки. Таким образом, под опасное излучение может попасть вспомогательный персонал, который находится рядом и, как правило, не имеющий СИЗ, а также случайные люди, которые оказались (проходили) на небезопасном расстоянии от нестационарных рабочих мест электродуговой сварки.

К наиболее распространенным нестационарным рабочим местам ручной дуговой сварки, на которых выполняется работа под открытым небом и рядом с которыми могут оказаться незащищенные люди, можно отнести: строительные площадки, места аварийных и ремонтных работ, места изготовления металлоконструкции больших габаритных размеров и места использования сварки в бытовых целях. Проблема защиты от светового излучения сварочной дуги также весьма актуальна при выполнении сварочных работ в судостроительных и судостроительных цехах, вагоно-

строительных и вагоноремонтных, а также машиностроительных цехах, в которых одновременно работает большое количество сварщиков, рабочих других профессий и инженерно-технических работников, которым, зачастую, не удается избежать воздействия этого опасного фактора, вследствие чего они рискуют получить заболевания органов зрения.

Таким образом, рассматриваемая проблема всегда была актуальной и до настоящего времени не имела конкретного решения в случае сварки на нестационарных рабочих местах. Поэтому, на основе анализа литературных и собственных данных, а также учитывая многочисленные отзывы рабочих и руководителей сварочных работ, авторы данной статьи пришли к выводу о необходимости создания специальных средств защиты от оптического излучения рабочих различных профессий, находящихся на относительно небольшом расстоянии (до 65 м) [5] от места сварки.

Основными видами сварки в таких местах являются электродуговая сварка покрытыми электродами и механизированная сварка металлическим электродом в защитных газах. Современное сварочное оборудование, которое используется в таких процессах, характеризуется относительно компактными размерами и высокой мобильностью, что дает возможность проводить сварочные работы на неподготовленных для этого площадках (территориях). Непредсказуемые условия сварки в таких случаях не позволяют разработать универсальные меры защиты от УФИ.

Защита временем не может быть использована, так как, согласно с действующим нормативным



Рис. 1. Сварочные кабины

документом [6], облучение открытых участков кожи УФИ не допускается вовсе.

Защита расстоянием усложняется превышением нормативных значений УФИ в радиусе десятков метров, что в условиях нестационарных мест сварки делает невозможным соблюдение безопасного расстояния для вспомогательного персонала и окружения, например, в плотных городских застройках.

Снижение интенсивности УФИ в источнике образования также показывает низкую эффективность, потому что даже при самых оптимальных параметрах сварки (выбор вида сварочных материалов, режима, значения тока и т. д.), при которых наблюдается минимальный уровень УФИ, его действующие значения все равно намного превышают требования, указанные в нормативных документах.

Единственным действенным способом защиты остается снижение интенсивности УФИ на пути распространения, т. е. экранирование.

На стационарных местах сварки используются сварочные кабины (рис. 1), стены которых должны быть окрашены в светлые цвета с добавлением в краску оксида цинка или титановых белил для поглощения УФИ.

Высота кабины составляет 1,8...2,0 м, стены не должны доходить до пола 25...30 см для улучшения проветривания кабин. Использование таких кабин на нестационарных местах сводит на нет быстроту и мобильность проведения разовых сварочных работ. Поскольку перевозка и установка громоздкой кабины или её сбор на месте сварки конструкций занимает много времени, повыша-

ется стоимость работ, особенно, если речь идет об аварийных работах. К тому же, условия сварки могут быть несовместимыми с размерами или расположением сварочной кабины.

В нефтегазовой отрасли при проведении сварочных работ на трубопроводах широко используются сварочные палатки (рис. 2).

У сварочных палаток есть ряд преимуществ: они защищают от неблагоприятных метеорологических условий (дождя, снега, низких температур), устойчивы к порывам ветра в отличие от ширм и ограждений, снижают уровень шума, эффективно экранируют УФИ. Но также сварочные палатки имеют и ряд существенных недостатков:

необходимость обязательного использования вентиляции — при наличии почти замкнутого пространства естественное удаление сварочных аэрозолей при их значительном выделении становится невозможным. Необходимо использовать приточно-вытяжную вентиляцию, которая увеличивает время на подготовку рабочего места, выдвигает дополнительные требования к электрооборудованию и повышает стоимость работ;

возможна нехватка естественного освещения — материал палатки не может быть полностью прозрачным, поскольку создается парниковый эффект, поэтому в светлое время суток палатка должна освещаться искусственным источником света;

отсутствие универсальности — во время прокладки трубопровода палатка охватывает трубу и может перемещаться вдоль нее к следующему месту сварки. Таким образом, необходимость тратить время и ресурсы на сборку-разборку палатки отсутствует. В других условиях сварки такое преимущество превращается в недостаток, что в сочетании с монтажом систем вентиляции и освещения делает использование сварочных палаток на нестационарных рабочих местах невыгодным.

Ширмы или мобильные сварочные экраны лишены всех перечисленных выше недостатков: имеют относительно небольшую массу, удобны при транспортировке, легко устанавливаются в любых местах. Стойки ширм могут быть дополнительно оборудованы роликами для удобного перемещения по ровной твердой поверхности, могут



Рис. 2. Сварочные палатки

иметь раздвижную или шарнирную конструкцию, что позволяет изменять высоту или профиль ширины. В качестве экрана может быть использован полированный алюминий, который эффективно поглощает УФИ, или более дешевый огнестойкий брезент. В последнее время были разработаны поливинилхлоридные (ПВХ) пленки, которые отличаются множеством преимуществ над традиционными материалами экранов.

Цель данной работы – комплексное исследование требований к передвижным устройствам защиты от УФИ и разработка на их базе мобильного защитного экрана (МЗЭ).

Условия сварки на нестационарных рабочих местах отличаются своей непредсказуемостью. Поэтому, при разработке МЗЭ необходимо учитывать ряд факторов:

устойчивость конструкции. Должна учитываться неровность поверхности, на которой располагается МЗЭ, а также твердость этой поверхности. При сварочных работах, которые проводятся на улице, необходимо предусматривать стойкость к порывам ветра;

регулирование по высоте. На стационарных сварочных постах свариваемые детали находятся на рабочих столах, а сварщик работает сидя, что дает возможность рассчитать высоту ограждения и высоту промежутка между полом и нижней кромкой экрана. В условиях нестационарных рабочих мест детали могут находиться на уровне пола (земли) или, наоборот, на определенной высоте. Необходимо предусмотреть такое положение МЗЭ, чтобы обеспечить свободный доступ воздуха снизу экрана для вентилирования и, в то же время, эффективного экранирования от УФИ;

легкий доступ к рабочему месту. В сварочных кабинах доступ к рабочему месту может быть с одной стороны через дверь или брезентовую ширму. При установке МЗЭ необходимо предусмотреть как возможность свободного раздвижения экранов для доступа к сварочным поверхностям с нужной сторо-



Рис. 3. Предупредительный знак безопасности «Осторожно. Неионизирующая радиация» (а) и «Осторожно. Сварка» (б)

ны извне, так и выход из зоны сварки в безопасную сторону после завершения работ;

долговечность и износоустойчивость. Конструкция МЗЭ должна учитывать большое количество циклов сборки-разборки для транспортировки и перемещения, легко очищаться от загрязнений. Экран должен быть огнеупорным и устойчивым к воздействию искр и брызг расплавленного металла;

размещение знаков безопасности. МЗЭ выполняет не только защитную функцию, но также предупреждает о проведении небезопасных работ и наличии опасных факторов. Поэтому рекомендуется размещение предупредительных знаков безопасности согласно ДСТУ ISO 17846:2013 (рис. 3).

