

Производственно-технический журнал

СВАРЩИК

№ **3** 2017

В РОССИИ

технологии — производство — ремонт

TECHNOLOGY FOR THE WELDER'S WORLD



Мощная,
надёжная и
функциональная

Новая серия **ABIMIG® WT**

ООО «АБИКОР БИНЦЕЛЬ
Сварочная Техника»
129343, г. Москва, ул. Уржумская, д. 4
Тел.: (495) 221-84-81, 221-84-82,
факс: (495) 510-64-70
E-mail: binzel-abicor@yandex.ru
www.binzel-abicor.ru

ABICOR
BINZEL®



www.binzel-abicor.com

3 (67) 2017

Журнал выходит 6 раз в год.

Издается с мая 2006 г.

Подписной индекс **20994**
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103** в каталоге
российской прессы «Почта России» —
персональная подписка

Производственно-технический журнал

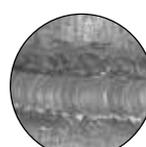
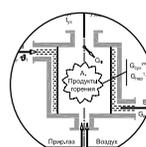
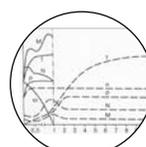
СВАРЩИК

№ 3 2017

В РОССИИ

СОДЕРЖАНИЕ

Новости техники и технологий	4
Технологии и материалы	
Влияние высокотемпературного нагрева на механические свойства и структуру металла ЗТВ сталей S355J2 и S460M. <i>В.Д. Позняков, А.В. Завдоев, С.Л. Жданов</i>	6
Технологии и оборудование	
Эффективность многокамерного детонационного устройства для нанесения покрытий. <i>Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко, И.М. Дуда</i>	11
Технологии сварки трением	
Сварка металлов и сплавов трением. Особенности образования соединения при конвенционном и инерционном процессах. <i>Г.И. Лашенко</i>	16
Производственный опыт	
КПД газовых водонагревателей. <i>Е.П. Шелепов</i>	22
Подготовка кадров	
Качество сварных швов при ручной дуговой сварке в зависимости от квалификации сварщиков. <i>В.О. Муктепавел</i>	28
Выставки и конференции	
XVIII Международная выставка «Сварка/Welding 2017»: актуальные вопросы сварочного производства	30
Международная конференция «Материалы и технологии для Арктики»	32
Страницы истории	
Мосты Патона. <i>А.А. Мазур, В.И. Снежко</i>	33
Создание электродуговой сварки и организация сварочного производства. <i>Г.И. Ширшова</i>	36



Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-24185 от 25.04.2006, выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

Издатель ООО «Центр трансфера технологий Института электросварки им. Е. О. Патона»,
ООО «Специальные сварочные технологии»

Тел. моб. +7 903 795 18 49

E-mail ctt94@mail.ru

Главный редактор В. Д. Позняков

Зам. главного редактора В. Г. Абрамишвили

Редакторы Р. С. Сухомуд
О. А. Трофимец

Верстка и дизайн А. В. Рябов

За достоверность информации и содержание рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели. Мнение авторов статей не всегда совпадает с позицией редакции.

Рукописи не рецензируются и не возвращаются. Редакция оставляет за собой право редактировать и сокращать статьи. Переписка с читателями — только на страницах журнала.

При использовании материалов в любой форме ссылка на «Сварщик в России» обязательна.

Подписано в печать 14.07.2017. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура PetersburgC. Отпечатано в ЗАО «ТДДС-Столица-8». Заказ № П000007031 от 14.07.2017. Тираж 1000 экз.

Издание выходит при содействии производственно-технического журнала «Сварщик»

Учредители Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ,
ООО «Технопарк ИЭС им. Е.О. Патона»

Издатель НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» НАНУ

Главный редактор В. Д. Позняков

Зам. главного редактора В. Г. Абрамишвили

Редакционная коллегия В. А. Белинский, Ю. К. Бондаренко, А. В. Вавилов, Ю. В. Демченко, В. М. Илюшенко, Г. И. Лашенко, О. Г. Левченко, В. М. Литвинов, Л. М. Лобанов, А. А. Мазур, В.И. Панов, П. П. Проценко, С. В. Пустовойт, И. А. Рябцев, А. А. Сливинский

Адрес редакции 03150, Киев, а/я 337

Телефон +380 44 200 53 61, 200 80 18

Тел./факс +380 44 200 80 14

E-mail welder.kiev@gmail.com
trofimits.welder@gmail.com

URL <http://www.welder.stc-paton.com>

Подписка-2017

Подписной индекс **20994**
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103**
в каталоге российской прессы
«Почта России» — персональная подписка

News of technique and technologies 4

Technologies and materials

The effect of high temperature heating on mechanical properties and structure of the metal of ZTV (TZI) of S355J2 and S460M steels.

V.D. Poznyakov, A.V. Zavdoveev, S.L. Zhdanov. 6

Technologies and equipment

Effectiveness of the multi-chamber detonation device for the coating.

Yu.N. Tyurin, O.V. Kolisnichenko, I.M. Duda 11

Technologies of friction welding

Welding of metals and alloys by friction. Features of the formation of welded joint at conventional and inertial processes.

G.I. Lashenko 16

Production experience

Coefficient of efficiency (KPD) of the gas water heaters.

E.P. Shelepov 22

Training of personnel

Quality of welded joints in manual arc welding in dependence from the qualification of welders.

V.O. Muktepavel 28

Exhibitions and conferences

XVIII International exhibition «Svarka / Welding 2017»:

topical issues of the welding production. 30

International conference

«Materials and technologies for the Arctic» 32

Page of history

Paton Bridges.

A.A. Mazur, V.I. Snezhko 33

Creation of electric arc welding and organization of welding production.

G.I. Shirshova 36

Влияние высокотемпературного нагрева на механические свойства и структуру металла ЗТВ сталей S355J2 и S460M.

В. Д. Позняков, А. В. Завдоев, С. Л. Жданов

Исследовано влияние высокотемпературного изотермического нагрева на механические свойства листового проката и металла ЗТВ микролегированных сталей S355J2 и S460M. Показано, что механические свойства данных сталей, имеющих близкий химический состав по основным легирующим элементам, стабильны вплоть до температур нагрева 600 °С, однако начинают изменяться при дальнейшем увеличении температуры нагрева. Отличиями в содержании микролегирующих элементов и состоянием поставки и объясняются изменения механических свойств сталей. Показано, что в отличие от стали S460M, сталь S355J2 термически более стабильна и сохраняет показатели статической прочности и пластичности на уровне проката в состоянии поставки. Прочность стали S460M достигается путем формирования мелкодисперсной структуры, а высокие механические свойства у стали S355J2 достигаются за счет микролегирования.

Эффективность многокамерного детонационного устройства для нанесения покрытий.

Ю. Н. Тюрин, О. В. Колисниченко, И. М. Дуда

Разработано бесклапанное многокамерное детонационное устройство (МКДУ) для газотермического напыления покрытий, работающее с частотой 20 Гц, что повысило эффективность технологии нанесения покрытий. МКДУ обеспечивает коэффициент использования материалов 80–90% для металлокерамических и 50–60% — керамических порошков. Специальная геометрия форкамеры в МКДУ позволила сократить участок перехода горения в детонацию. Использование второй камеры привело к увеличению амплитуды ударной волны в стволе МКДУ и формированию второго ударного фронта в продуктах сгорания, что увеличило их скорость на 35%. Скорость напыляемого порошка Al_2O_3 дисперсностью 5,6–22,5 мкм достигает 1200 м/с. На базе МКДУ созданы установки для газотермического напыления покрытий, они комплектуются стандартным и оригинальным оборудованием, позволяющим напылять порошки на изделия со сложной конфигурацией поверхности.

Сварка металлов и сплавов трением. Особенности образования соединения при конвенционном и инерционном процессах.

Г. И. Лащенко

Показано, что закономерности процесса образования соединений при сварке трением базируются на основах, разработанных наукой о трении. При сварке трением в стыке действует внутренний источник тепловой энергии, вызывающий быстрый локальный нагрев небольших объемов металла. Процесс образования соединения при конвенционной сварке делится на шесть фаз: притирка, увеличение площади контакта, повышение температуры, подготовка поверхностей к соединению, торможение, проковка. Основным отличием инерционной сварки трением от конвенционной является нагрев места сварки при спадающей частоте вращения шпинделя и более «жесткий» термический режим. При сварке трением в металле стыка формируется равноосное зерно в 10–30 раз мельче зерна основного металла, а в зоне термического влияния не наблюдается заметного роста зерна. Отмечено, что при сварке трением механические свойства соединений выгодно отличаются от полученных при др. способах сварки.

КПД газовых нагревателей.

Е. П. Шелепов

Рассмотрены источники водяных паров, поступающих в теплообменник, составлены четыре варианта тепловых балансов (полный сухой, традиционный сухой, рекламный и универсальный), дана развернутая оценка КПД водонагревателей, работающих на газообразном топливе. Проанализирована ошибка др. авторов, получивших КПД водонагревателя больше 100%, связанная с неверной методикой расчетов. Установлено, что снижение расхода топлива в конденсационных водонагревателях происходит за счет теплоты конденсации, из-за более глубокого охлаждения уходящих газов и снижения в них количества водяных паров. Доказано, что КПД водонагревателя всегда меньше 100% из-за наличия потерь: с уходящими газами, стенками теплообменника в окружающую среду и сопутствующих затрат электроэнергии.



Инверторный источник питания Booster.pro 170/210



Инвертор для сварки штучным электродом Booster.pro 170/210 в новом исполнении является самым легким в мире. Надежный и прочный корпус аппарата весом 5,5 кг позволяет легко выполнять работу в сложных условиях эксплуатации в строительной отрасли.

Управление инвертором осуществляется с помощью регулятора (для регулировки силы тока) и кнопкой включения функций сварки TIG и MMA. Функция Intig Energy автоматически выбирает нужный ток зажигания сварочной дуги. Функция контактного старта (Lift-Arc) гарантирует надежное и мягкое зажигание дуги. Система Rehm Elsa предотвращает прерывание процесса сварки. Функции Arc-force (сварка форсированной дугой) и Anti-stik (антизалипание) — препятствуют залипанию и сжиганию электродов. Есть автоматическая оптимизация охлаждения. Функция Booster обеспечивает необходимую мощность при сварке штучным электродом. Сварку алюминия и бронзы ведут с помощью функции форсированной дуги. Благодаря

Технические характеристики Booster.pro 170/210:

Модель	Booster.pro 170	Booster.pro 210
Диапазон регулировки сварочного тока, А	5–170	5–210
Продолжительность включения при 20 °С на безопасном режиме, А	60	100
Сварочный ток при ПВ 100%, безопасный режим	120	160
Напряжение холостого хода, В	82	90
Коэффициент мощности	0,7	0,99
Вес, кг	4,1	5,5
Размеры ДхШхВ, мм	245x130x175	310x130x175

электромагнитному газовому клапану с системой управления и функцией автоматического 4-тактного режима процесса эффективна TIG сварка на постоянном токе.

Оборудование маркировано знаками CE и S и соответствует стандарту EN60974–1.

Благодаря специальной конструкции корпуса, аппарат легко поднимается и переносится.

Для безопасного использования на строительных площадках есть дополнительный защитный каркас Booster Rambo.kit.

В комплект входят: чемодан сварщика, кабели электродержателя, заземления с зажимом, молоток, щетка и защитный ручной щиток со сменными стеклами.

www.rehm-online.de

● #1019

Сварочный аппарат Origo™ Tig 3001i, TA23 – новинка компании ESAB



На отечественном рынке компания ESAB представила новый профессиональный сварочный аппарат для TIG сварки в промышленности и для ремонтных работ — Origo™ Tig 3001i, TA23.

Прочная и надежная конструкция данных аппаратов позволяет использовать их в самых различных условиях. Они просты в применении и надежны в эксплуатации.

Origo™, TA23 оборудован панелью управления с основными установками TIG сварки, позволяющей легко и просто устанавливать требуемые сварочные параметры, что гарантирует качественную сварку.

С помощью аппарата можно сваривать (MMA, TIG) нержавеющей и низкоуглеродистые стали толщиной от 1,0 мм.

Технические характеристики Origo™ Tig 3001i, TA23

Диапазон регулирования тока (TIG сварка), А	4–300
Диапазон регулирования тока (MMA сварка), А	16–300
Напряжение питающей электроцепи, В	3x400
Сечение сетевого кабеля, мм ²	4x1,5
Максимальный сварочный ток, А / напряжение, ПВ 100%, TIG, В	200/18
Напряжение холостого хода, В	57–67
Размеры (д х ш х в), мм	652x249x423
Масса, кг	30

При необходимости аппараты могут комплектоваться блоком охлаждения CoolMidi 1000 с техническими характеристиками: охлаждающая способность — 1600 Вт; объем охлаждающей жидкости — 4,2 л; максимальный расход — 4 л/мин; максимальное давление — 3/3,8 бар (при 50/60 Гц).

www.esab.ru

● #1020

Самоходный агрегат лазерной сварки САЛС-1



На базе технологии лазерной орбитальной сварки неповоротных кольцевых стыков труб большого диаметра с применением установки УЛСТ-1

НПК «УТС-Интеграция» разработала самоходный агрегат лазерной сварки САЛС-1.

САЛС-1, используемый на базе гусеничной или колесной техники, обеспечивает ведение строительства магистральных трубопроводов как поточно-расчлененным способом, так и строительство с выполнением сварки всех слоев стыка на одном посту.

Технико-технологические характеристики агрегата САЛС-1:

- машинное время сварки одного прохода на трубе Ø 1420 мм составляет 4 мин (корневой шов, заполняющий, облицовочный);
- применения специальной узкой разделки кромок 4 мм, позволяет достичь высокой производительности работ, низкого расхода сварочных материалов и защитных газов;

- обеспечивает высокие механические свойства сварных соединений;
- низкое энергопотребление (за счет высокого КПД волоконных лазеров) – 160 кВт;
- малое разбрызгивание металла;
- применение в широком спектре номенклатуры труб (Ø 700–1420 мм, толщины 12–38 мм), технологий и сварочных материалов;
- применение серийно выпускаемых станков для подготовки кромок труб и внутренних гидравлических центраторов.

В состав САЛС-1 входят: контейнер с оборудованием, палатка сварщика с навесным сварочным оборудованием (манипулятором), гусеничная или колесная база, кран-манипулятор.

При проектировании контейнера (кунга) для размещения оборудования предусмотрено обеспечение необходимого режима работы САЛС в сложных погодных условиях, возможность быстрой замены через боковые панели механизмов, вышедших из строя.

www.uts-integracia.ru

● #1021

Аппарат прецизионной электронно-лучевой сварки Focus MEBW-60

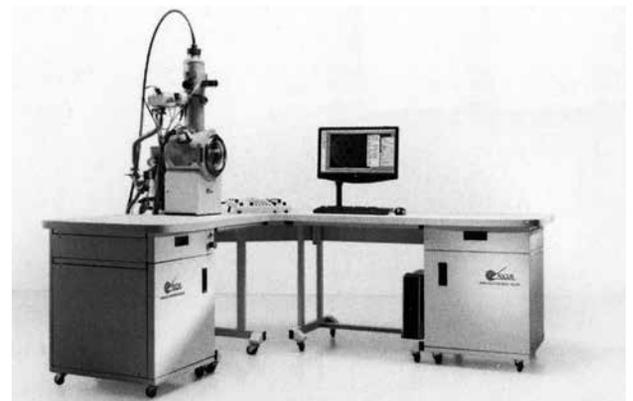
Аппарат Focus MEBW-60 представляет собой уникальное сочетание технологии прецизионной электронно-лучевой сварки и высокоточной механики. Он подходит для сварки разнообразных материалов, включая материалы, которые непригодны для сварки другими методами, например для сварки тугоплавких металлов (вольфрам, платина и тантал).