Учитывая особенности условий труда при выполнении сварочных работ и, главное, необходимость эффективной защиты от УФИ, в качестве защитного экрана предложено использовать ПВХ пленку Screenflex. Защитная пленка Screenflex имеет свойства светофильтра ультрафиолетового/инфракрасного излучения, который эффективно фильтрует излучения сварочной дуги. Это позволяет использовать материал в качестве защитного экрана в соответствии с EN 1598. Характеристики защитной пленки EN Screenflex приведены в таблице.

Исходя из перечисленных характеристик, можно сделать вывод, что пленка соответствует всем основным требованиям касательно материала защитного экрана, а именно:

Характеристики защитной пленки Screenflex

Параметр (свойства)	Значение параметров	Норматив (стандарт)	Описание
Огнеупорность	-	EN 1598	Стандартная классификация огнеупорных свойств и сопротивления возгорания материала
Светопропускание, %	0,01...13	-	Количество видимого света, проходящего сквозь материал
Звукоизоляция, дБ	>35	DIN 52210	Усредненный уровень звукового давления (частота 0,1...3,2 кГц), что снижается завесой площадью 1,76 м ² и толщиной 5 мм
Термическая проводимость, Вт/(м·К)	0,16	ASTM C177	Чем меньше это значение, тем более изолирующим является материал
Температура использования, °С	-15...50	EN 1876	Температурный диапазон, в котором материал сохраняет свои механические свойства (гибкость)
Поверхностное сопротивление, Ом·см	4·10 ¹³	IEC 60093	Электрическое сопротивление поверхности материала, измеренное под напряжением 500 В
Абсорбция воды, %	-0,2	EN ISO 62	Изменение массы материала после пребывания в особых условиях (выделение)
Плотность, г/см ³	1,2...1,3	ASTM D792	Масса единицы объема

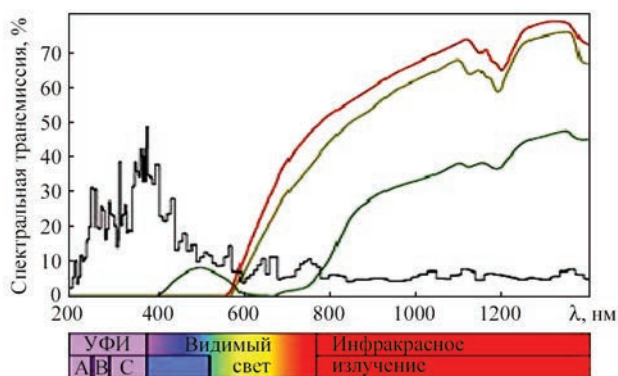


Рис. 4. Зависимость спектральной трансмиссии материала экрана от длины волны

- эффективно защищает от УФИ в соответствии с EN 1598;
- пропускает свет в видимом диапазоне;
- имеет звукоизолирующие свойства;
- имеет плотную, устойчивую к разрывам структуру, что способствует длительному использованию;
- огнеупорная, устойчивая к брызгам расплавленного металла и искр;
- не проводит электрический ток;
- не впитывает влагу и легко очищается.

Необходимо отметить сочетание абсолютной непрозрачности материала экрана для УФИ и светопропускание в видимом диапазоне. Графики зависимости спектральной трансмиссии от длины волны продемонстрированы на рис. 4.

В качестве материала МЗЭ рекомендуется использовать ПВХ пленку красного цвета. Во-первых, красный цвет сигнализирует о возможной опасности. Во-вторых, именно этот материал лучше пропускает свет в видимом диапазоне в его теплом участке, что позволяет безопасно наблюдать за проведением сварочных работ, следить за со-

блюдением требований безопасности и контролировать ход процесса.

Важно также отметить то, что экран почти не задерживает инфракрасное излучение и, таким образом, исключается парниковый эффект, что предоставляет комфортные условия работы.

Учитывая все указанные выше требования и рекомендации, был разработан и изготовлен опытный образец соответствующего МЗЭ (рис. 5).

Экран состоит из двух раздвижных стоек, регулируемых по высоте с помощью втулок и перекладины с крюками, за которые цепляется ПВХ экран, свернутый в рулон на металлическом стержне.

В нижней части стоек расположены четыре крюка, что предоставляет возможность размещения рулона с ПВХ экраном на высоте от 0,1 до 0,4 м для вентиляции в зависимости от особенности места сварки. С помощью втулок стержень рулона надежно закрепляется на крюках, что придает дополнительную жесткость всей конструкции.

Также, при необходимости, имеется возможность крепления разных ножек к стойкам. Так, крепление ножек по типу «стрелка» дает возможность размещать несколько МЗЭ под углом 90° (рис. 6), что обеспечивает плотное ограждение места проведения сварочных работ.

Опытный образец МЗЭ (рис. 7) был изготовлен и испытан в июне 2016 г. на предприятии ООО «Северо-украинский строительный альянс». Сварка металлоконструкций выполнялась на неподготовленных рабочих местах сварочным аппаратом FroniusTransPocket 2500 с использованием электродов Monolith РЦ Е 46 диаметром 4 мм в светлое время суток на открытой местности при умеренном ветре. Конструкция МЗЭ устанавливалась на неровной поверхности непосредственно на грунт.

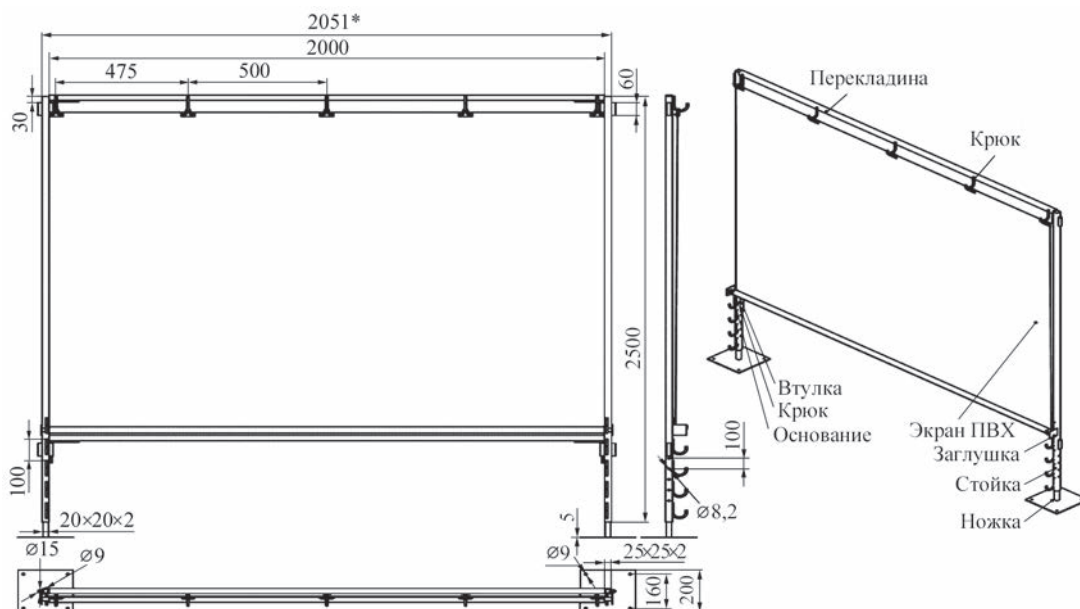


Рис. 5. Сборочный чертеж МЗЭ

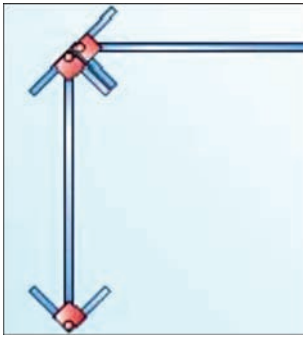


Рис. 6. Пример размещения МЗЭ под углом 90°



Рис. 7. Опытный образец мобильного защитного экрана МЗЭ

Устойчивость МЗЭ обеспечивалась путем вбивания в грунт четырех металлических штырей через отверстия в подставках стоек. На расстоянии 15...20 м от места сварки проводились погрузочно-разгрузочные работы, в зоне прямой видимости также находились бытовка строителей, дорожка для прохода людей и место проведения работ по бетонированию. МЗЭ находился от места сварки на расстоянии 1,5 м таким образом, чтобы перекрыть прямую видимость сварочной дуги из всех мест возможного пребывания работников. В данных условиях проведения работ было достаточно использования одного МЗЭ. Было отмечено, что такое размещение МЗЭ не мешает сварщику, защищает смежных работников от негативного воздействия УФИ, предупреждает о возможной опасности нахождения рядом с местом проведения работ, сохраняет возможность наблюдения за сварочными работами.

В результате испытаний в производственных условиях определены следующие преимущества МЗЭ: компактность, легкость монтажа, удобство

в перемещении, наличие настроек под неровность поверхности, возможность безопасного постороннего наблюдения. К положительным нововведениям можно также отнести расположение на поверхности защитной пленки экрана знаков безопасности.

1. Okuno T., Ojima J., Sayto H. Ultraviolet radiation emitted by CO₂ arc welding // The Annals of Occupational Hygiene. – 2001. – 45, № 7. – P. 597–601.
2. Terry L. Lyon. Knowing the dangers of actinic ultraviolet emissions // AWS Welding Journal. – 2002. – № 12. – P. 28–30.
3. Dixon J., Dixon B. F. Ultraviolet radiation from welding and possible risk of skin and ocular malignancy // The Medical Journal of Australia. – 2004. – 181, № 3. – P. 155–157.
4. Emission of UV radiation during arc welding / D. Schwass et al. // IFA-Information (Doc. 2011). – www.dguv.de/ifa – P. 1–12.
5. Левченко О. Г., Малахов А. Т., Арламов А. Ю. Ультрафиолетовое излучение при ручной дуговой сварке покрытыми электродами // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7. – С. 155–158.
6. ДНАОП 0.03-3.17-88/СН 4557-88. Санитарные нормы ультрафиолетового излучения в производственных помещениях. – Введ. 1988-02-23. – 3 с.

О. Г. Левченко, О. Ю. Арламов

НТУУ «Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115.

E-mail: levchenko.opcb@ukr.net

МОБІЛЬНИЙ ЗАХИСНИЙ ЕКРАН ДЛЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ РОБОЧИХ МІСЦЬ РУЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Наведено результати аналізу засобів захисту працюючих від ультрафіолетового випромінювання, що створюється зварювальною дугою. Показано, що інтенсивність ультрафіолетового випромінювання при ручному дуговому зварюванні покритими електродами і механізованому в захисних газах може багаторазово перевищувати допустимі норми на відстані декількох десятків метрів від місця зварювання. Таким чином, під небезпечне випромінювання може потрапити допоміжний персонал, який знаходиться поруч і, як правило, не має засобів індивідуального захисту, інші робітники, а також випадкові люди, які опинилися (проходили) на небезпечній відстані від нестационарних робочих місць дугового зварювання. З урахуванням отриманих результатів розроблений і виготовлений дослідний зразок мобільного захисного екрану для нестационарних робочих місць зварників. Наведено результати розробки та випробувань запропонованого мобільного захисного екрану. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: дугове зварювання, ультрафіолетове випромінювання, нестационарні робочі місця, мобільний захисний екран

Поступила в редакцію 07.11.2016

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Гончаров И. А. (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 9 ноября 2016 г. докторскую диссертацию на тему «Управление структурой и физико-химическими свойствами

и шлаковых расплавов флюсов для электродуговой сварки и электрошлакового переплава».

Диссертация посвящена изучению основных механизмов управления структурой и физико-химическими свойствами оксидно-фторидных шлаковых расплавов с целью создания флюсов с прогнозируемыми химико-металлургическими и технологическими свойствами для сварки высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей и электрошлакового переплава (ЭШП) в подвижных кристаллизаторах сталей и сплавов различного назначения. Выполнено моделирование термодинамических свойств двойных, тройных и четверных систем на основе фторида кальция, оксидов кремния, алюминия, кальция и магния. Установлено, что наибольшие отрицательные значения энергий Гиббса смешения достигаются в полях первичной кристаллизации термодинамически стабильных химических соединений на основе силикатов, алюминатов и алюмосиликатов магния и кальция. При этом обеспечивается аномальное снижение термодинамической активности оксида кремния в шлаковом расплаве. На основе метода ЭДС разработана методика и выполнены экспериментальные исследования термодинамической активности оксида кремния в расплавах системы $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaF}_2$, изучено влияние на нее дополнительного введения металлов. В целом, это позволило управлять процессами восстановления кремния и формирования силикатных неметаллических включений при сварке и ЭШП.