Процесс сварки. С помощью блока управления Focus MEBW-60 сваривают радиальные и осевые, прихваточные швы. Система сканирования обеспечивает позиционирование электронного пучка относительно зазора между свариваемыми кромками для всех режимов сварки.

В стандартную комплектацию аппарата входят: компактная рабочая камера и вращающийся зажимной держатель с моторизованным приводом по оси Z. Внешние габариты могут быть от 3 до 135 мм.

Существует возможность задания более сложных процессов сварки при подключении внешнего ПК со специальным программным обеспечением. Например, можно указать линию сварки непосредственно на изображении изделия, полученном в режиме сканирования.

Аппарат MEBW-60 используется при следующих процессах: электронно-лучевая сварка,



«сверление» отверстий, легирование поверхности и наплавление, микроструктурирование поверхности и микрогравировка, закаливание поверхностного слоя.

Аппарат идеально подходит для штучного и мелкосерийного производства в микромеханике, медицине, сверхвысоковакуумных технологиях, криотехнологии, создании турбин, в авиационной, космической технике и др.

www.focus-e-welding.com

● #1022

Влияние высокотемпературного нагрева на механические свойства и структуру металла ЗТВ сталей S355J2 и S460M

В. Д. Позняков, чл.-кор. НАНУ, д.т.н., А. В. Завдоев, С. Л. Жданов, А. В. Максименко, к.т.н., «ИЭС им. Е. О. Патона» НАНУ (Киев)

Конструкционные стали с $\sigma_T > 350$ МПа (S355J2 и S460M) находят все более широкое применение при изготовлении металлоконструкций разного назначения. В процессе изготовления сварных металлоконструкций может применяться изотермический нагрев до температур 580–950 °С. В данной работе освещены проведенные исследования влияния высокотемпературного изотермического нагрева на механические свойства листового проката и металла ЗТВ микролегированных сталей S355J2 и S460M. Показано, что механические свойства этих сталей стабильны вплоть до температур нагрева 600 °С. Изменения их свойств происходят при дальнейшем увеличении температуры изотермического нагрева, что объясняется отличиями в содержании микролегирующих элементов и состоянием поставки.

Конструкционные стали класса прочности С350 и С490 находят все более широкое применение при изготовлении металлоконструкций разного назначения, в частности: в мостостроении, строительстве, при изготовлении оффшорных платформ для добычи нефти и газа, опор ветрогенераторов, а также металлоконструкций грузового железнодорожного транспорта [1]. Использование высокопрочных сталей дает возможность снизить металлоемкость конструкций, повысить их эксплуатационную надежность и обеспечить конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках. Стали указанного класса прочности производятся за рубежом по стандарту EN10025–2 и маркируются как S355J2 (С350) и S460M (С490). Они относятся к низколегированным конструкционным сталям, дополнительно микролегированным ванадием и ниобием. В последнее время их изготовление освоено и металлургически комбинатами Украины. Возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам сварных металлоконструкций обуславливают усовершенствование технологий их изготовления [1–4]. Они поставляются в состоянии контролируемой прокатки или нормализации [2, 3], что обуславливает формирование в сталях мелкодисперсной структуры. За счет этого сталь обладает не только повышенными прочностными свойствами ($\sigma_T > 350$ МПа), но и имеет высокую пластичность ($\delta_5 > 18\%$) и ударную вязкость ($KCV^{40} > 34$ Дж/см²).

Структура и механические свойства металла, которые обеспечиваются в стальном прокате при его изготовлении в результате применения специальных условий прокатки и термической обработки, могут существенно изменяться под влиянием термических циклов сварки. В работах [2–6] детально изучены вопросы влияния термических циклов сварки на структуру и свойства конструкционных сталей с $\sigma_T > 350$ МПа (S355J2 и S460M), а также показано при каких условиях сварки сварные соединения будут обладать свойствами сопоставимыми с основным металлом.

Следует отметить, что в процессе изготовления сварных металлоконструкций может применяться изотермический нагрев до температур 580–950 °С. Так, например, высокий ($T = 580–620$ °С) отпуск применяется для снятия сварочных напряжений. Нагрев до температур 680–750 °С осуществляется при термической правке сварных конструкций. В некоторых случаях, например, при изготовлении днищ цистерн грузовых вагонов, сварные полотнища нагревают до температуры 900–950 °С. С точки зрения изменения структуры конструкционной стали изотермический нагрев до температуры 200 °С может привести к выделению карбидных фаз и дисперсных включений цементита. При нагреве выше 500 °С в структуре стали начинают происходить заметные изменения, сопровождающиеся снижением твердости, временного сопротивления и предела текучести, повышением относительного удлинения и ударной вязкости [7–10].

Целью настоящей работы являлись исследования влияния высокотемпературного изотермического нагрева на механические свойства листового проката и металла ЗТВ микролегированных сталей S355J2 и S460M.

Методика эксперимента. Для проведения экспериментов были выбраны конструкционные стали S355J2 и S460M. Химический состав, состояние поставки и механические свойства этих сталей приведены в *табл. 1* и *2*. Кроме химического состава важно также указывать состояние поставки, так как от метода производства стали, зависят ее свариваемость и поведение при последующей термической обработке [11].

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей, мас. %

Сталь	C	Mn	Cr	Ni	V	Nb	Al	S	P	Ti	N	Si
S355J2	0.16	1.36	0.04	0.030	0.06	0.031	0.040	0.007	0.016	0.016	0.007	0.24
S460M	0.15	1.30	0.09	0.019	0.01	0.050	0.025	0.013	0.017	-	0.007	0.23

Таблица 2. Механические свойства и состояние поставки исследуемых сталей

Сталь / состояние поставки	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
S355J2 / нормализация	370	530	32	70
S460M / контролируемая прокатка	480	600	27	58

Исследование влияния термической обработки на структуру и механические свойства указанных сталей и металла зоны термического влияния (ЗТВ) проводили применительно к образцам, которые нагревали в печи до температур – 600, 730 и 950 °С, выдерживали при заданных температурах в течение 1 часа, а затем охлаждали на воздухе. Для моделирования металла ЗТВ были изготовлены образцы-имитаторы. На установке МСР-75 [6] их нагревали и охлаждали по термическому циклу сварки, обеспечивающему нагрев образцов со скоростью 150 °С/с и его охлаждение в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита (600–500 °С) со скоростью $W_{6/5} = 25$ °С/с. Такие условия нагрева-охлаждения образцов соответствуют процессам, происходящим при дуговой сварке плавящимся электродом.

Для определения механических характеристик прочности и пластичности проводили испытания образцов (тип II в соответствии с ГОСТ 6996–96 по 3 образца на каждую скорость охлаждения) на статическое растяжение. Испытания выполняли по ГОСТ 6996–66 при температуре + 20 °С. Ударную вязкость определяли при испытании образцов Шарпи с острым надрезом (ГОСТ 9454–78) при температурах испытания + 20, – 20, – 40 °С.

Испытания основного металла. По результатам механических испытаний стали S460M (класс прочности С460) установлено, что после нагрева образцов до 600 °С, пределы текучести, прочности и пластичность указанной стали практически не изменяются (рис. 1).

Заметные изменения механических свойств и ударной вязкости стали S460M наблюдаются при изотермическом нагреве до температуры 730 °С и выше. После нагрева и выдержки при температуре 730 °С в указанной стали наблюдается снижение на 10% показателей предела текучести, в то время как ударная вязкость металла KCV и KCV⁻²⁰ несколько повышается, а пластические свойства остаются прежними. Такие изменения, по всей видимо-

сти, обусловлены началом релаксационных процессов, движением дефектов к границам зерен при неизменном размере зерен. Увеличение температуры нагрева до 900 °С приводит к более существенному снижению предела текучести стали S460M, практически на 25%. При этом ее ударная вязкость также уменьшается: на 30% при температуре испытаний образцов + 20 °С и в 4–6 раз при температурах испытаний – 20 °С и – 40 °С. Уменьшение предела текучести и ударной вязкости в данном случае может быть обусловлено ростом зерна, вызванного высокотемпературным нагревом стали.

В отличие от стали S460M, сталь S355J2 термически более стабильна. Независимо от температуры нагрева она сохраняет показатели статической прочности (σ_T и σ_B) и пластичности (ψ и δ_5) на уровне

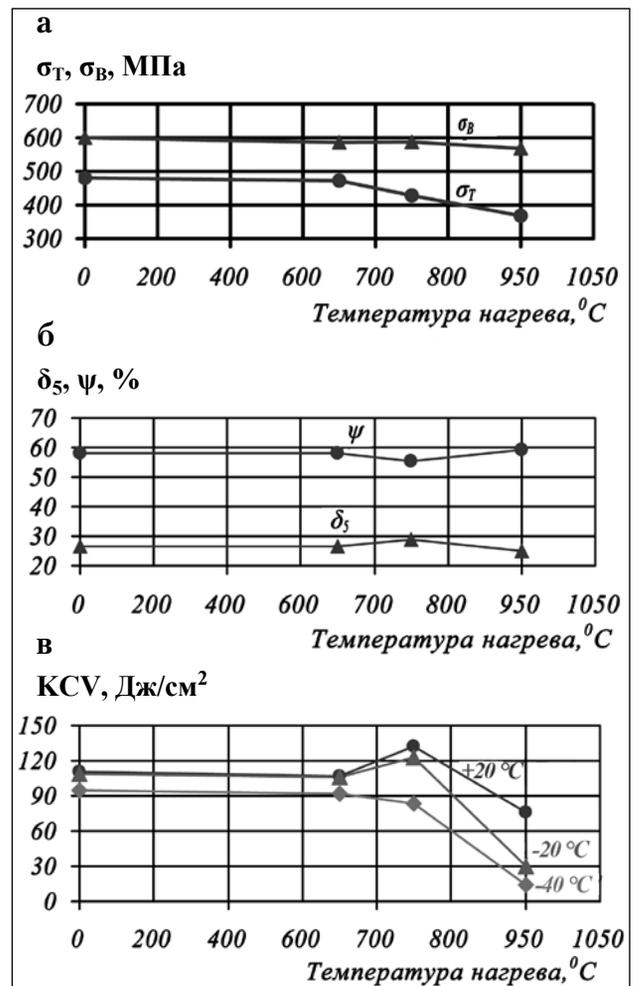


Рис. 1. Изменение механических свойств стали S460M в результате изотермического нагрева до температур 650, 750, 950 °С, выдержка 1 ч

проката в состоянии поставки (рис. 2). Это объясняется тем, что при различных видах обработки стали изменяются устойчивость аустенита выше критической температуры, а также динамика протекания процессов релаксации и рекристаллизации. Металлы, подвергнутые пластической деформации термически менее стабильны [12], чем после термической обработки, так как содержат больше дефектов кристаллического строения и для активации их движения необходимы меньшие температуры. Высокопрочное состояние стали S355J2 достигнуто за счет формирования упрочняющей карбидной фазы, тормозящей рост зерна при высоких температурах термической обработки.

Показатели ударной вязкости, независимо от термической обработки стали S355J2, при комнатной температуре находятся на уровне значений исходного металла. При минусовых температурах испытаний наблюдается рост показателей KCV при температуре термической обработки 730 °C и незначительное их снижение после нагрева до 950 °C.

Следует отметить, что по основным легирующим элементам сталь S355J2 достаточно близка к стали S460M (табл. 1). Однако они отличаются содержанием таких элементов как V, S, Ti, Nb. В стали S355J2 в отличие от S460M присутствует титан и содержание ванадия в шесть раз больше, но именно эти элементы существенно влияют на процессы старения в сталях. К тому же серы в стали S355J2 почти в два раза меньше чем у S460M, а как известно, избыточная сера в стали оказывает

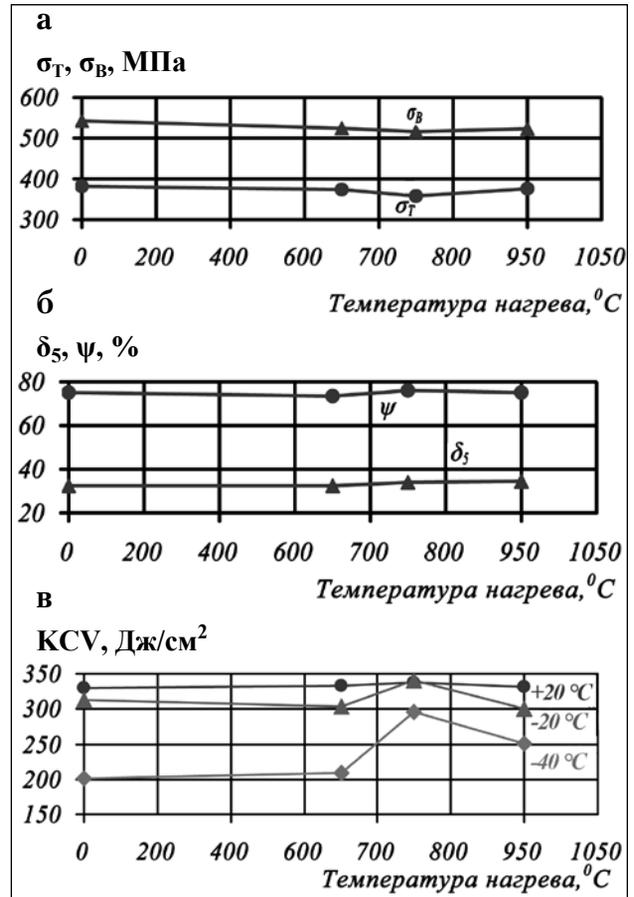


Рис. 2. Изменение механических свойств стали S355J2 в результате изотермического нагрева до температур 650, 750, 950 °C, выдержка 1 ч

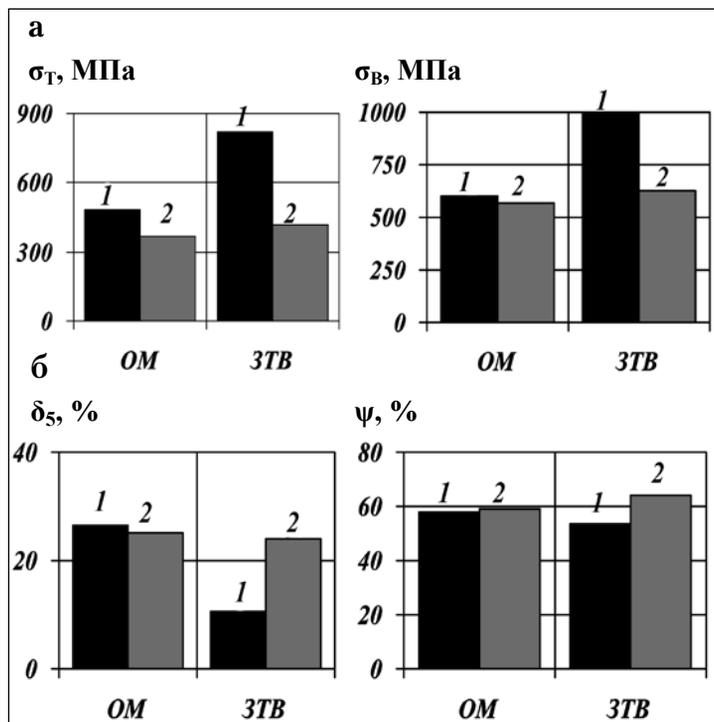


Рис. 3. Механические свойства основного металла и металла ЗТВ стали S460M: 1 – исходное состояние; 2 – выдержка 1 ч при T = 950 °C

негативное влияние на показатели ударной вязкости.