В работе развиты научные представления о строении шлаковых расплавов при сварке и ЭШП. На основании подхода к шлаковым расплавам как гетерогенным системам предложен механизм управления их свойствами путем формирования в жидком шлаковом расплаве тугоплавких дисперсных фаз. Установлены температурно-концентрационные условия формирования соединения MgOAl_2O_3 с температурой плавления 2135 °С в расплавах шлаковой системы $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-}$

CaF_2 и разработаны методики его количественного определения. Установлены основные закономерности связи между содержанием MgOAl_2O_3 в шлаковых расплавах, их физико-химическими свойствами, химико-металлургическими и технологическими свойствами флюсов при сварке.

Автором разработаны методы управления окислительной способностью оксидно-фторидных шлаковых расплавов. Предложено в качестве критерия оценки химико-металлургических свойств флюса при его разработке использовать показатель термодинамической активности ионов кислорода в шлаковом расплаве. Установлены зависимости между термодинамической активностью ионов кислорода в расплаве, содержанием кислорода и объемной долей неметаллических включений. На основании фундаментальных исследований термодинамики и кинетики пирометаллургических процессов во флюсоплавильных печах разработаны рекомендации по рафинированию шлаковых расплавов от вредных примесей: серы и фосфора. Создан новый класс сварочных агломерированных флюсов, основанный на использовании в шихте плавленых полупродуктов и отличающийся повышенной стойкостью гранул флюса против разрушения и низкой склонностью к сорбированию атмосферной влаги.

Разработан флюс марки АНКС-28 для сварки высокопрочных низколегированных сталей. В диссертации определены пути управления температурным интервалом плавления, вязкостью, электропроводностью и окислительной способностью расплавов шлаковых систем $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2$, $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO-TiO}_2$, $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ на основе формирования в расплаве тугоплавких алюминатов и силикатов магния и кальция. Создано новое поколение флюсов для ЭШП в подвижных кристаллизаторах сталей и сплавов различного назначения: АНФ-37 (жаропрочных сталей и сплавов, содержащих легкоокисляемые элементы), АНФ-38 (полых слитков из легированных сталей с самопроизвольной отделимостью гарнисажа с внутренней поверхности длинномерного слитка), АНФ-39 (легированных сталей со сниженными на 15...20 % затратами электроэнергии на плавку), АНФ-40 (заготовок железнодорожных рельсов со скоростной вытяжкой слитка в машинах непрерывного литья заготовок).



**Институт электросварки им.
Е. О. Патона НАН Украины**

В. П. Елагин (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 7 декабря 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Технология механизированной сварки разнородных сталей в смеси углекислого газа с азотом».

Диссертация посвящена повышению технологических и служебных свойств высокотемпературных сварных соединений разнородных сталей при механизированной сварке в защитных газах.

Исследовано влияние состава защитного газа и режимов сварки на структурную неоднородность в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом и служебные свойства сварных соединений разнородных сталей в состоянии после сварки и после длительного нагрева при высоких температурах (550 °С).

При длительном высокотемпературном нагреве сварных соединений разнородных сталей между ЗТВ перлитной стали и зоной сплавления, даже с высоконикелевым швом, образуются пленочные выделения карбидов, что является причиной охрупчивания металла. Легирование аустенитного металла шва азотом способствует измельчению структуры и образованию нитридных частиц. Структура зоны сплавления такого металла шва при длительном высокотемпературном нагреве устойчива против обезуглероживания, а нитридные частицы и более развитые поверхности мелких зерен способствуют более равномерному распределению карбидов, что повышает механические свойства металла в ЗС.

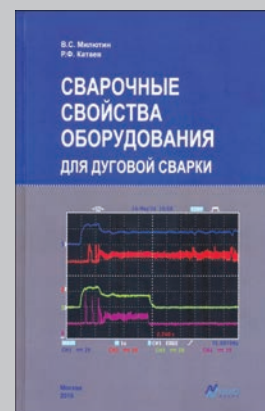
Применение защитной смеси углекислого газа и азота при дуговой сварке разнородных сталей обеспечивает уменьшение ширины мартенситного слоя в зоне сплавления аустенитного шва с перлитной сталью. Такой эффект объясняется не только аустенизирующим влиянием азота на структуру металла, а и улучшением гидродинамики потоков в пристеночной зоне сварочной ванны вследствие повышения жидкотекучести металла. Оптимальное легирование аустенитного шва азотом в пределах 0,12...0,18 % при применении в качестве защитного газа смесей $\text{CO}_2 + (2...5)\% \text{N}_2$ обеспечивает отсутствие пор при сварке во всех пространственных положениях и лучшие служебные свойства сварных соединений. Сварка в защитном газе состава $\text{CO}_2 + (2...5)\% \text{N}_2$ обеспечивает стойкость против образования горячих трещин как стабильноаустенитного, так и аустенитно-ферритного металла шва, а также против холодных трещин сварных соединений стали 15Х5М.

Разработана технология механизированной сварки в смеси углекислого газа с азотом, которая обеспечивает повышение служебных свойств сварных соединений, в частности, длительную прочность и стойкость зоны сплавления с перлитной сталью против хрупкого разрушения. Новизна технологии защищена патентом. Разработана горелка для дуговой сварки, которая позволяет осуществлять контролируемую инъекцию воздуха в пределах 1...15 % в газовый канал горелки для получения смеси защитного газа состава $\text{CO}_2 + (2...5)\% \text{N}_2 + (0,5...1,0)\% \text{O}_2$. Конструкция горелки защищена патентами. Технология внедрена при изготовлении и ремонте нефтеперерабатывающего и химического оборудования.

Сварочные свойства оборудования для дуговой сварки / В. С. Милютин, Р. Ф. Катаев. – Москва: ООО «НАКС Медиа», 2016. – 464 с.

В книге дано определение и выполнена классификация сварочных свойств источников питания и другого оборудования для дуговой сварки. Разработаны методики объективной экспериментальной оценки непосредственных критериев для каждого свойства. Отобраны косвенные критерии для оценки сварочных свойств по паспортным техническим характеристикам оборудования. Описаны приемы совершенствования сварочных свойств с примерами как конвенционального, так и современного оборудования с микропроцессорным управлением. Охарактеризована исследовательская аппаратура, в том числе для автоматизации испытаний.