Особенности поведения металла ЗТВ при температурной обработке. В связи с тем, что наибольшие изменения механических свойств стали S460M произошли после ее нагревания до температуры 950 °C, именно такая температура термической обработки была использована при дальнейших исследованиях, которые проводились для металла ЗТВ.

Установлено, что механические свойства и ударная вязкость металла ЗТВ стали S460M после термической обработки при 950 °C меняются почти таким же образом как и у стали в исходном состоянии. После выдержки образцов один час при температуре 950 °C наблюдается падение прочностных характеристик (σ_Т, σ_В) как основного, так и металла ЗТВ; показатели пластичности основного металла почти не меняются, в то время как для металла ЗТВ они существенно вырастают (рис. 3). Важно отметить, что характеристики прочности

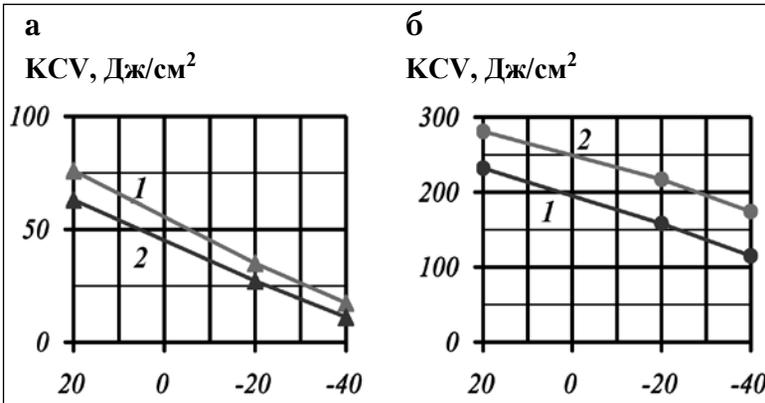


Рис. 4. Ударная вязкость: основного металла – 1, металла ЗТВ – 2, сталей: S460M – а, S355J2 – б, после термической обработки, выдержка 1 ч при T = 950 °C

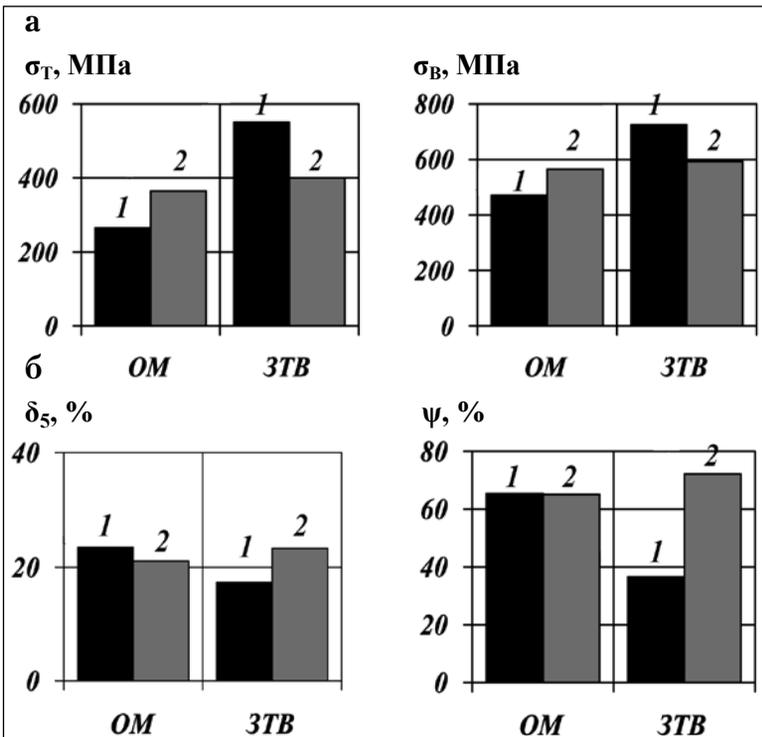


Рис. 5. Механические свойства основного металла и металла ЗТВ стали S355J2: 1 – исходное состояние; 2 – выдержка 1 ч при T = 950 °C

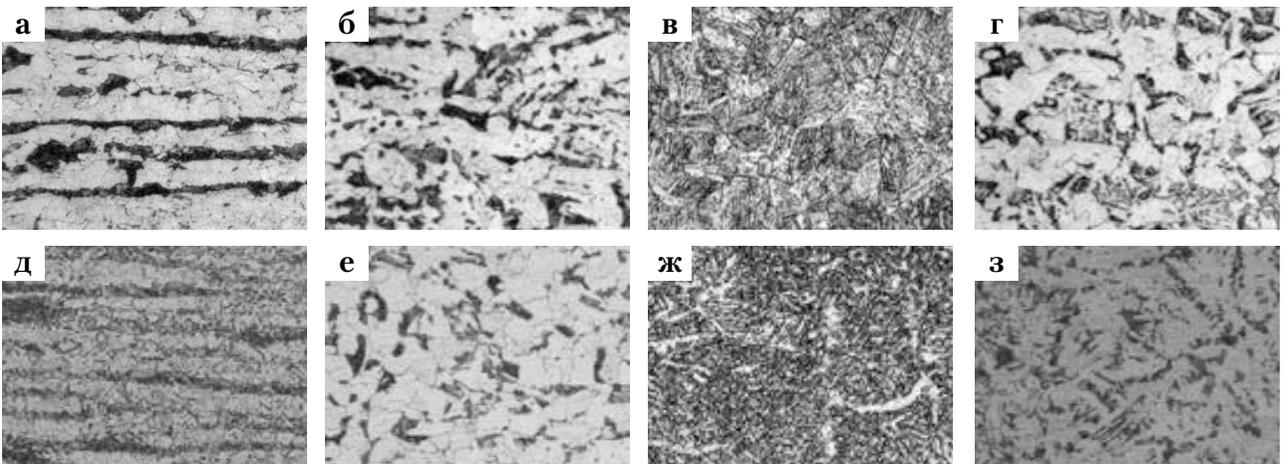


Рис. 6. Микроструктура сталей S460M (а, б, в, г) и S355J2 (д, е, ж, з): а, д – основного металла; б, е – основного металла, + 950 °C; в, ж – ЗТВ (25 °C/c); г, з – ЗТВ (25 °C/c), + 950 °C (× 500)

и пластичности как основного металла, так и металла ЗТВ после выдержки при температуре 950 °C сопоставимы. Это можно объяснить процессами рекристаллизации, протекающими при данной температуре.

Похожие закономерности по влиянию термической обработки на показатели ударной вязкости стали наблюдаются и в отношении металла ЗТВ (рис. 4).

Наблюдается падение характеристик статической прочности (σ_T , σ_B) после выдержки образцов один час при температуре 950 °C и относительно металла ЗТВ стали S355J2 (рис. 5). При этом они остаются выше, чем пределы текучести и прочности стали в исходном состоянии, что объясняется старением стали при данной термической обработке. Показатели пластичности металла ЗТВ, как δ_5 , так и ψ , после указанной термической обработки растут и достигают уровня основного металла.

Влияние высокотемпературного нагрева на структуру сталей класса прочности S355 и S460. Структура основного металла стали S460M является феррито-перлитной, полосчатой с интегральной микротвердостью $HV_{0,1} = 1950$ МПа, после нагрева до 950 °C (1 ч) твердость снижается до $HV_{0,1} = 1700$ МПа, что обусловлено трансформацией структуры, а именно началом процесса рекристаллизации, но полосчатая структура все же сохраняется (рис. 6). В ЗТВ данной стали также наблюдаются подобные зависимости изменения структуры

и падения твердости с $HV_{0,1} = 2900$ до 2100 МПа. Эти особенности поведения структуры и объясняют поведение механических свойств, но для объяснения поведения ударной вязкости необходимы дополнительные исследования с использованием рентгеноструктурного, нейтронного и текстурного анализов.

Благодаря различию в легировании ванадием, серой и титаном у стали S355J2, при нагреве до температуры 950°C и выдержке один час, структура основного металла почти не рекристаллизуется. Поэтому значение твердости остается неизменным — $HV_{0,1} = 1850\text{--}1800$ МПа. Принимая во внимание данные, приведенные на рис. 1, 2, можно сделать вывод, что ванадий, сера и титан выступают как стабилизаторы (т.е. данная структура более термостабильна чем у стали S460M). Но в условиях, когда металл сначала испытывает термическое влияние при сварке, а затем при термическом нагреве до температуры 950°C , закономерности по изменению механических свойств и ударной вязкости металла ЗТВ сталей S355J2 и S460M становятся похожими, что подтверждается структурными изменениями. После выдержки один час при 950°C наблюдаются рекристаллизационные процессы и падение показателей твердости ЗТВ от $HV_{0,1} = 2000$ МПа до $HV_{0,1} = 1750$ МПа.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

Исследования влияния высокотемпературного изотермического нагрева на механические свойства листового проката и металла ЗТВ микролегированных сталей S355J2 и S460M показали, что механические свойства данных сталей стабильны вплоть до температур нагрева 600°C . Изменения их свойств происходят при дальнейшем увеличении температуры изотермического нагрева. Стали, прошедшие испытания, имеют близкий химический состав по основным элементам, однако отличаются содержанием микролегирующих элементов и состоянием поставки. Такие отличия и объясняют изменение механических свойств этих сталей. Высокие механические свойства у стали S355J2 достигаются за счет микролегирования, которое приводит к дисперсионному упрочнению и стабилизации аустенита выше критической точки. Прочность стали S460M достигается за счет формирования мелкодисперсной структуры путем контролируемой прокатки. При последующем термическом воздействии выше температур 600°C в ней интенсивно протекают рекристаллизационные процессы, что приводит к росту размера зерна и понижению прочностных характеристик. Закономерности изменения механических свойств металла ЗТВ сталей S355J2 и S460M при изотермическом нагреве похожи. Достигнутые значения прочностных и пластических харак-

теристик находятся на уровне основного металла. Исключение составляет ударная вязкость стали S460M, значения которой для металла ЗТВ и основного металла опускаются ниже допустимых 34 Дж/см².

Литература

1. Ufuah E. Elevated Temperature Mechanical Properties of Butt-Welded Connections Made with High Strength Steel Grades S355 and S460M. // Design, Fabrication and Economy of Metal Structures International Conference Proceedings, Miskolc, Hungary, April 24–26. — 2013. — P. 407–412.
2. A. Nazarov, E. Yakushev, I. Shabalov, Yu. Morozov, T. Kireeva. Comparison of weldability of high-strength pipe steels microalloyed with niobium, niobium and vanadium. // Metallurgist. — 2014. — Vol.7. — N9–10. — P. 911–917.
3. S. Ragu Nathan, V. Balasubramanian, S. Malarvizhi, A. G. Rao. Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints // Defence Technology. — 2015. — V.11. — P. 308–317.
4. Show BK, Veerababu R, Balamuralikrishnan R, Malakondaiah G. Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of microalloyed HSLA steel. MaterSciEngA 2010; 527: 1595–1604.
5. Позняков В. Д., Жданов С. Л., Максименко А. А. Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355 J2) // Автомат. сварка. — 2012. — № 8. — С. 7–11.
6. Позняков В. Д., Жданов С. Л., Завдоев А. В., Максименко А. А., Соломийчук Т. Г. Свариваемость высокопрочной микролегированной стали S460M. // Автомат. сварка. — 2016. — № 10. — С. 7–11.
7. Воробьева Г. А., Складнова Е. Е., Ерофеев В. К., Устинова А. А. Конструкционные стали и сплавы. СПб.: Политехника, 2013. — 440 с.
8. Гуляев А. П. Термическая обработка стали, 2 изд., М., 1960. — 495 с.
9. Меськин В. С. Основы легирования стали, М, 1959. — 689 с.
10. Курдюмов Г. В., Явления закалки и отпуска стали, М, 1960. — 63 с.
11. B. de MEESTE The Weldability of Modern Structural TMCP Steels // ISIJ International, Vol. 37 (1997), No. 6, pp. 537–551.
12. Завдоев А. В. Старіння низьковуглецевої сталі отриманої теплою гвинтовою екструзією // «Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні». — 2015. — № 1. — С. 14–19.

Эффективность многокамерного детонационного устройства для нанесения покрытий

Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко, И.М. Дуда, ИЭС. им. Е.О. Патона НАНУ (Киев)

Многокамерное детонационное устройство (МКДУ) отличается простотой в эксплуатации, низкой стоимостью и высокой эффективностью использования. Устройство является универсальным и обеспечивает покрытия высокого качества из различных материалов. Пульсирующий с частотой 20 Гц поток продуктов сгорания имеет скорость до 1800 м/сек; что достигается за счет создания дополнительной ударной волны, следующей за основной, (имеющей давление ~ 3,5 МПа). Порошок дозируется и вводится в струю специальным порошковым питателем и приобретает скорость до 1200 м/с. МКДУ обеспечивает коэффициент использования материалов (КИМ) 80–90% для металлокерамических и 50–60% – керамических порошков. Расход компонентов горючей смеси – 0,6–1,2 м³/ч пропана и 2,0–5,0 м³/ч кислорода. Производительность МКДУ: до 3 кг/ч – металлы, 2 кг/ч – металлокерамика, 1 кг/ч – керамика. МКДУ может комплектоваться стандартными узлами и приборами, используемыми в устройствах газотермического напыления покрытий. МКДУ может закрепляться вертикально, горизонтально или на «руке» робота.

Методы газотермического напыления покрытий широко используют как при восстановлении деталей машин, так и для создания изделий с заданными физико-механическими свойствами поверхностных слоев (износостойкие, коррозионностойкие, теплозащитные, антифрикционные). В последнее время получили развитие методы высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF). Возможность создавать плотные покрытия с минимальной пористостью, высокой адгезией и минимальным окислением материала является основным преимуществом HVOF процесса. Это достигается за счет высокой скорости частиц напыляемого порошка и минимального времени их пребывания в струе продуктов сгорания. HVOF напыление широко используется для нанесения металлокерамических и металлических покрытий, его можно с успехом применять и для нанесения плотных керамических покрытий [1].

Спектр предлагаемых HVOF устройств огромен. Лидерами в производстве данного оборудо-

вания являются такие компании как Sulzer-Metco, GTV, Praxair. Современные установки HVOF работают при давлении в камере сгорания 0,7–1,2 МПа. В качестве горючего используется пропан, этилен, пропилен, водород или керосин. Расход горючего достаточно велик: для обеспечения высокой скорости (до 750 м/с) частиц Al₂O₃ необходимо сжигать 4,7 м³/ч C₃H₈; расход кислорода при этом составляет 17 м³/ч. На нагрев и ускорение 1 кг порошкового материала приходится до 25 м³ продуктов сгорания. В таких условиях образуется избыток тепловой мощности, что обуславливает необходимость усложнять технологию, применять системы охлаждения мощностью до 40 кВт, увеличивать дистанцию напыления и т.д. Для формирования высокоскоростной струи продуктов сгорания в горелках используют сопла с внутренним диаметром 9–12 мм. Высокая плотность тепловой энергии в соплах ограничивает их работоспособность до 6–12 ч. Высокое давление компонентов горючей смеси и большой объем продуктов сгорания отрицательно влияют на надежность технологических устройств и стоимость оборудования. Примером успешной модернизации HVOF является устройство TopGun[®] Airjet и горелка HVAF, которые охлаждаются компонентами горючей смеси. Высокая адгезия, когезия, микротвердость, низкая пористость покрытий, нанесенных HVOF устройствами, напрямую зависят от скорости напыляемых частиц [2]. Использование детонационных систем напыления позволяет еще больше увеличить скорость напыляемых частиц и, как следствие, увеличить адгезию, когезию, понизить пористость покрытий. Расход горючей смеси при этом значительно ниже, что предотвращает перегрев напыляемой поверхности. Известно множество модификаций установок детонационного напыления: «Обь», «Прометей», «Днепр», «Перун», УДН-2М, АДМ-2, «Корунд-3», «Гром». Массовое использование технологии детонационного напыления сдерживается высокими требованиями к квалификации персонала и повышенными требованиями к мерам безопасности. Новое поколение детонационных установок отличается высокой степенью автоматизации и контролем за технологическим процессом, например, компьютеризированный детонационный

комплекс CCDS «Dragon» [3, 4]. Классические детонационные устройства используют клапанную систему подачи горючих газов и напыляемого материала. К общим недостаткам данных устройств можно отнести – низкую работоспособность узлов ввода порошков, недостаточную точность дозирования и синхронизации ввода порошка с иницированием детонации. Решение вопроса эффективности использования материалов, повышения производительности и надежности устройств является основной задачей при их эксплуатации. Как следствие, перспективным направлением развития является создание надежных бесклапанных и экономных детонационных установок, работающих на повышенных (до 100 Гц) частотах. Представляет интерес высокочастотное импульсно-детонационное устройство HFPD. Замеры скорости частиц Al_2O_3 , имеющих фракцию 40 мкм, показали возможность ускорения частиц порошкового облака до 1200 м/с при средней его скорости 820 м/с [5]. Высокая частота детонации позволяет также увеличить коэффициент использования порошка и упростить систему его подачи.

В детонационных устройствах разгон и разогрев частиц порошка осуществляются, в основном, продуктами сгорания. Большинство разработанных устройств работает на принципе самоподдерживающейся детонации. Использование пересжатого детонационного режима сгорания перспективнее для реализации более высоких параметров (давление, скорость, температура) продуктов сгорания за фронтом детонационной волны. Это позволяет уменьшить размеры установок, применять сильно разбавленные смеси, существенно уменьшить диаметр выходного отверстия ствола.

Разработанные на этих принципах устройства позволяют создавать качественные покрытия с высокими физико-механическими свойствами, что стимулирует их дальнейшее развитие [6]. Существенно улучшить условия напыления порошкового материала возможно также применяя многокамерные детонационные установки (МКДУ), которые используют преимущества бесклапанных систем, работающих на повышенных частотах. Было разработано МКДУ для напыления порошкового материала, в котором детонационное горение газовой смеси происходит в специально спрофилированных камерах [7]. Аккумуляция энергии сгорания от двух камер в цилиндрическом стволе обеспечивает формирование высокоскоростной струи продуктов сгорания, которая ускоряет и нагревает порошковый материал. Результаты моделирования процессов сгорания

в двухкамерной конструкции устройства показали, что эпюра давления продуктов сгорания в сопле имеет «двугорбый» характер. Первый «горб» от цилиндрической камеры и второй от дисковой. Оценочная скорость продуктов сгорания от открытой части сопла достигает 1,8 км/с. Такие условия позволяют эффективно ускорять порошковый материал до скоростей 1,2 км/с.

К особенностям МКДУ следует отнести наличие нескольких специально профилированных детонационных камер, повышенную частоту детонации (20–30 Гц) горючей смеси, газодинамический узел дозирования и синхронизацию ввода порошка в сопло с иницированием детонации.

Макет МКДУ (рис. 1) содержит: узел смешивания газов 1, электроразрядное устройство 2, форкамеру 3, детонационную 4 и кумулятивную 5 камеры сгорания, систему непрерывной подачи порошка 6, узел для дозирования и ввода порошка 7, водяную рубашку для охлаждения 8, цилиндрическое сопло для ускорения и нагрева дозы порошка 9, узел смешивания газов 10.

Иницирование детонации горючих газов осуществляется в форкамере 3 с помощью электрического разряда. Развитие детонационного режима сгорания в цилиндрической камере 4, а затем и в кумулятивной 5 сопровождается кумуляцией энергии продуктов сгорания на входе в сопло 9, куда вводится доза порошкового материала из устройства 7.

Вид сверхзвуковой импульсной струи при использовании двух камер приведен на рис. 2. Структура газовой струи характерна для сверхзвукового истечения в режиме недорасширения и согласуется с взрывным характером работы детонаци-

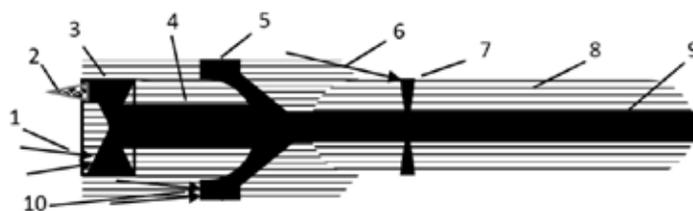


Рис. 1. Многокамерное детонационное устройство для нанесения покрытий

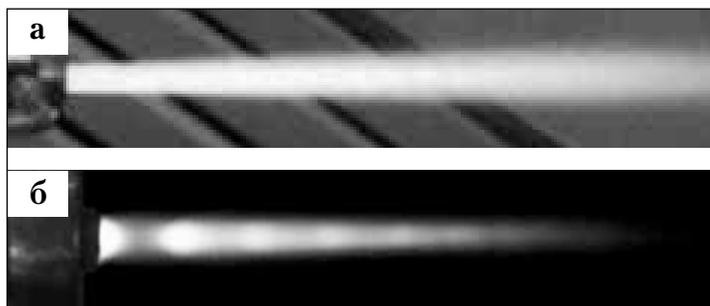


Рис. 2. Истечение сверхзвуковой импульсной струи из сопла детонационного устройства: а – с порошком, б – без порошка

онного устройства, при котором давление в камере значительно превышает давление в окружающей среде (рис. 2, б). Струя нагретого порошка от обреза сопла имеет длину более 200 мм без расхождения и потери светимости. На дистанции 400 мм и более наблюдаются красные треки от порошка, который охлаждается и тормозится в воздушной среде (рис. 2, а).

Для нагрева и ускорения керамических порошков использовали ствол диаметром 16 мм и длиной 520 мм; для металлических порошков — ствол длиной 300 мм. Регистрация давления и скорости в продуктах детонационного сгорания осуществлялась пьезоэлектрическими датчиками давления ЛХ-611. Расстояние между осями датчиков — 525 мм. Работы проводили с использованием горючей смеси пропана и кислорода в стехиометрическом соотношении.

Исследования показали, что использование второй (кумулятивной) камеры позволяет значительно изменить физические параметры продуктов сгорания. Датчик фиксирует на входе в сопло три пика давления в продуктах сгорания (рис. 3). Первый пик на уровне 35, второй 20 и третий 15 бар. Затем давление плавно понижается до 3 бар в течение 1 мс. Амплитуда давления на втором датчике, на выходе из сопла, составляет 20 бар, через 0,25 м/сек от образования максимальной амплитуды давления продуктов сгорания на входе в сопло. Анализ результатов показал, что время прохождения волны давления в продуктах сгорания между датчиками составляет в среднем 0,25 м/сек, а их скорость 2100 ± 100 м/сек (рис. 3). Проведенные исследования подтверждают, что скорость продуктов сгорания существенно повышается при подключении второй камеры сгорания. При этом в сопле формируется большой по длине и плотности поток продуктов сгорания, имеющий три максимума давления и более высокую скорость.

Такой поток более эффективен при ускорении дозы порошка в сопле. При напылении покрытий происходит обгон ударными волнами и продуктами детонационного сгорания порошковых частиц и опережающее их взаимодействие с материалом подложки или напыленным слоем.

При вводе порошков, светимость газопорошковой струи резко увеличивается (рис. 2, а). Скорость порошка определяли по фиксации светимости нагретого порошкового облака. В качестве фотоприемных устройств использовались два быстродей-

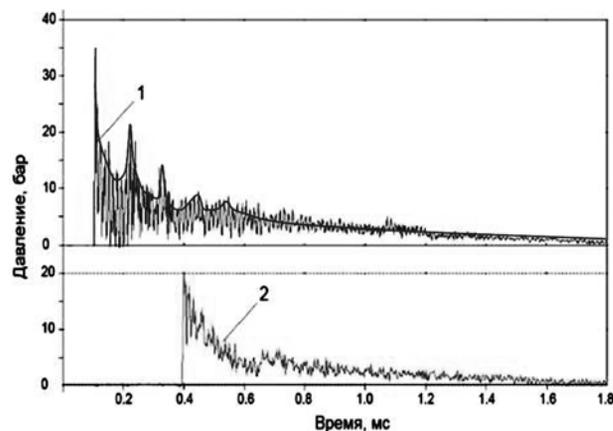


Рис. 3. График изменения давления в продуктах сгорания: 1 – в начале, 2 – в конце сопла МКДС

ствующих германиевых фотодиода ФД287 (время нарастания фронта импульса 10 нс) с рабочим спектральным диапазоном $\lambda = 0,5-1,7$ мкм.

Визуализация интегрального излучения нагретой порошковой струи позволяет оценить ее протяженность. Скорость порошковой струи определялась с учетом временного сдвига сигналов от первого и второго фотодатчиков. Типичное изменение во времени излучения от газопорошковой струи показано на рис. 4. В эксперименте использовали порошок Al_2O_3 , имеющий фракцию 5,6–22,5 мкм (AMPERIT® 740.0, Н.С. Starck).

Исследования показали, что скорость газопорошкового облака на расстоянии размещения напыляемой поверхности (до 60 мм от среза сопла) достигала, в среднем, величин 1200 ± 200 м/сек. Это позволяет получать качественные покрытия с минимальной пористостью. В качестве примера на рис. 5 приведены поперечные шлифы покрытий из порошков: а) AMPERIT 740.0 Al_2O_3 ; б) AMPERIT 554.074WC+12%CoCr (Н.С. Starck). Покрытия наносились на образец из стали 12Х18Н10Т. Исследования выявили, что материал керамического слоя имеет твердость 1320 ± 25 HV_{0,3} и пористость < 1%. Максимальная твердость получена в верхних слоях покрытия. Твердость плавно снижается

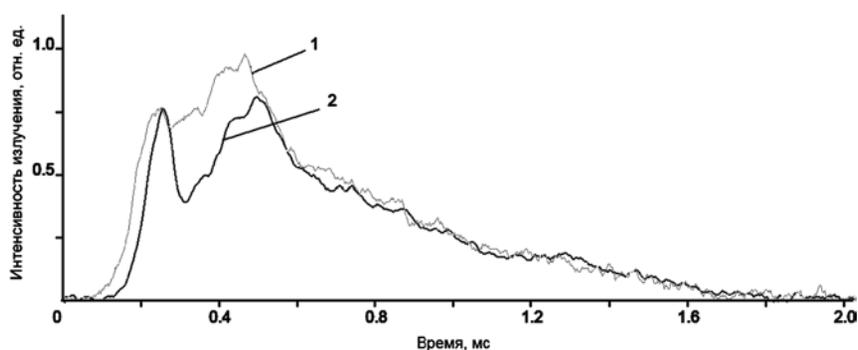


Рис. 4. Излучение газопорошкового облака, фиксируемое с использованием германиевых фотодиодов ФД287, на расстоянии от среза сопла: 1 – 30 мм, 2 – 60 мм

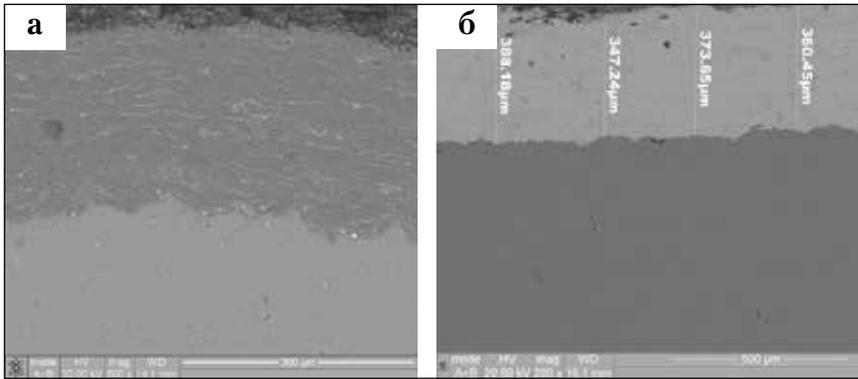


Рис. 5. SEM фотография поперечных шлифов покрытий из порошков: а) AMPERIT 740.0 Al₂O₃; б) AMPERIT 554.074 WC + 12 % CoCr (H.C. Starck)

на ~ 30% и в слоях, прилегающих к границе, имеет значение $900 \pm 25 \text{ HV}_{0.3}$. Состав материала покрытия – корунд кристаллической формы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) до 47%; остальные фазы – пластичные модификации $\Theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ [8].

Материал покрытия из порошка AMPERIT 554.074WC + 12% CoCr имеет среднюю твердость 1100 HV300 (от 1600 до 800 HV300). Пористость покрытия < 1%; толщина до 400 мкм. Коэффициент использования материалов (КИМ) 86% при производительности 1,5 кг/час. Анализ показывает, что дефекты материала покрытия на поверхности раздела отсутствуют, что обуславливает высокие показатели адгезии к подложке.

Напыление покрытий осуществлялось с использованием горючего газа пропан + бутан в смеси с кислородом и воздухом. Энергоэффективность технологии составляет до 5–10 м³ продуктов сгорания на 1 кг материала покрытия. На базе разработанного МКДУ создано оборудование для нанесения покрытий, которое состоит из стандартных узлов и устройств: манипуляторы, приборы для управления газами, системы безопасности, вентиляции и защиты от звука. Оборудование комплектуется многокамерным детонационным устройством, специальным порошковым питателем и автоматизированной системой управления.

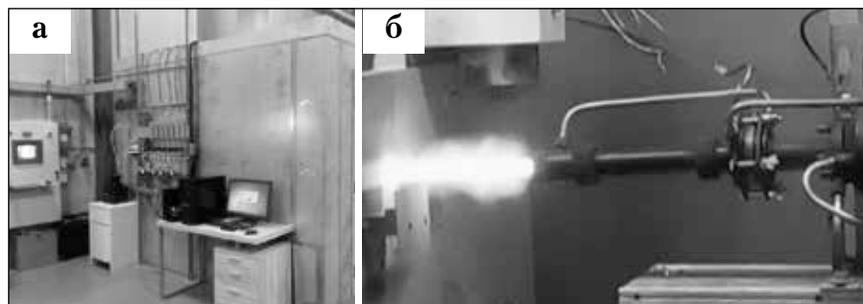


Рис. 6. МКДУ, установленная в стандартном боксе на неподвижной станции: а) вид на пульты управления, вкл. ЧПУ манипулятора, порошковый питатель, пульт управления газами, электронный блок управления МКДУ; б) детонационная установка в режиме напыления твердого сплава

Конструкция МКДУ и системы подачи порошка предусматривают возможность работы устройств при любой пространственной ориентации. МКДУ может находиться в стационарном положении (рис. 6), может быть установлено на «руке» робота и использоваться взамен горелки HVOF (рис. 7).

При высокой частоте инициирования детонации (20 Гц и выше), технологию можно рассматривать как «квазине-

прерывную» и, соответственно, осуществлять непрерывную подачу газов и порошков на большие (> 10 м) расстояния; обеспечивать качество покрытия независимо от позиционирования технологического устройства. Небольшие размеры МКДУ, а также непрерывная подача компонентов горючей газовой смеси и порошков обеспечивают условия для технологического манипулирования при использовании стандартных автоматизированных установок и роботов.

Возможно использовать стандартные боксы и системы для нейтрализации шума, апробированные порошковые питатели, газобаллонные системы подачи газов, пульта управления и системы контроля за технологией напыления и качеством покрытия (рис. 6, а).