Книга адресована специалистам сварочного производства — производителям и пользователям оборудования для дуговой сварки, и поможет им при проектировании и мотивированном выборе источников питания, аппаратов для механизированной или автоматической сварки и комплектных установок для специальных методов сварки. Благодаря вводным подразделам к каждому разделу может быть полезна и другим специалистам, работающим в области производства, сертификации и аттестации сварочного оборудования.



По вопросу приобретения книги следует обращаться по адресу: svarka@naks.ru

К 100-летию СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ С. М. ГУРЕВИЧА



14 февраля 2017 г. исполняется 100 лет со дня рождения видного ученого в области металлургии и технологии сварки титана и тугоплавких металлов доктора технических наук, профессора Самуила Марковича Гуревича.

В 1940 г. после окончания Киевского промышленного института (ныне НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского») С. М. Гуревич был принят академиком Е. О. Патonom на работу в Институт электросварки Академии наук УССР на должность младшего научного сотрудника и принимал участие в разработке и внедрении в промышленность созданного Институтom способа автоматической сварки под флюсом.

В годы Великой Отечественной войны С. М. Гуревич находился в рядах Советской Армии.

В 1946 г. после демобилизации вернулся на работу в Институт и с этого времени до самой своей кончины в 1983 г. его жизнь была связана с Институтom электросварки им. Е. О. Патона. В период с 1946 по 1951 гг. С. М. Гуревич плодотворно работал в области сварки легированных сталей повышенной прочности.

С 1954 г. по решению директора Института академика Б. Е. Патона С. М. Гуревич начинает заниматься новым научным направлением – сваркой титана. Он возглавил группу сотрудников и с присущим ему энтузиазмом приступил к работе по изучению свариваемости и созданию технологий сварки титана, который в дальнейшем стал одним из основных конструкционных материалов изделий аэрокосмической и других отраслей техники.

С. М. Гуревич теоретически обосновал и разработал один из наиболее прогрессивных методов — сварку титана под флюсом. Во многом благодаря его работам в области металлургии, металловедения и технологии сварки титановых сплавов расширилось их применение для изготовления ответственных конструкций разного назначения. Под его руководством были разработаны способы электрошлаковой сварки и электрошлакового переплава титана, аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса, способ сварки с присадочной титановой порошковой проволокой и другие эффективные технологии. На осно-

ве проведенных широких исследований по сварке титана и его сплавов С. М. Гуревич в 1963 г. успешно защитил докторскую диссертацию, а в 1965 г. возглавил отдел физико-металлургических процессов сварки активных и тугоплавких металлов.

Профессор С. М. Гуревич является также признанным специалистом в области сварки химически активных тугоплавких металлов — ниобия, молибдена и др. Под его руководством были проведены глубокие исследования и разработаны научные основы и технологии сварки этих материалов методом ЭЛС и дуговой сварки в контролируемой атмосфере. При его активном участии было создано уникальное оборудование и контрольно-измерительная аппаратура для изготовления сварных конструкций из тугоплавких металлов.

Значителен вклад С. М. Гуревича в развитие сварки меди, а также становления в ИЭС электронно-лучевых технологий и диффузионной сварки. Его труд отмечен правительственными наградами, а за разработку и внедрение в производство высокоэффективных методов сварки титановых сплавов он был удостоен Премии Совета Министров СССР.

С. М. Гуревич уделял большое внимание воспитанию научных кадров. Он подготовил 20 кандидатов и докторов наук. Им опубликовано более 600 научных работ, в том числе ряд монографий. Особо следует отметить монографии, посвященные сварке титана и тугоплавких металлов, а также уникальный справочник по сварке цветных металлов. Он является автором более 100 изобретений.

Самуил Маркович отличался большими организационными способностями, умением создать творческий коллектив и найти индивидуальный подход к каждому работнику. Он не боялся браться за новое дело и отличался научным оптимизмом. Ему была присуща колоссальная ответственность за порученное дело, и любые дела он доводил до конца. Его отличали огромное трудолюбие, умение четко и ясно формулировать задачу и анализировать полученные результаты.

Особо следует отметить замечательные черты характера Самуила Марковича — порядочность и интеллигентность, благородство и скромность, доброжелательность и отзывчивость.

Научное наследие С. М. Гуревича остается актуальным и в настоящее время.

Семинар «Сварочные материалы»

24 января 2017 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) состоялся семинар на тему «Сварочные материалы», посвященный 90-летию со дня рождения академика Игоря Константиновича Походни (1927–2015). В семинаре приняли участие ученые и специалисты ИЭС, ряда предприятий-производителей сварочных материалов (ООО «Сумы-Электрод», ПАО «ПлазмаТек», ООО «ВитаПолис», ООО «ВЕЛМА», «ТМ.ВЕЛТЕК», ОЗСМ им. Е. О. Патона), преподаватели НТУУ «Киевский политехнический институт» им. И. Сикорского», директора ряда Институтов отделения физико-технических проблем материаловедения НАН Украины. Число участников составило свыше 80 человек.

С вступительной речью к присутствующим обратился заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона академик Л. М. Лобанов. Он рассказал о большом вкладе известного ученого и крупного организатора науки И. К. Походни в развитие теоретических основ металлургии и технологии металлов, материаловедения и электросварки. С его именем связаны фундаментальные исследования физико-химических процессов дуговой сварки, новых высокопроизводительных процессов изготовления материалов, создание научной школы в области металлургии и технологии дуговой сварки, разработки наукоемких технологий и прогрессивных сварочных материалов, становлении их производства. Им подготовлены свыше 50 докторов и кандидатов технических наук, опубликованы свыше 900 статей, десятки монографий. И. К. Походня работал вице-президентом, главным ученым секретарем НАН Украины, а затем 27 лет руководил отделением физико-технических проблем материаловедения в академии.

О творческом пути И. К. Походни рассказал его ученик, заведующий отделом ИЭС им. Е. О. Патона В. В. Головки. Он и выступившие вслед за ним И. Р. Явдоцин и А. С. Котельчук рассказали о творческой атмосфере работы отдела ИЭС, созданного и руководимого И. К. Походней, способствующей разработке низкотоксичных сварочных материалов и технологии их промышленного производства, созданию мощных специализированных цехов по производству покрытых электродов, реконструированию ряда существующих электродных предприятий. Благодаря объединению усилий ученых-сварщиков и металлургов, проектировщиков и производственников удалось за короткое время решить большую народнохозяйственную задачу — обеспечить выпуск отечественных высокопроизводительных низкотоксичных электродов. Проведенные под руководством И. К. Походни исследования дали возможность создать ряд порошковых проволок различного назначения, предложить оригинальные конструкции их оболочки. Это стало крупным шагом в технике и технологии механизированной сварки на монтаже и в полевых условиях.