Установка горизонтального типа (рис. 6) используется для формирования покрытий на изделиях типа ролик, вал, ротор (рис. 8, б, г). Изделия с более сложной конфигурацией (рис. 8, а, в) целесообразно напылять на установках с манипулятором в виде робота (рис. 7).

МКДУ отличаются простотой в эксплуатации и низкой стоимостью. Устройство является универсальным и обеспечивает формирование покрытий из металлических и керамических материалов. Проведенные исследования показали эффективность раз-



Рис. 7. МКДУ, установленная в стандартном боксе на «руке» робота и используемая для напыления керамического покрытия на цилиндрическую поверхность

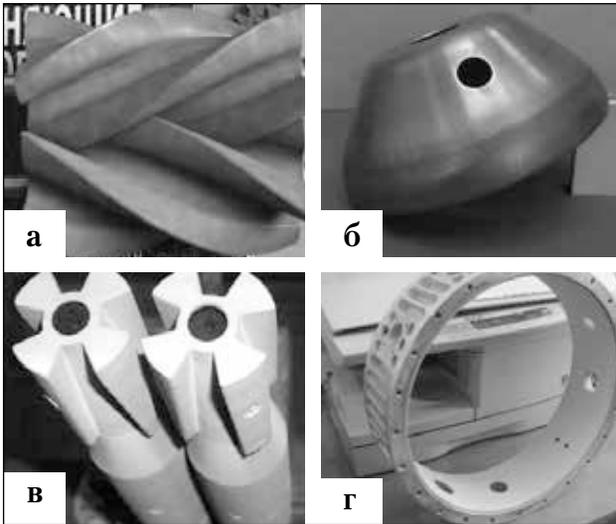


Рис. 8. Детали, напыленные порошком AMPERIT 554.074 WC+12 %CoCr на установке с горизонтальным закреплением устройства (а, б) и порошком AMPERIT 740.0 Al₂O₃; на руке робота (в, г): а) ротор высокоскоростного компрессора; б) направляющий ролик для металлургии; в) корпус геофизического прибора; г) корпус авиационного двигателя

работанного устройства и высокое качество получаемых покрытий различного назначения. МКДУ обеспечивает коэффициент использования материалов 80%—для металлокерамических и 50–60%—керамических порошков. Расход компонентов горючей смеси—0,6–1,2 м³/ч пропана и 2,0–5,0 м³/ч кислорода. Производительность МКДУ: до 3 кг/ч—металлы, 2 кг/ч—металлокерамика и 1 кг/ч—керамика.

Исходя из изложенного выше, можно сделать следующие выводы:

1. Разработано бесклапанное МКДУ для газотермического напыления, работающее с частотой 20 Гц и выше. Это повысило надежность самой конструкции и эффективность технологии нанесения покрытий в целом по сравнению с традиционными устройствами детонационного напыления.

2. В МКДУ используются принципы пересжата детонационного режима сгорания. Специальная геометрия форкамеры позволила сократить участок перехода горения в детонацию. Использование второй камеры привело к формированию дополнительного ударного фронта и к значительному увеличению амплитуды давления в стволе устройства. На выходе из ствола давление продуктов сгорания достигало 20 атм.

3. Использование второй камеры позволило поднять скорость продуктов сгорания в стволе устройства на 35%. Максимум скорости напыляемого порошка Al₂O₃ дисперсностью 5,6–22,5 мкм, достигал 1200 м/с.

4. На базе МКДУ разработаны и созданы установки для газотермического напыления покрытий

различного функционального назначения. Установки комплектуются различными манипуляторами, стандартным оборудованием и оригинальными узлами, позволяющими напылять порошки с различными физическими свойствами на изделия со сложной конфигурацией поверхности.

Литература

1. Er. Turunen, T. Varis, T. E. Gustafsson, J. Keskinen, T. Fa.lt, Simo-PekkaHannula Parameter optimization of HVOF sprayed nanostructured alumina and alumina–nickel composite coatings // *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, Iss. 16–17, 27.04.2006, P. 4987–4994.
2. Wielage B., Rupprecht C., Paczkowski G., Menzen R., Weissenfels G., Bernhardt H.— U. and Runkel M.A new way in HVOF technology—CFD optimized TOPGUN® AIRJET for powder and wire. // *Proc. ITSC2008 Intern. Thermal Spray Conf. Maastricht, Netherlands, 2008*, P. 147–152.
3. V. Ulianitskii, A. Shtertser, S. Zlobinand, I. Smurov: Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications. *J. Therm. Spray Technol.*, 20 (2011), Iss. 4, pp. 791/801.
4. T. Endo, R. Obayashi, T. Tajiri, K. Kimura, Y. Morohashi, T. Johzaki, K. Matsuoka, Hanafusa, S. Mizuna Thermal Spray Using a High-Frequency Pulse Detonation Combustor Operated in the Liquid-Purge Mode *J. of Thermal Spray Technology* February 2016, Vol. 25, Iss. 3, P. 494–508.
5. M. Parco, G. Barykin, I. Fagoaga and C. Vaquero Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD // *Proc. ITSC2008 Intern. Thermal Spray Conf. Maastricht, Netherland, 2008*, P. 142–146.
6. Tyurin Y.N., Pogrebnjak A.D. Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposition. *Surface and Coatings Technology*.— 111. (1999). P. 269–275.
7. Пат. (11) 83831 Украина. Способ детонационного напыления покрытия и устройств для его выполнения / Ю.Н. Тюрин, О.В. Колиснеченко: Заявитель и патентовладелец Ю.Н. Тюрин, О.В. Колиснеченко. — № а 2000510593; заявл. 09.11.2005; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.
8. Kovaleva M., Tyurin Yu., Vasilik N., Kolisnichenko O., Prozorova M., Arsenko M. Deposition and characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator. *Surfaceand Coatings Technology* 232 (2013), P. 719/725.

Сварка металлов и сплавов трением. Особенности образования соединения при конвенционном и инерционном процессах*

Г. И. Лашенко, канд. техн. наук, НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» НАНУ (Киев)

Наибольшее промышленное применение получили конвенционная (обычная) и инерционная сварка трением. В общем случае трением называют сопротивление, возникающее между двумя соприкасающимися под действием сжимающей нагрузки P телами при относительном их перемещении в плоскости касания [9]. При этом силу сопротивления (направленную в сторону, противоположную сдвигающему усилию) называют силой трения $F_{тр}$.

Процесс трения характеризуется коэффициентом трения и износом. Коэффициентом трения f называют отношение силы трения $F_{тр}$ к величине сжимающей тело нагрузки P :

$$f = F_{тр} / P$$

В первом приближении силу трения $F_{тр}$ рассматривают как сумму двух ее составляющих — адгезионной (F_a) и деформационной (F_d):

$$F_{тр} = F_a + F_d$$

Деформационная составляющая является результатом деформирования микровыступов при относительном тангенциальном смещении поверхностей контактирующих тел, которое происходит в пределах приповерхностного слоя определенной толщины. Сопротивление такому деформированию, зависящее от прочности материала, называют деформационной составляющей силы трения (F_d).

Силы сопротивления, возникающие в результате формирования металлических связей на фактической площадке контакта (на вершинах микровыступов) называют адгезионной составляющей (F_a). Обе составляющие взаимосвязаны между собой, и поэтому простое арифметическое их суммирование можно использовать лишь для приближенной оценки величины силы трения.

Что касается коэффициента трения, то он не постоянен и зависит от большого числа факторов.

Необходимо подчеркнуть, что при трении всег-

да происходит постепенное разрушение (износ) поверхностей скольжения. Поэтому износостойкость металлов наряду с коэффициентом трения являются важной количественной характеристикой определенной пары деталей. В то же время не выявлено определенной взаимосвязи между упомянутыми характеристиками трения.

Исследовавшими процесс И. В. Крагельским, И. Э. Виноградовой, Б. И. Костецким, И. Г. Носовским и др. установлено, что как на коэффициент трения, так и на износ влияют следующие факторы:

- природа материала (механические свойства, теплостойкость, степень химического сродства к кислороду);
- состояние поверхностей (шероховатость, наличие окисных и адсорбционных пленок);
- конструкция и схема узла трения (постоянный или периодический контакт);
- жесткость и упругость, а также температурный режим узла трения;
- внешняя среда;
- скорость относительного скольжения;
- величина и характер нормального давления;
- время протекания процесса.

Отметим, что некоторые из упомянутых выше факторов проявляются только при взаимодействии с другими. Так, например, состояние поверхностей и температурный режим узла трения со временем меняются, действие внешней среды также зависит от времени и т.д. [10].

С изменением температуры поверхности изменяются адгезионная (молекулярная) и деформационная составляющие силы трения.

Уменьшение молекулярной составляющей при увеличении температуры объясняют снижением вязкости так называемого третьего тела, которое практически всегда присутствует на поверхности трения.

Деформационная составляющая коэффициента трения с изменением температуры проявляется неоднозначно: с одной стороны снижение твердости материала с ростом температуры способствует более глубокому взаимному проникновению ми-

* Продолжение публикации серии статей «Сварка металлов и сплавов трением». Начало в № 1, 2–2017

кровыступов, что влечет за собой увеличение силы трения, а с другой — уменьшает ее благодаря снижению сопротивления деформированию материала при повышении температуры.

При температурах в контакте более $(0,2-0,3) T_{пл}$ внешнее трение прекращается и начинается интенсивное схватывание поверхностей трения.

В общем случае с увеличением давления коэффициент трения возрастает. В области давлений, свойственных режимам сварки трением, эта зависимость линейная.

Влияние скорости скольжения на коэффициент трения может быть представлено в виде формулы [11]:

$$f = (a + b \cdot v) \cdot e^{-cv} + d,$$

где a, b, c, d — коэффициенты, зависящие от нормального давления, свойств материала, состояния поверхностей и др. факторов; v — линейная скорость скольжения; e — основание натурального логарифма.

Функция, представленная данным выражением, имеет максимум, положение которого по оси абсцисс определяется соотношением численных значений названных коэффициентов. Смещение максимума под влиянием изменения нормального давления приводит к тому, что в одном и том же интервале скоростей, но при разных давлениях, коэффициент трения может увеличиваться, либо уменьшаться, либо же оставаться практически неизменным (рис. 10). Сварке трением свойственны большие нагрузки, которым соответствуют кривые 3 и 4 на рис. 10. Любые пленки препятствуют схватыванию, поэтому они уменьшают износ и снижают коэффициент трения.

Молекулы поверхностно-активных веществ

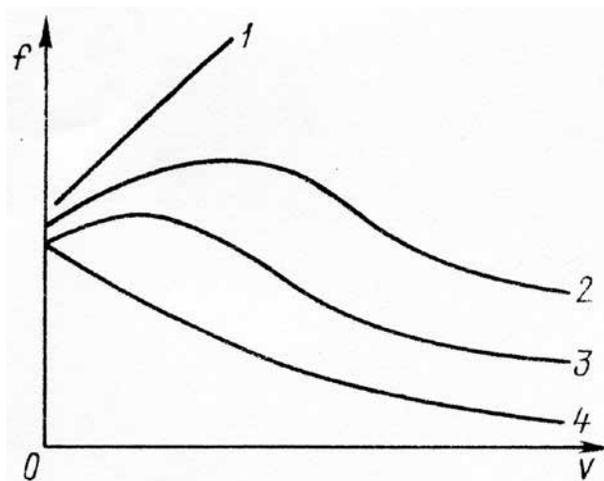


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения: 1 — малая нормальная нагрузка; 2, 3 — средняя нагрузка; 4 — большая нагрузка

(ПАВ) могут в процессе адсорбции проникать в поверхностные трещины материала и химически взаимодействовать с ним («расклинивать» трещины), способствуя увеличению хрупкости поверхностных слоев металла. В результате деформирования этих слоев уменьшается деформационная составляющая силы трения, а вместе с ней и коэффициент трения.

Необходимо подчеркнуть, что первоначальное состояние поверхностей в процессе трения может коренным образом меняться не только в зависимости от скорости скольжения, давления, но и под воздействием внешней среды.

Б.И. Костецкий предложил классификацию [12], согласно которой основными видами износа при трении скольжения являются: износ схватыванием I рода (атермическое схватывание), окислительный износ, износ схватыванием II рода (тепловой износ), абразивный износ.

В процессе изучения механизма трения было выявлено огромное влияние внешней газовой среды на закономерность развития основных видов изнашивания. Подтвердилась важнейшая роль кислорода и др. газов в процессе трения (рис. 11).

И.Г. Носовский пришел к выводу, что при трении, когда процесс диффузии кислорода из окружающей среды в глубь пластически деформирующей

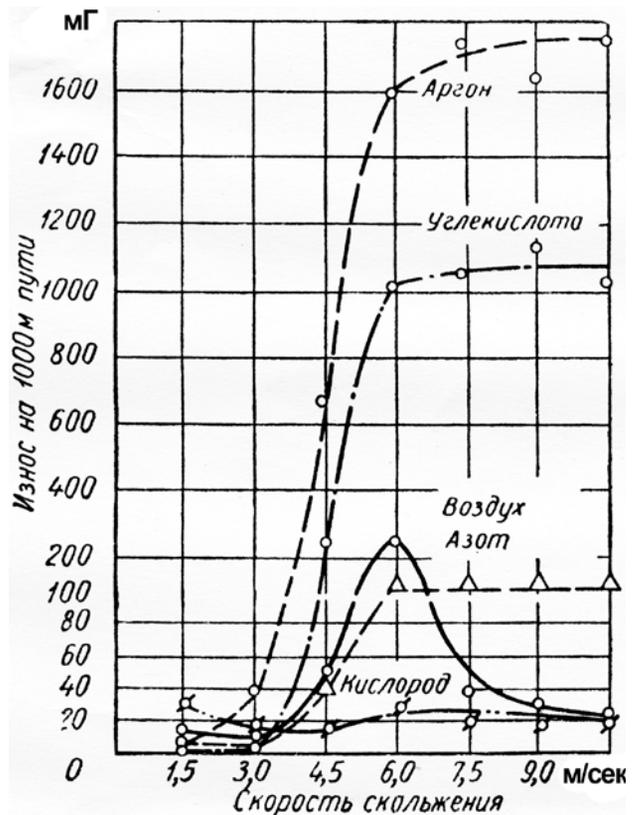


Рис. 11. Зависимость весового износа от скорости скольжения при работе в различных газовых средах для стали 45. Удельное давление: $0,98 \text{ Мн/м}^2$

щихся слоев металла достаточно интенсивен, адсорбция идет энергично и на поверхности металла образуются слои различных соединений кислорода с металлом. В таком случае происходит разрушение на поверхностных слоях чистого металла окисных слоев, образующихся в результате взаимодействия металла с диффундирующим кислородом, т.е. происходит окислительный износ. Вследствие отсутствия или недостаточной интенсивности процессов диффузии кислорода в поверхностные слои металла при трении будет происходить износ схватыванием I или II рода, когда разрушается сам металл и темп износа значительно больше, чем при окислительном износе [12].

Коэффициент трения в большей степени зависит также от внешней газовой среды. Наличие на поверхностях трения пленок окислов и твердых растворов кислорода в металле влияет в значительной степени и на температуру поверхностей трения. В процессе трения в среде воздуха максимальная температура (350–400 °С) наблюдалась при тепловом изнашивании.

В случае отсутствия условий образования на поверхностях трения продуктов окисления (при трении в среде аргона и углекислого газа) эти поверхности нагревались до 1200–1300 °С [12]. Такие температуры создают условия для схватывания и сваривания трущихся поверхностей.

Изменение скорости относительного скольжения трущихся поверхностей вызывает постепенное изменение структурного и фазового состояния металла поверхностных слоев, при определенной величине скорости приводящим к скачкообразным изменениям состояний и свойств металла. Это в свою очередь вызывает коренные изменения скоростей процессов, происходящих при трении (окисление, схватывание и др.).

Изменение же скоростей процессов на трущихся поверхностях приводит к качественно различным видам и стадиям износа и, соответственно, к изменениям его количественных показателей (рис. 12) [12].

Изменение величины износа с увеличением скорости, как показали металлографические исследования, связано с качественными изменениями процессов трения (вида износа).

В диапазоне скоростей скольжения примерно от 0,4 до 2,0 м/с, происходят процессы схватывания в глубине металла (износ схватывания I рода). Коэффициент трения при износе схватыванием I рода максимальный. Поверхностные слои металла пластически деформируются и упрочняются на значительную глубину, их температура повышается до 80–90 °С. Дальнейшее увеличение скорости скольжения

(2,0–3,5 м/с) вызывает интенсивное окисление трущихся поверхностей, что приводит к окислительному износу. Износ при этом становится минимальным (рис. 12). Коэффициент трения при окислительном изнашивании находится в пределах 0,3–0,7.

Еще большее увеличение скорости скольжения снова вызывает схватывание, но уже при высоких температурах поверхностей (тепловой износ). Начало теплового износа связано с нагревом трущихся поверхностей до критической температуры (для стали 300–320 °С). Нагрев поверхностей может происходить мгновенно до температуры 1240 °С.

Установлено, что тепловому износу подвержены почти все технические металлы и сплавы [12]. Тепловой износ возможен даже при наличии смазки, но его начало смещается в сторону значительно больших скоростей. Схватывание I рода наблюдается далеко не у всех материалов, поэтому и зависимости характеристик трения от скоро-

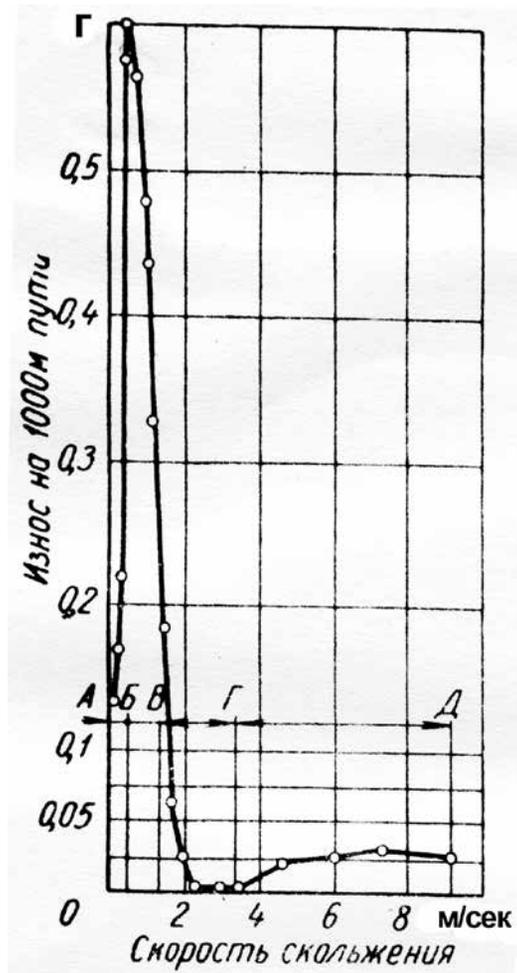


Рис. 12. Зависимость величины износа от скорости скольжения при сухом трении торца цилиндрического образца (сталь 10) по диску (сталь 40Х). Удельное давление: 0,98 Мн/м². АБ – область окислительного износа, БВ – область износа схватыванием I рода, ВГ – область окислительного износа, ГД – область теплового износа

сти скольжения для разных металлов получаются разными. Границы перехода от одного вида износа к другому для одних и тех же трущихся пар металлов не остаются постоянными, а смещаются в большую или меньшую сторону величины скорости при изменении таких факторов, как внешняя среда, схема трения, размеры образцов, величина и характер давления.

П.Е. Топехой было установлено, что при одной и той же скорости скольжения с увеличением удельного давления интенсивность износа вначале растет плавно, а при некотором значении давления резко возрастает.

Как показали металлографические исследования такое резкое возрастание величины износа связано с изменением вида износа. Окислительный износ переходит в тепловой [12].

Плавное нарастание поверхностной температуры приводит к увеличению интенсивности износа. При достижении критической температуры происходит качественное изменение процессов трения.

Отметим, что приведенные выше сведения из теории трения и полученные экспериментальные результаты направлены на решение таких практически важных задач, как сокращение тепловыделения в узлах трения, создание условий, препятствующих заеданию, схватыванию поверхностей трения и т.п. Как видим, эти задачи прямо противоположны тем, которые необходимо решать при сварке трением. Кроме того, область режимов, изучаемых наукой о трении, лишь граничит, но не совпадает с режимами, используемыми при сварке трением. И, тем не менее, рассмотрение закономерностей процесса сварки трением базируется на основах, разработанных наукой о трении.

Образование соединения при конвенционной и инерционной сварке трением. Наиболее полно процесс образования соединения изучен применительно к конвенционной (традиционной) сварке трением сплошных сечений по схеме при которой две детали, подлежащие сварке, устанавливаются соосно в зажимах машины: одна из них неподвижна, а другая приводится во вращение вокруг их общей оси. На сопряженных торцевых поверхностях деталей, прижатых одна к другой осевым усилием, возникают силы трения. Работа, затрачиваемая при относительном вращении свариваемых заготовок на преодоление этих сил трения, преобразуется в тепло, которое выделяется на поверхности трения и нагревает прилегающие к ним тонкие слои металла до температур, необходимых для образования сварного соединения (при сварке, например, черных металлов температура в стыке достигает 1000–1300 °С).

Таким образом, в стыке действует внутренний источник тепловой энергии, вызывающий быстрый локальный нагрев небольших объемов металла. Выделяемая в нем мощность определяется из выражения:

$$N = F_{\text{тр}} \cdot V = f \cdot P \cdot V$$

Так как коэффициент трения f — функция скорости скольжения V и нормальной нагрузки P , мощность N нельзя рассматривать как линейную функцию P и V . Коэффициент трения f в общем случае функция многих переменных. При сварке трением данной пары металлов и сплавов он зависит от температуры на поверхности трения, давления, скорости относительного движения в рассматриваемой точке этой поверхности. Средний по сечению коэффициент трения изменяется также, как и момент [1].

Характер изменения тепловой мощности, момента действующих сил и температуры в процессе сварки различных материалов обычно устанавливается экспериментальным путем. На контактных поверхностях при сварке трением происходят следующие процессы: удаление загрязнений; изнашивание приповерхностных слоев заготовок; разрушение оксидных пленок; пластическое течение металла; упрочнение и разупрочнение поверхностных слоев; быстрый нагрев и охлаждение, вызывающие фазовые превращения; перенос металла с одной заготовки на другую и образование между контактными поверхностями твердых «клиньев», сформированных из срезанных микронеровностей и имеющих тенденцию к росту за счет переноса металла.

В результате взаимного наложения ряда названных выше явлений получается сложная картина течения конвенционной сварки трением при кажущейся простоте этого способа. Циклограмма на рис. 13 (вверху) показывает изменение во времени основных параметров процесса — частоты вращения n и осевого усилия F . Ниже показаны характерные кривые изменения во времени момента $M(t)$, потребляемой мощности $N(t)$, осадки (сближения свариваемых заготовок по мере вытеснения из стыка пластифицированного металла) $\Delta l(t)$, а также температуры $T(t)$.

Весь процесс конвенционной сварки трением делится на несколько временных фаз. В первой фазе (τ_1) происходит начальная притирка поверхностей, разрушаются жировые пленки, в контакт вступают отдельные микровыступы и начинается их деформация, возникает сухое трение. С увеличением частоты вращения момент трения покоя $M_{0\text{max}}$ уменьшается.

Вторая фаза (τ_2) — лавинообразное увеличение

числа взаимодействующих микровыступов, увеличение фактической площади контакта, быстрый рост температуры T в стыке, снижение предела текучести металла и его сопротивления деформации. Момент трения к концу второй фазы достигает максимального значения ($M_{1\max}$), появляется тонкий слой пластифицированного металла, выполняющего роль смазочного материала.

В третьей фазе (τ_3) происходит повышение температуры металла, спад момента трения и начинается образование грата. К концу третьей фазы температура в стыке достигает почти максимального значения, а момент трения, мощность тепловыделения и скорость осадки стабилизируются.

Четвертая фаза (τ_4) характеризуется квазистационарным течением процесса трения. При этом параметры процесса носят установившийся характер: момент трения ($M_{уст}$), мощность тепловыделения ($N_{уст}$), температура в стыке, скорость осадки. Контактные поверхности подготовлены к образованию сварочного соединения.

Пятая фаза (τ_5) — торможение. Под влиянием уменьшения частоты вращения быстро нарастает коэффициент и момент трения ($M_{2\max}$), менее интенсивно увеличивается мощность тепловыделения. В самом конце пятой фазы, когда частота вращения приближается к нулю, мощность почти мгновенно падает, начинается уменьшение темпе-

ратуры в стыке и образуется сварное соединение.

Шестая фаза (τ_6) — стадия проковки: образовавшееся соединение подвергают сжатию осевым усилием, которое в этой фазе либо остается на прежнем (как в стадии нагрева) уровне, либо может быть увеличено. Обычно стадия проковки длится несколько секунд, после чего сваренную деталь освобождают из зажимов машины и далее соединение продолжает охлаждаться в естественных условиях.

Основным отличием инерционной сварки трением от конвенциональной является нагрев места сварки при спадающей частоте вращения шпинделя, что предопределяет технологические особенности этого процесса. На рис. 14 приведены сравнительные характеристики параметров для конвенциональной и инерционной сварки трением. Из показанных на рисунке зависимостей момента (M), мощности (N), давления (P), угловой скорости (ω) и температуры (T) как функций времени видно, что инерционная сварка трением отличается от конвенциональной более «жестким» режимом. Время выполнения инерционной сварки значительно меньше, а средняя удельная мощность тепловыделения несравненно больше, чем при конвенциональной, за счет чего сужается зона термического влияния и снижаются затраты энергии на образование сварного соединения.

Как отмечалось выше, тепловыделение по поверхности трения непостоянно и зависит от фаз течения процесса, параметров режима, диаметра и материала свариваемых заготовок.

В процессе трения пластичный металл стыка выдавливается в радиальных направлениях под воздействием осевого усилия и тангенциальных сил, возникающих в стыке при вращении одной детали относительно другой. Выдавленный металл (грат) имеет характерную для сварки трением форму сдвоенного правильного кольца, расположенного по обе стороны плоскости стыка.

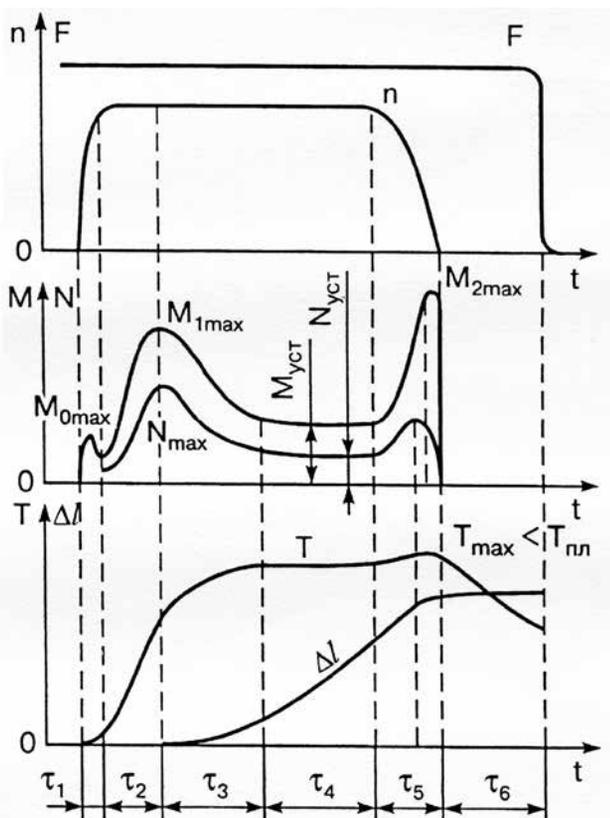


Рис. 13. Циклограмма процесса сварки трением

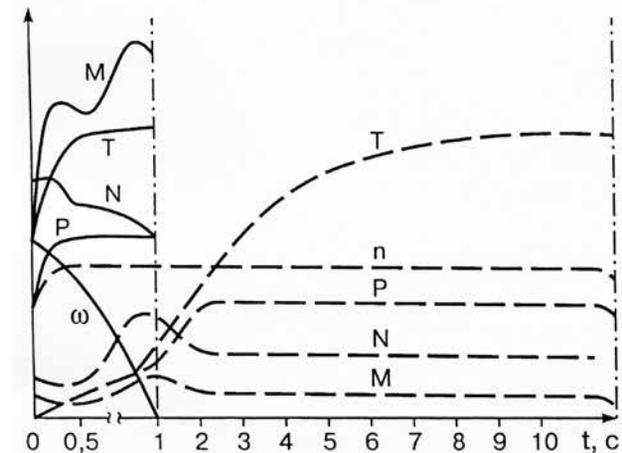


Рис. 14. Сравнительные характеристики параметров инерционной и конвенциональной сварки трением

При выдавливании пластичного металла из стыка в радиальных направлениях хрупкие окисные пленки, покрывающие торцевые поверхности соединяемых деталей до начала сварки, разрушаются, а их обломки, а также продукты сгорания адсорбированных жировых пленок и другие инородные включения вместе с металлом удаляются из стыка в грат.

Нагрев прекращается путем быстрой (практически мгновенной) остановки относительного вращения. При этом в контакте оказываются очищенные торцевые поверхности соединяемых деталей, металл которых доведен до состояния повышенной пластичности. Для получения прочного соединения достаточно такой подготовленный к сварке металл подвергнуть сильному сжатию — проковать. Этого достигают с помощью продолжающего еще некоторое время действовать осевого усилия.

Таким образом, прочность образуемого сварного соединения непосредственно связана как с величиной пластического деформирования концов свариваемых деталей, так и с режимом проковки.

В свою очередь, степень пластического деформирования зависит от введенной в свариваемые детали энергии, величины осевого усилия и некоторых других факторов.

Основными параметрами процесса сварки трением являются: частота относительного вращения свариваемых деталей, величина осевого усилия при нагреве, величина осадки при нагреве, величина осевого усилия проковки, длительность приложения усилия проковки.

Первые два параметра определяют мощность нагрева, а в сочетании с третьим — величину введенной погонной энергии при нагреве. Правильный выбор всех параметров процесса определяет качество сварного соединения.

При сварке трением формируется своеобразная структура металла стыка [13]. Если при сварке плавлением величина зерна в стыке значительно больше, чем в основном металле, то в соединениях, выполненных сваркой трением, наблюдается обратная картина: в металле стыка зерно получается равноосное и в 10–30 раз мельче зерна основного металла; в зонах термического влияния при сварке трением также не наблюдается заметного роста зерна.

К возможным причинам наблюдаемых явлений относят:

- механическое измельчение (перетираание) зерна в процессе трения;
- дробление зерен в процессе износа поверхностей трения при вырывании частиц из приповерхностного слоя металла;
- кратковременность температурных воздействий

и высоких скоростей охлаждения малых объемов металла, нагретого выше точек превращений.

Не исключают также образование тонких структур (наноструктур) в результате комбинированного совместного воздействия высоких температур и давлений — своеобразной термомеханической обработки металла.