Теме «Состояние и тенденции развития рынка сбыта сварочных материалов» был посвящен доклад С. В. Пустовойта (ИЭС). Важным выводом этого сообщения является то, что усилиями ученых Украины и специалистов предприятий-производителей сварочных материалов удалось в значительной мере предотвратить экспансию зарубежных поставщиков покрытых электродов и порошковых проволок на рынок Украины. Более того, в последние годы наблюдается тенденция увеличения экспорта сварочных материалов из Украины.



Выступление коммерческого директора корпорации «ПлазмаТек» Ю. Н. Омельчука на семинаре



У стенда ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона (зам. директора ИЭС, акад. И. В. Кривцун, д-р техн. наук В. Н. Шлепаков и директор завода П. А. Косенко)

Н. А. Проценко (ИЭС) рассказала об алгоритме и необходимых действиях компаний Украины по документальному оформлению и поддержке системы заводского производственного контроля с целью обеспечения соответствия выпускаемой на рынок продукции Международным и Европейским стандартам, регламентирующим рабочие характеристики материалов. В настоящее время четыре украинских производителя сварочных материалов получили право маркировки знаком СЕ своей продукции: ООО «ВитаПолис», г. Боярка, Киевская обл.; ООО ПП «Метиз», г. Бровары, Киевская обл., корпорация «ПлазмаТек», г. Винница, ООО «Сумы-Электрод», г. Сумы.

Представитель корпорации «ПлазмаТек» Ю. Н. Омельчук в своем выступлении остановился на организации сбыта продукции. Сегодня корпорация занимает первое место на постсоветском пространстве по объемам выпуска и продаж электродов. Объем производства в 2016 г. достиг 30 тыс. т. Основой продукции (около 80 %) являются электроды на базе марки АНО-36 с высокими сварочно-технологическими свойствами.

Они успешно конкурируют с электродами корпорации ЭСАБ (Швеция) и турецких производителей. Корпорацией «ПлазмаТек» созданы логистические центры: в России (2), Беларуси (2) и Казахстане (1). Планируется создание таких центров в Румынии, Молдове, Польше и Узбекистане. В планах корпорации увеличение объема производства омедненной сварочной проволоки, освоение производства нержавеющей сварочных проволок.

В. Н. Липодаев (ИЭС) рассказал об информационной поддержке специалистов, работающих в области разработки, освоения производства и потребления сварочных материалов. Отмечена ведущая роль журнала «Автоматическая сварка» в этой части. К семинару был выпущен и роздан всем участникам январский выпуск журнала, полностью посвященный теме «Сварочные материа-



У стенда ООО «Сумы-Электрод» (зам директора ИЭС, акад. Л. М. Лобанов и директор завода П. Н. Погребной)

лы». Многократно журнал выпускался как сборник трудов представительных международных конференций, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона. Эффективна также деятельность ассоциации «Электрод» в регулярном проведении конференций по сварочным материалам, выпуску соответствующих сборников трудов.

На семинаре выступили ученики И. К. Походни, ставшие руководителями предприятий: ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» — директор А. А. Голякевич, ООО «ВЕЛМА» — директор М. Ф. Гнатенко. Они выразили слова глубокой благодарности за участие И. К. Походни в формировании их как специалистов, способных эффективно применить на практике научный опыт, приобретенный в ИЭС.

С воспоминаниями выступили также директора институтов НАН Украины. Они отметили значительный вклад И. К. Походни в научно-организационную деятельность отделения физико-технических проблем материаловедения, демонстрирующего эффективную деятельность в системе НАН Украины. В продолжение семинара его участники были приглашены на блиц выставку производителей сварочных материалов, развернутую в демонстрационном зале ИЭС. На ней были представлены стенды корпорации «ПлазмаТек», ООО «Сумы-Электрод», ООО «ТМ. ВЕЛТЕК», ГП «ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона», ООО «ВитаПолис», ООО «СтилВорк», вызвавшие живой интерес у многих специалистов.

На деловом ужине, состоявшемся в заключение, участники семинара смогли в неформальной обстановке обсудить различные аспекты такого непростого производства, как выпуск сварочных материалов, и еще раз вспомнить как обращение и призыв к эффективной работе высказывание Игоря Константиновича: «Что-то вы, молодые люди, расслабились ...».

В. Н. Липодаев,
А. Т. Зельниченко

Компания Fronius добавляет функциональность CMT в сварочную систему TPS/i

В своей новой сварочной системе TPS/i CMT лидер в области технологий компания Fronius объединяет интеллектуальные функции современной платформы источников питания и преимущества самого стабильного процесса сварки. Сварочный процесс Cold Metal Transfer (CMT) обеспечивает блестящие результаты при сварке различных металлов, а инновационная сварочная платформа TPS/i MIG/MAG впечатляет широким набором настроек и возможностей применения. С новой сварочной системой пользователи смогут оценить значительно возросшую эффективность и непревзойденное качество.

Главным элементом системы TPS/i CMT является новая усовершенствованная сварочная горелка PullMig. Она легче, прочнее и надежнее, чем предыдущая модель. И, что немаловажно, она лучше охлаждается. Кроме того, новая сварочная горелка обеспечивает более стабильную дугу и имеет увеличенный ресурс расходных элементов. Инженеры Fronius оптимизировали подачу проволоки за счет применения динамичного и точного сервомотора. Подача проволоки в новой сварочной горелке PullMig стала еще точнее, что дает пользователям возможность без каких-либо ограничений осуществлять мгновенный контроль сварочной дуги с помощью TPS/i — самой передовой платформы Fronius для сварки MIG/MAG. В устройстве реализованы технологии, упрощающие его использование во всех аспектах. Например, пользователям больше не нужно открывать держатель, чтобы заправить новую проволоку. Отнимающая много времени синхронизация двигателей устройств подачи проволоки также больше



В новой сварочной системе TPS/i CMT компания Fronius объединила интеллектуальные функции современной платформы источников питания с преимуществами самого стабильного процесса сварки

не требуется, поскольку теперь она выполняется сварочной системой автоматически. Более того, компания Fronius еще больше оптимизировала все изнашивающиеся детали, что значительно сокращает расходы и упрощает рабочие процедуры.

Тепловое воздействие в процессе сварки CMT значительно ниже, чем в других процессах MIG/MAG. Благодаря этому достигаются переход материала без образования брызг и оптимальные результаты сварки. Особые преимущества процесс обеспечивает при сварке различных металлов, например, стали и алюминия, а также тонких листов. В сочетании с интеллектуальной сварочной системой TPS/i процесс CMT еще больше расширяет возможности применения системы. Многочисленные настройки позволяют точно регулировать тепловое воздействие во время сварки, а также оптимизировать перекрытие зазоров и форму проплавления. Сочетание различных настроек обеспечивает широкие возможности применения с использованием универсальных и комбинированных характеристик, хранящихся в памяти источника питания. Это означает, что теперь в большинстве случаев пользовательские характеристики не нужны. Кроме того, пользователю значительно проще выбрать подходящую сварочную программу.