Отсутствие макродефектов в стыке объясняют тем, что все инородные тела, покрывающие поверхности трения деталей до сварки, в результате пластической деформации металла разрушаются и выдавливаются в радиальных направлениях и в контакт вступают чистые слои металла.

Окисные пленки, всегда покрывающие металлические поверхности, в процессе трения, нагрева и деформации металла разрушаются и удаляются из зоны стыка в грат вместе с другими инородными включениями. Особенностью сварки трением является и то, что на протяжении всего времени нагрева, а затем и проковки стык закрыт, поверхности трения достаточно плотно прилегают одна к другой и окисления их в процессе нагрева не происходит.

Необходимо подчеркнуть, что макро- и микроструктурные особенности сварных соединений, выполненных сваркой трением, выгодно отличаются от таковых при других способах сварки (например, сварки плавлением).

Однако в соединениях, выполненных с нарушением режимов сварки, могут образоваться такие дефекты, как непровар середины (центра) сечения, кольцевой непровар по периферии сечения, снижаться прочностные и другие эксплуатационные характеристики, связанные с резким искривлением текстуры проката в зоне соединения [13, 14].

Поэтому и при сварке трением применяют различные способы контроля качества соединений.

Литература

9. Крагельский И. В., Виноградов И. Э. Коэффициент трения. — М.: Машиностроение, 1962. — 213 с.
10. Михин Н. М. Температура контактирующих тел. Трение, износ и смазка: Справочник Т. 1. — М.: Машиностроение, 1978. — 400 с.
11. К вопросу о расчетной оценке режимов сварки давлением / М. Х. Шоршоров, Ю. Л. Красулин, А. М. Дубасов и др. // Сварочное пр-во. 1967. — № 7. — С. 14–17.
12. Костецкий Б. И. Сопrotивление изнашиванию деталей машин. — Москва-Киев.: Машгиз. 1959. — 220 с.
13. Виль В. И. Сварка металлов трением. — Л.: Машиностроение, 1970. — 176 с.
14. Вавилов А. Ф. Воинов В. П. Сварка трением. — М.: Машиностроение, 1964. — 155 с.

КПД газовых водонагревателей

Е.П. Шелепов, канд. техн. наук, ООО «Высокие технологии» (Москва)

Цеха по производству сварочных электродов являются потребителями горячей воды, которую получают с использованием водонагревателей. В статье рассмотрены источники водяных паров, поступающих в теплообменник, составлены четыре варианта тепловых балансов, дается развернутая оценка КПД водонагревателей, работающих на газообразном топливе. Проанализирована ошибка авторов, утверждающих, что КПД водонагревателя может быть больше 100%.

В состав вспомогательного оборудования электродных цехов входят водонагреватели, подающие горячую воду на технологические нужды, отопление, создание воздушных завес и бытовой водоразбор. В последнее время утверждается, что разработаны водонагреватели, КПД которых превышает 100% [1, 2], что вызывает недоумение у инженерно-технических работников электродных цехов. В работе [2] отмечена ошибка, приводящая к получению КПД более 100%, однако, в статье приведены лишь конечные результаты расчетов. Отсутствие промежуточных расчетов затрудняет понимание проблемы, кроме того, в статье не полностью учтены также влияющие на КПД энергозатраты. Поэтому целью данной работы является развернутая оценка КПД водонагревателей на основе представлений о происходящих физических процессах.

В указанных публикациях отмечено, что высокая тепловая эффективность достигается за счет конденсации водяных паров из уходящих газов. Традиционно в котельных установках температуру уходящих газов рассчитывают таким образом, чтобы избежать конденсации водяных паров. Это исключает коррозию поверхностей нагрева. Наряду с этим имеются водонагреватели, в которых осуществляется конденсация водяных паров, а теплообменники выполнены из коррозионностойких материалов. Охлаждение в них продуктов сгорания до температур, обеспечивающих конденсацию водяных паров, способствует снижению расхода топлива. Но возможно ли получить при этом КПД более 100%?

Газообразное топливо, наряду с др. составляющими, содержит водород H_2 и водородосодержащие компоненты: метан CH_4 , этилен C_2H_4 , тяжелые углеводороды C_mH_n , сероводород H_2S . При их сгорании выделяют водяные пары, на образование которых энергия не затрачивается [3].

Проходя тепловой агрегат, водяной пар либо остается в парообразном состоянии, либо конденсируется. Различают низшую теплотворную способ-

ность топлива $Q_{н}^P$, кДж/м³, когда образовавшийся при горении пар транзитом проходит через тепловой агрегат, не конденсируясь, и высшую $Q_{в}^P$, когда водяной пар, полученный без энергетических затрат, конденсируется в тепловом агрегате с выделением теплоты фазового превращения $g = 2493$ кДж/кг [4].

Имеется три источника поступления водяных паров в теплообменник: водяные пары, образующиеся от сгорания водородосодержащих компонентов газообразного топлива (источник 1), а также изначально содержащиеся как в газообразном топливе (источник 2), так и в дутьевом воздухе (источник 3). Рассмотрим каждый из них.

Источник 1. Рассуждения проведем на примере сгорания природного газа состава $CH_4 = 96,21\%$, $N_2 = 1,96\%$, $H_2 O^T = 1,83\%$ и теплотворной способности $Q_{в}^P = 38800$ кДж/м³, $Q_{н}^P = 34810$ кДж/м³: 1) величины, обозначенные буквами Q, G, V отнесены к 1 м³ сгоревшего природного газа; 2) плотность и объем водяных паров, природного газа, продуктов горения, уходящих газов приведены к нормальным физическим условиям (0 °С и 101,3 кПа).

Пар, образовавшийся при сгорании 1 м³ природного газа, будет содержать теплоту фазового превращения: $Q_{фаз}^{гор} = Q_{в}^P - Q_{н}^P$, кДж/м³, а его количество составит $G_{пар}^{гор} = Q_{фаз}^{гор} / g$, кг/м³.

Источник 2. Та влага, которая изначально входит в состав газообразного топлива, является балластом и не участвует в процессе горения. Эта влага поступает в виде пара и содержит в себе теплоту фазового превращения (парообразования). Количество водяных паров, содержащихся в 1 м³ топлива $G_{пар}^T = H_2 O^T \cdot \rho_{пар} / 100$, кг/м³; здесь: $\rho_{пар}$ – плотность пара, кг/м³.

Количество теплоты, вносимое влагой топлива, содержащейся в 1 м³ природного газа ($Q_{пар}^T$), может быть выражено в виде двучлена, суммирующего теплоту парообразования при 0 °С ($Q_{фаз}^T$) и теплоту перегрева паров от 0 °С до температуры природного газа t_T ($Q_{пп}^T$) [5].

$$Q_{пар}^T = Q_{фаз}^T + Q_{пп}^T, \text{ кДж/м}^3$$

Источник 3. Влага, входящая в состав дутьевого воздуха, как и влага топлива, не участвует в процессе горения. Она также поступает в виде пара и уже содержит в себе теплоту парообразования. Объем водяных паров, содержащихся в воздухе, необходимым для сжигания 1 м³ природного газа ($V_{пар}^B$, м³/м³), определяется по методике [6]. Для этого необходимо знать влагосодержание воздуха (d_B , г/м³). В наших расчетах оно отнесено к 1 м³ сухого воздуха.

Тогда масса водяных паров, соответствующая объему $V_{\text{пар}}^B$, составит:

$$G_{\text{пар}}^B = V_{\text{пар}}^B \cdot \rho_{\text{пар}}, \quad \text{кг/м}^3,$$

а количество теплоты также выразится в виде двучлена, представляющего собой сумму теплоты парообразования при 0°C ($Q_{\text{фаз}}^B$) и теплоту перегрева паров от 0°C до температуры дутьевого воздуха t_B ($Q_{\text{пп}}^B$):

$$Q_{\text{пар}}^B = Q_{\text{фаз}}^B + Q_{\text{пп}}^B, \quad \text{кДж/м}^3$$

Суммарное количество влаги, содержащееся в продуктах горения при сгорании 1 м^3 природного газа:

$$G_{\text{пар}} = G_{\text{пар}}^{\text{гор}} + G_{\text{пар}}^T + G_{\text{пар}}^B, \quad \text{кг/м}^3$$

Исходное влагосодержание продуктов горения в расчете на 1 кг сухих продуктов горения $d_A = G_{\text{пар}} \cdot 1000 / G_{\text{сух}}^{\text{ух}}$, г/кг; где $G_{\text{сух}}^{\text{ух}}$, кг/м³ — масса сухих уходящих газов, определяется как результат расчета процесса горения [6].

Суммарная теплота парообразования, содержащаяся в продуктах горения при сгорании 1 м^3 природного газа:

$$Q_{\text{фаз}} = Q_{\text{фаз}}^{\text{гор}} + Q_{\text{фаз}}^T + Q_{\text{фаз}}^B, \quad \text{кДж/м}^3.$$

В ходе дальнейшего анализа рассмотрим рекуперативный водонагреватель, с передачей теплоты через разделительную стенку (рис. 1). В него подаются природный газ и воздух. Продукты горения содержат водяные пары, как образовавшиеся в процессе горения $G_{\text{пар}}^{\text{гор}}$, так и поступающие с природным газом $G_{\text{пар}}^T$ и воздухом $G_{\text{пар}}^B$. Нагреваемая вода движется в противоточном направлении. Водяные пары в зависимости от соотношения расхода воды и продуктов горения, а также от теплопередающей площади могут проходить через теплообменник не конденсируясь, а могут и конденсироваться в большей или меньшей степени.

Уравнение теплового баланса, необходи-

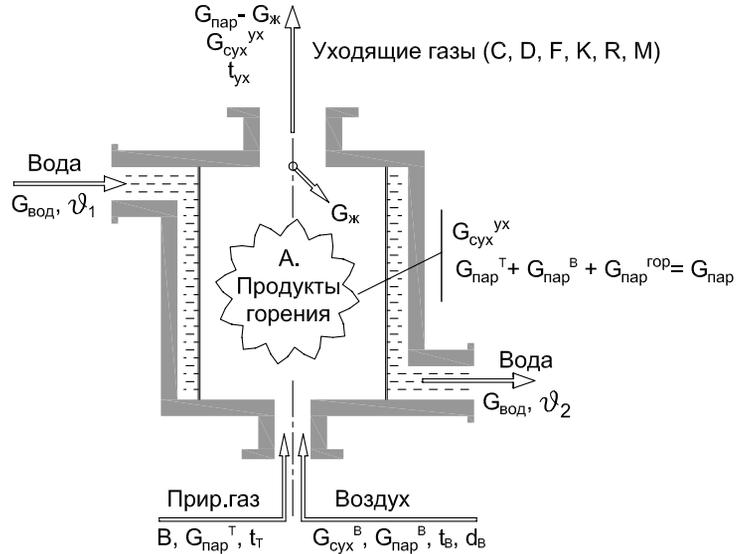


Рис. 1. Схема рекуперативного водонагревателя

мое для расчета расхода топлива ($B, V_p, V_y, \text{м}^3/\text{с}$), составлено при условии, что природный газ, воздух и продукты горения состоят из сухой части и отдельно учитываемых водяных паров. Тепловые составляющие отсчитываются от нулевой температуры.

Тепловой баланс водонагревателя выражается уравнением, связывающим приход и расход тепловой мощности (количества теплоты в единицу времени):

$$N_{\text{хт}} + N_{\text{фт}} + N_{\text{в}} + N_{\text{вод 1}} = N_{\text{вод 2}} + N_{\text{ух}} + N_{\text{ос}}, \quad \text{кВт} \quad (1)$$

где $N_{\text{хт}}$ — тепловая мощность химической теплоты топлива, кВт; $N_{\text{фт}}$ — тепловая мощность физической теплоты топлива, кВт; $N_{\text{в}}$ — тепловая мощность, вносимая воздухом, кВт; $N_{\text{вод 1}}$, $N_{\text{вод 2}}$ — тепловая мощность подаваемой и нагретой воды, кВт; $N_{\text{ух}}$ — тепловая мощность уходящих газов, кВт; $N_{\text{ос}}$ — тепловая мощность потерь в окружающую среду, кВт.

Конкретное содержание ряда составляющих теплового баланса ($N_{\text{хт}}, N_{\text{фт}}, N_{\text{в}}, N_{\text{ух}}$) может содержать в себе разное физическое наполнение. Поэтому рассмотрим четыре варианта теплового баланса — полный сухой, традиционный сухой, рекламный и универсальный (таблица) и соответствующие этим балансам расходы топлива и КПД.

Таблица. Тепловые балансы

Статьи баланса	Полный сухой	Традиционный сухой	Рекламный	Универсальный
Приход, кВт				
$N_{\text{хт}}$	$B(Q_{\text{н}}^P + Q_{\text{фаз}}^{\text{гор}})$	$BQ_{\text{н}}^P$	$B_p(Q_{\text{н}}^P + Q_{\text{фаз}}^{\text{гор}})$	$B_y(Q_{\text{н}}^P + Q_{\text{фаз}}^{\text{гор}})$
$N_{\text{фт}}$	$B(Q_{\text{сп}}^T + Q_{\text{фаз}}^T)$	$BQ_{\text{сп}}^T$	$B_p(Q_{\text{сп}}^T + Q_{\text{фаз}}^T)$	$B_y(Q_{\text{сп}}^T + Q_{\text{фаз}}^T)$
$N_{\text{в}}$	$B(Q_{\text{сп}}^B + Q_{\text{фаз}}^B)$	$BQ_{\text{сп}}^B$	$B_p(Q_{\text{сп}}^B + Q_{\text{фаз}}^B)$	$B_y(Q_{\text{сп}}^B + Q_{\text{фаз}}^B)$
$N_{\text{вод 1}}$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_1$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_1$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_1$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_1$
Расход, кВт				
$N_{\text{вод 2}}$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_2$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_2$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_2$	$G_{\text{вод}} C_{\text{вод}} \mathbf{U}_2$
$N_{\text{ух}}$	$B(Q_{\text{сух}}^{\text{ух}} + Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{пп}}^{\text{ух}})$	$B(Q_{\text{сух}}^{\text{ух}} + Q_{\text{пп}}^{\text{ух}})$	$B_p(Q_{\text{сух}}^{\text{ух}} + Q_{\text{фаз}}^T + Q_{\text{фаз}}^B + Q_{\text{пп}}^{\text{ух}})$	$B_y[Q_{\text{сух}}^{\text{ух}} + (1-n) Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{пп}}^{\text{ух}}]$
$N_{\text{ос}}$	$BQ_{\text{ос}}$	$BQ_{\text{ос}}$	$B_pQ_{\text{ос}}$	$B_yQ_{\text{ос}}$

Полный сухой тепловой баланс учитывает теплоту парообразования, полученную при горении, а также содержащуюся в топливе, воздухе и продуктах горения. В этом балансе конденсация водяных паров отсутствует. При рассмотрении полного сухого теплового баланса (*таблица*) отмечаем, что в его приходных статьях присутствуют тепловые мощности: $VQ_{\text{фаз}}^{\text{гор}}$, $VQ_{\text{фаз}}^{\text{T}}$, $VQ_{\text{фаз}}^{\text{B}}$. Эти же составляющие имеются и в расходных статьях баланса, т.е. в данном случае, когда конденсации водяных паров не происходит, эти статьи проходят транзитом, не влияя на результаты расчета расхода топлива.

Учитывая это, традиционный сухой тепловой баланс составляется без тепловых мощностей фазового превращения $VQ_{\text{фаз}}^{\text{гор}}$, $VQ_{\text{фаз}}^{\text{T}}$, $VQ_{\text{фаз}}^{\text{B}}$ [6]. В нем, также как и в полном сухом, конденсация водяных паров отсутствует. При этом он дает точно такие же результаты расчета, как и полный сухой: в обоих этих балансах для расчета расхода топлива, используется $Q_{\text{н}}^{\text{P}}$.