Главным элементом системы TPS/i CMT является новая усовершенствованная сварочная горелка PullMig. Она легче, прочнее и надежнее, чем предыдущая модель. И, что немаловажно, она лучше охлаждается.

Расширенный диапазон настроек особенно понравится пользователям, которым регулярно приходится сваривать различные материалы, например, при ремонтных работах. Система TPS/i CMT разработана для сварки всех типов металлов и способна сваривать листы толщиной от 0,5 до 6 мм. Сварочная система также предназначена для сварки мелких партий деталей различных форм, когда роботизированную сварку использовать нерентабельно.

Существующие сварочные системы TPS/i с установленными функциональными пакетами Standard и Pulse можно легко модернизировать для реализации процесса CMT.



Процесс CMT можно легко активировать благодаря интуитивно понятному управлению системы TPS/i

Fronius International — австрийское предприятие с главным офисом в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Заттледте. Предприятие специализируется на системах для заряда батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3385 сотрудников. Доля экспорта составляет 93 %, что достигается благодаря работе 21 дочерней компании, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах мира. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 928 активным патентам, Fronius является лидером в области технологий на мировом рынке.



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

ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона — итоги года и перспективы

На сегодняшний день ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона (далее Завод) является крупнейшим предприятием по выпуску сварочного оборудования на территории стран СНГ: ежегодно выпускается более 40 тыс. ед. сварочного оборудования и 3 тыс. т электродов, проводятся семинары и практикумы для дилеров и дистрибьюторов. Кроме того, Завод остается единственной производственной базой для Института электросварки им. Е. О. Патона, на которой воплощаются все новейшие разработки и проекты.

ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона хорошо известен в Украине и странах СНГ как надежный поставщик сварочного оборудования, что позволяет ему конкурировать на мировом рынке с китайскими производителями по соотношению «цена-качество».

Завод осуществляет поставки сварочного оборудования в Чехию, Польшу, Сербию, Хорватию, Румынию, Казахстан, Грузию, Молдову, Латвию, Литву, Эстонию, Южную Корею, Новую Гвинею и др. страны, постоянно наращивая объемы поставок:

- в Грузии на протяжении двух лет активно действует дистрибьюторская сеть по продаже сварочных аппаратов и электродов марки «ПАТОН», налажена работа сервисного центра; ведутся переговоры о поставках продукции в Армению и Азербайджан;

- с июня 2016 г. осуществляются поставки сварочного оборудования в Южную Корею для дистрибьюторской компании, которая планирует вывести оборудование марки «ПАТОН» на рынки Кореи и других стран Азиатско-Тихоокеанского региона (Япония, Китай, Индонезия и др.). Сварочные инверторы, инверторы для ручной аргонодуговой сварки и инверторные полуавтоматы марки «ПАТОН» составляют достойную конкуренцию корейским производителям, не уступая по техническим характеристикам и соотношению «цена-качество».

- оборудование марки «ПАТОН» сертифицировано в соответствии с европейскими стандартами и уже подписаны контракты на его поставку дистрибьюторским компаниям стран Европы, включая Польшу, Чехию, Литву, Латвию, Болгарию, Молдову и другие страны, которые ранее сотрудничали только с такими мировыми брендами как Lincoln, Fronius и ESAB.

В 2016 г. Завод был принят в члены Европейской бизнес-ассоциации и развивает производственную сферу Украины, вдохновляясь европейскими ценностями и учитывая возможность использования накопленного опыта на благо индустрии сварочного производства, общества и экономики страны в целом.

В начале октября 2016 г. Завод выполнил проект для ГП «Укроборонсервис» по созданию автоматической системы координирования миномета. Инженерами Завода совместно со специалистами заказчика в рекордно короткие сроки (1 месяц) была сконструирована плита и разработана система для ее сворачивания и разворачивания. Проект комплекса, позволяющий осуществлять наводку миномета на цель автоматически, был представлен на XIII Международной специализированной выставке «Оружие и безопасность — 2016» в Международном выставочном центре в г. Киеве.

Для Завода сотрудничество с ГП «Укроборонсервис» — не только приоритет национального масштаба, но и честь оказать профессиональную помощь при решении вопросов обновления боевой и специальной техники для Вооруженных Сил Украины.

Завод развивает дилерскую сеть, не забывая вместе с тем и про собственные фирменные магазины. На сегодняшний день в Украине работают четыре фирменных магазина продукции марки «ПАТОН»: два магазина в Киеве, по одному в Одессе и Днепре.

Во всех фирменных магазинах клиенты могут ознакомиться с полным ассортиментом серийного сварочного оборудования и электродов, а также получить квалифицированную консультацию по выбору сварочного аппарата, расходных материалов и аксессуаров.

Анализируя рынок сварочного оборудования в Украине, а именно, сварочных аппаратов инверторного типа, необходимо отметить устойчивую тенденцию роста спроса и объемов отечественного производства. Годовой оборот реализации сварочных инверторов марки «ПАТОН» составляет почти 35 тыс. ед. Импортная составляющая рынка инверторов в Украине, к сожалению, растет и

в 2016 г. составила 80 % (в основном — частные торговые марки, ввозимые из Китая), остальные — 20 % производятся украинскими предприятиями. Завод является бесспорным лидером отечественного производства и имеет в нем долю не менее 85 %.

Завод серийно производит сварочное оборудование следующих типов:

- инверторные выпрямители для ручной дуговой сварки на токи от 150 до 315 А трех серий: mini, ECO и Professional;
- инверторы для ручной аргонодуговой сварки на токи 200 А двух серий: Standard и Professional;
- полуавтоматы инверторные для полуавтоматической сварки в среде защитных газов на постоянном токе и аргонодуговой сварки на токи от 150 до 250 А двух серий: Standard и Professional.

Линейка сварочных инверторов торговой марки «ПАТОН» полностью удовлетворяет потребностям как опытных сварщиков промышленных предприятий, так и начинающих, использующих сварку для бытовых нужд. Кроме того, в начале января 2017 г. завершена разработка опытных образцов независимых блоков подачи проволоки БПИ-5 и БПИ-15/4 для линейки сварочных инверторов серии Professional. Данная разработка позволяет сварщикам полностью раскрыть потенциал, заложенный в эту линейку аппаратов:

- для режима ручной дуговой сварки (РДС «ММА») все поставляется в комплекте;
- для аргонодуговой сварки (АРГ «TIG») достаточно купить стандартную аргонодуговую горелку;
- для режима полуавтоматической сварки (ПА «MIG/MAG») на постоянном токе в среде защитных газов источник необходимо доукомплектовать внешним блоком подачи проволоки.

В последнем случае, при достаточно большом выборе блоков подачи, у пользователей возникали определенные сложности в адаптации, которые исключены при использовании блоков подачи производства «ПАТОН». Независимые блоки подачи проволоки марки «ПАТОН» представлены двумя моделями: БПИ-5 — автономный блок подачи проволоки с двухроликковым механизмом для катушки массой 5 кг, БПИ-15/4 — автономный блок подачи проволоки с четырехроликковым механизмом для катушки массой 15 кг.

Диапазон моделей независимых блоков подачи проволоки выбран оптимально с учетом особенностей работы с различными сварочными проволоками: БПИ-5 максимально подходит для сварочной проволоки марки Св-08Г2С и ее аналогов, которая используется для сварки низкоуглеродистых сталей, а БПИ-15/4 — для сварки алюминия и особо ответственных конструкций из различных сталей.

Завод завершает разработку опытного образца современной установки для микроплазменного напыления порошковых материалов на поверхность изделий, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования износостойкости и коррозионной стойкости, а также для восстановления изношенных поверхностей и нанесения специальных покрытий. На данный момент изготовлены два основных силовых блока: первый источник поджига дежурной дуги, второй — источник основной микроплазменной дуги.

Испытания разработанных силовых блоков с использованием блока управления от предыдущего поколения установок показали отличные результаты, что позволяет говорить об одном из самых широких диапазонов работы в своей области. Установка МСТ-50 использует номинальное напряжение питания 220 В и будет состоять из следующих основных узлов: источник с блоком управления и датчиками, порошковый дозатор (готовый узел), плазмотрон (готовый узел), блок охлаждения плазмотрона (стандартный узел).

Технология микроплазменного напыления используется для нанесения покрытий из порошка на детали и изделия с целью проведения ремонтных работ и восстановления изношенных поверхностей, а также для различных деталей в электротехнической промышленности, приборостроении, моторостроении, медицине и других отраслях.

Отличительной характеристикой МСТ-50 является весьма малый размер пятна напыления — менее 3 мм.

В 2016 г. Завод провел ряд мероприятий по улучшению качества выпускаемых электродов, а именно:

- модификацию рецептуры, применяемой при производстве основных марок электродов в сторону улучшения сварочно-технологических свойств и потребительских характеристик;

- внедрение передовых инновационных разработок (применение комплексного ферросплавного модификатора поставки одного из лучших мировых производителей);
- диверсификацию поставок и расширение географии поставщиков с применением новых сырьевых компонентов с привлечением зарубежных поставщиков (целлюлоза из Швейцарии, калий-натриевая глыба из Германии, слюда из Индии и т. д.);
- ужесточение контроля качества и входного контроля поступающей сварочной проволоки с введением в эксплуатацию нового лабораторного оборудования фирмы «СПЕКТРО» (Spectro Analytical Instruments GmbH), а также ряда приборов и оборудования для оценки физико-механических свойств металла шва и наплавленного металла;
- введение нового дизайна упаковки для покрытых электродов ТМ «ЭЛИТ» и улучшение качества упаковочных материалов с применением трехслойной упаковки;
- введение новинки, не применяемой ранее производителями электродов, а именно гофра-ящика типа «чемодан» на 12 кг электродов диаметром 3 мм и массой 1 кг. Количество пачек электродов в гофра-ящике — 12 шт.

Благодаря выше перечисленным инновациям, технологам Завода удалось улучшить качественные характеристики электродов марок АНО-21 и АНО-36, не выходя за нормативы ГОСТ 9466-75, и запустить их в производство под новой торговой маркой «ЭЛИТ». В связи с этим электроды разделены на три серии:

Серия «ЭЛИТ»:

Элит АНО-36 (рутил-целлюлозные);
 Элит АНО-21 (рутил-целлюлозные);
 Элит МД6013 (рутиловые).

Серия «КЛАССИЧЕСКАЯ»:

АНО-36 (рутил-целлюлозные);
 АНО-21 (рутил-целлюлозные);
 АНО-4 (рутиловые);
 МР-3 (рутиловые);
 УОНИ-13/55 (основные).

Серия «СПЕЦЭЛЕКТРОДЫ»:

Т-590 – для наплавки;
 ЦЛ-11 – для сварки нержавеющей стали;
 ЦЧ-4 – для сварки чугуна.

С марта 2017 г. Завод запускает участок по производству корпусов и других металлических деталей как для собственных нужд, так и для сторонних потребителей. Участок укомплектован современным немецким оборудованием Trumpf: координатно-пробивным прессом с ЧПУ, гидравлическим кромкогибочным прессом и покрасочной линией.

Внедрение участка по производству корпусов позволит значительно сократить временные затраты на производство единицы сварочного оборудования, а также стать одним из немногих предприятий в Украине, на площадях которого есть собственный участок по изготовлению корпусного оборудования.

Завод также воспринимается большинством стран ближнего и дальнего зарубежья как «альма-матер» сварочных технологий и оборудования, сохраняющий уникальный кадрово-профессиональный состав конструкторов, инженеров и технологов. Коллектив Завода насчитывает 300 специалистов, из которых более 50 — технологи и конструкторы. Ежемесячно на Заводе проходят стажировку студенты Национального технического университета Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», приобретая знания по сварке у ведущих специалистов Завода. Это способствует передаче научного и производственного опыта молодежи и подъему технического потенциала нашей страны.

Анат. Вл. Степахно,
 Антон Вл. Степахно

Подписка на журнал «Автоматическая сварка» www.patonpublishinghouse.com/ru/journals/as

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств: Каталог видань України, «Прессцентр», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



Подписка на журнал «The Paton Welding Journal» www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
750 грн.	1500 грн.	5400 руб.	10800 руб.	174 дол. США	348 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Журнал «Автоматическая сварка» в полном объеме переиздается на английском языке под названием «The Paton Welding Journal» и распространяется по редакционной подписке (тел./факс: 38044 200-82-77, 200-54-84, E-mail: journal@paton.kiev.ua).



Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.

В 2017 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2015 гг. в формате *.pdf.

Реклама в журналах «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- ♦ Первая страница обложки, 190×190 мм
- ♦ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
- ♦ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
- ♦ Вклейка А4, 200×290 мм
- ♦ Разворот А3, 400×290 мм
- ♦ А5, 165×130 мм

Стоимость рекламы

- ♦ Цена договорная
- ♦ Предусмотрена система скидок
- ♦ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- ♦ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- ♦ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 02.02.2017. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,02. Усл.-отт. 10,11. Уч.-изд. л. 10,43.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.