Рекламный тепловой баланс учитывает конденсацию водяных паров. Он составлен при следующих допущениях: пар в количестве $G_{\text{пар}}^{\text{гор}}$ сконденсировался полностью; пар, поступающий с исходным топливом $G_{\text{пар}}^{\text{T}}$ и воздухом $G_{\text{пар}}^{\text{B}}$, не сконденсировался. Эта часть пара проходит транзитом через теплообменник. Здесь используется $Q_{\text{в}}^{\text{P}}$. Рекламный тепловой баланс отображает частный случай работы теплообменника, поскольку сконденсироваться может количество пара большее или меньшее, чем $G_{\text{пар}}^{\text{гор}}$.

Произвольное количество сконденсированного пара ($G_{\text{ж}}$, кг/м³) учитывает универсальный тепловой баланс. В нем доля сконденсированного пара $n = G_{\text{ж}} / G_{\text{пар}}$ входит в статью баланса N_{yx} (*таблица*). В этом балансе $Q_{\text{в}}^{\text{P}}$ используется частично.

Распишем величины, входящие в таблицу:

$Q_{\text{сп}}^{\text{T}} = Q_{\text{сух}}^{\text{T}} + Q_{\text{пп}}^{\text{T}}$, где $Q_{\text{сух}}^{\text{T}}$ — количество теплоты, содержащейся в сухой части 1 м³ природного газа, кДж/м³;

$Q_{\text{сп}}^{\text{B}} = Q_{\text{сух}}^{\text{B}} + Q_{\text{пп}}^{\text{B}}$, где $Q_{\text{сух}}^{\text{B}}$ — количество теплоты, содержащейся в сухой части воздуха, необходимого для сжигания 1 м³ природного газа, кДж/м³;
 $N_{\text{вод}} = N_{\text{вод2}} - N_{\text{вод1}} = G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}} (U_2 - U_1)$ — полезная тепловая мощность, т.е. усвоенная водой, кВт;
 $G_{\text{вод}}$, $c_{\text{вод}}$ — расход и удельная теплоемкость воды, кг/с и кДж/кг · К; U_1 , U_2 — температура подаваемой и нагретой воды, °С. В данной работе $N_{\text{вод}}$ — величина постоянная.

$$Q_{\text{сух}}^{\text{yx}} = G_{\text{сух}}^{\text{yx}} \cdot c_{\text{сух}}^{\text{yx}} \cdot t_{\text{yx}}, \quad \text{кДж/м}^3 \quad (2);$$

$$Q_{\text{пп}}^{\text{yx}} = G_{\text{пар}} \cdot c_{\text{пар}} \cdot t_{\text{yx}}, \quad \text{кДж/м}^3 \quad (3);$$

количество теплоты, содержащейся в сухой части и в перегретом паре уходящих газов, образующихся при сжигании 1 м³ природного газа, кДж/м³;
 $c_{\text{сух}}^{\text{yx}}$, $c_{\text{пар}}$ — удельная теплоемкость сухих уходящих газов и пара, кДж/кг · К; t_{yx} — температура уходящих газов, °С. Выражения (2) и (3) записаны

для полного и традиционного сухих тепловых балансов, а для рекламного и универсального будут рассмотрены ниже.

$Q_{\text{ос}}$ — потери в окружающую среду, их приняли долей от $Q_{\text{н}}^{\text{P}}$ [4].

Выражение для расхода топлива применительно к полному и традиционному сухим тепловым балансам получаем подстановкой данных таблицы в уравнение (1):

$$V = N_{\text{вод}} / (Q_{\text{н}}^{\text{P}} + Q_{\text{сп}}^{\text{T}} + Q_{\text{сп}}^{\text{B}} - Q_{\text{сух}}^{\text{yx}} - Q_{\text{пп}}^{\text{yx}} - Q_{\text{ос}}) \quad (4)$$

Анализируя выражения (4) вместе с (2) и (3) отметим, что для условий полного и традиционного сухих балансов уменьшение температуры уходящих газов ведет к снижению расхода топлива, что и отмечено на *рис. 2* (точки С, D, F). При неизменном количестве теплоты, усвоенной водой, температура уходящих газов может быть снижена путем увеличения поверхности теплообмена (удлинением теплообменника).

Проследим изменение состояния уходящих из теплообменника влажных газов по мере снижения их температуры на $H-d$ диаграмме (*рис. 3*) (H — энтальпия влажных газов, кДж/кг сухих газов, d — их влагосодержание, г/кг сухих газов). Снижение температуры уходящих газов при отсутствии конденсации отображается линией АСDF, причем, $d_A = d_C = d_D = d_F$. При достижении температуры t_p уходящие газы полностью насыщаются водяными парами, т.е. возникает состояние, при котором в газе содержится максимально возможное количество влаги, но конденсация еще не началась. Здесь относительная влажность (φ) становится равной 100%, температура t_p называется температурой точки росы.

Продолжающееся охлаждение до точек К, R или M приведет к частичной конденсации водяных паров, при температурах насыщения $t_{\text{н}}^{\text{K}}$, $t_{\text{н}}^{\text{R}}$ или $t_{\text{н}}^{\text{M}}$. Разность влагосодержаний ($d_A - d_{\text{K}}$), ($d_A - d_{\text{R}}$) или ($d_A - d_{\text{M}}$) определяет количество сконденсированной в каждом случае влаги.

В рекламном тепловом балансе по сравнению с полным сухим меняется только статья N_{yx} (*таблица*). В ней: отсутствует теплота конденсации $Q_{\text{фаз}}^{\text{гор}}$ (она усвоилась в теплообменнике и заменила часть топлива); имеет место более глубокое охлаждение уходящих газов до температуры насыщения ($t_{\text{н}}^{\text{R}}$, *рис. 3*), что находит отражение в членах $Q_{\text{сух}}^{\text{yx}}$ и $Q_{\text{пп}}^{\text{yx}}$; количество пара в уходящих газах снизится до величины $G_{\text{пар}} - G_{\text{пар}}^{\text{гор}}$. Все это приводит к снижению расхода топлива.

Выражение для расчета расхода топлива применительно к рекламному тепловому балансу примет вид:

$$V_p = N_{\text{вод}} / (Q_{\text{н}}^{\text{P}} + Q_{\text{фаз}}^{\text{гор}} + Q_{\text{сп}}^{\text{T}} + Q_{\text{сп}}^{\text{B}} - Q_{\text{сух}}^{\text{yx}} - Q_{\text{пп}}^{\text{yx}} - Q_{\text{ос}}) \quad (5)$$

где: $Q_{\text{сух}}^{\text{yx}}$ и $Q_{\text{пп}}^{\text{yx}}$ вычисляются из выражений:

$$Q_{\text{сух}}^{\text{yx}} = G_{\text{сух}}^{\text{yx}} \cdot c_{\text{сух}}^{\text{yx}} \cdot t_{\text{н}}^{\text{R}}, \quad \text{кДж/м}^3 \quad (6)$$

$$Q_{\text{пп}}^{\text{yx}} = (G_{\text{пар}} - G_{\text{пар}}^{\text{гор}}) \cdot c_{\text{пар}} \cdot t_{\text{н}}^{\text{R}}, \quad \text{кДж/м}^3 \quad (7)$$

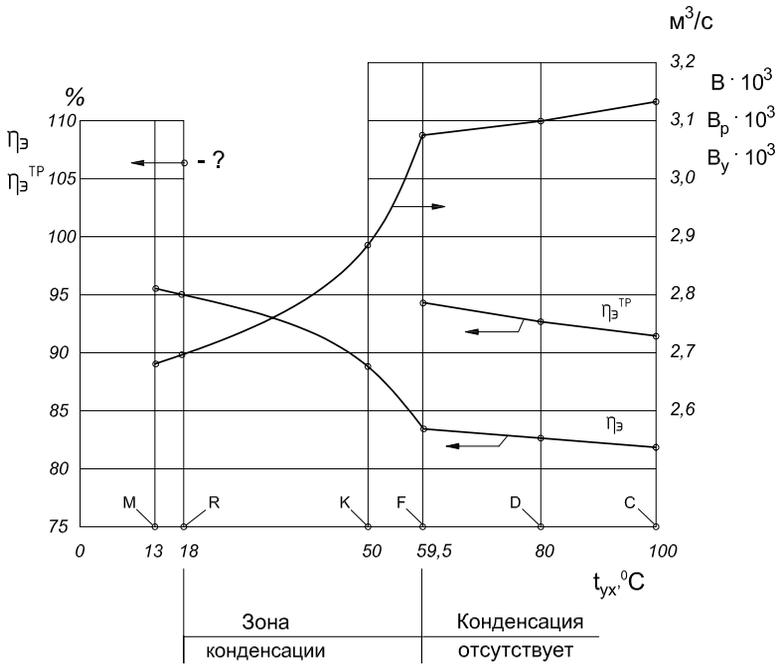


Рис. 2. Влияние температуры уходящих газов на расход топлива и КПД

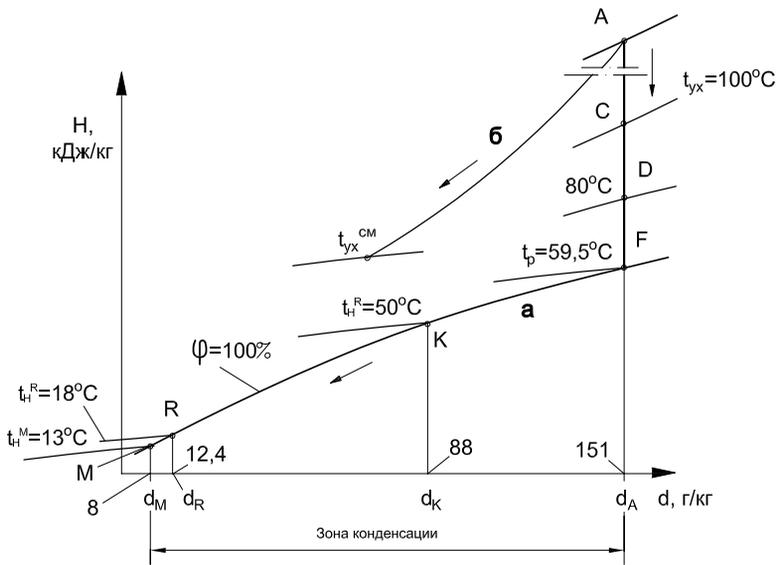


Рис. 3. Изменение состояния влажных продуктов горения при противотоке и при температуре воды ниже точки росы: а – рекуперативный; б – смешительный водонагреватели

В итоге, расход топлива существенно ниже, чем при отсутствии конденсации (точка R на рис. 2).

Универсальный тепловой баланс отличается от рекламного также составляющей N_{yx} . В ней член $(1-n)$ показывает долю пара от исходного его количества в уходящих газах, а член $(1-n) \cdot Q_{фаз}$ определяет теплоту фазового перехода, уносимую уходящими газами. Отсюда, расход топлива для универсального теплового баланса вычисляется по формуле:

$$V_y = N_{вод} / (Q_n^p + n \cdot Q_{фаз} + Q_{сп}^T + Q_{сп}^B - Q_{сух}^{yx} - Q_{шт}^{yx} - Q_{ос}) \quad (8)$$

Член $n \cdot Q_{фаз}$ в формуле (8) определяет теплоту конденсации, усвоенную в теплообменнике, эта теплота замещает часть топлива. Для вычисления n нужно знать количество сконденсирован-

ной влаги. Она определяется разницей между исходным влагосодержанием продуктов горения d_A и влагосодержанием уходящих газов, в нашем примере d_K (рис. 3):

$$G_{ж} = (d_A - d_K) G_{сух}^{yx} / 1000, \text{ кг/м}^3 \quad (9)$$

Количество пара в уходящих газах составит величину $G_{пар} - G_{ж}$. Температура уходящих газов, как и в случае с рекламным тепловым балансом, равна температуре насыщения t_n^K при влагосодержании уходящих газов d_K (рис. 3). Учитывая это, величины $Q_{сух}^{yx}$ и $Q_{шт}^{yx}$ в формуле (8) примут вид:

$$Q_{сух}^{yx} = G_{сух}^{yx} \cdot c_{сух}^{yx} \cdot t_n^K, \text{ кДж/м}^3 \quad (10)$$

$$Q_{шт}^{yx} = [G_{пар} - (d_A - d_K) G_{сух}^{yx} / 1000] \cdot c_{пар} \cdot t_n^K, \text{ кДж/м}^3 \quad (11)$$

В конденсационных режимах работы (точки K, R, M на рис. 2) расход топлива снижается более резко, чем при отсутствии конденсации (точки C, D, F).

Выражение (8) – универсально, т.е. справедливо для всех четырех приведенных здесь тепловых балансов. Так, если конденсация отсутствует ($n = 0$), то выражение (8) превращается в (4), которое справедливо для полного и традиционного сухих балансов. Далее, если $G_{ж} = G_{пар}^{гор}$, что имеет место в рекламном тепловом балансе, то $n = G_{пар}^{гор} / G_{пар} = G_{пар}^{гор} \cdot \gamma / G_{пар} \cdot \gamma = Q_{фаз}^{гор} / Q_{фаз}$ и выражение (8) превращается в (5), справедливое для рекламного теплового баланса. Естественно, что при $n = 0$ используются t_{yx} и d_A , а при $n = G_{пар}^{гор} / G_{пар}$ используются t_n^R и d_R .

Теплотехнический КПД, характеризующий тепловое совершенство водонагревателя, в общем виде определяется из выражения:

$$\eta_T = N_{вод} / (N_{xt} + N_{фт} + N_B) \quad (12)$$

Теплотехнический КПД не является объективным показателем при оценке всех энергозатрат, необходимых для функционирования водонагревателя. Для правильной оценки действительной энергоёмкости водонагревателя необходимо учитывать не только непосредственное потребление им топлива, но и сопутствующие затраты электроэнергии на тягу и дутье, на прокачку воды, на сжатие природного газа: при выработке сопутствующей электроэнергии имеют

место потери, которые тоже нужно учитывать [7]. В связи с этим пользуются понятием энергетического КПД водонагревателя, определяемого выражением:

$$\eta_{\text{э}} = N_{\text{вод}} / (N_{\text{хт}} + N_{\text{фт}} + N_{\text{в}} + N_{\text{с}} / \eta_{\text{вп}}) \quad (13)$$

где $N_{\text{с}}$ – сопутствующая потребляемая мощность, кВт; $\eta_{\text{вп}}$ – КПД при выработке и передаче электроэнергии.

Из выражений (12) и (13) видно, что $\eta_{\text{э}}$ всегда меньше $\eta_{\text{т}}$. Но не все авторы пользуются понятием $\eta_{\text{э}}$. Так, например, в работах [2, 8] водонагреватели оцениваются только с помощью $\eta_{\text{т}}$, что необоснованно показывает завышенную энергетическую эффективность теплообменников.

Полезная тепловая мощность $N_{\text{вод}}$, записанная в числителе выражения (13), неизменна для всех четырех тепловых балансов. Расшифровывая знаменатель (13), т.е. затратные статьи, с учетом таблицы, напомним, что расход топлива, подсчитанный для полного сухого и традиционного тепловых балансов одинаков. Однако величина КПД получается различной. Для традиционного теплового баланса в затратные статьи чисто формально, по аналогии с расчетом В, включают только $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ и выражение (13) принимает вид:

$$\eta_{\text{э}}^{\text{тп}} = N_{\text{вод}} / [V(Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{сп}}^{\text{т}} + Q_{\text{сп}}^{\text{в}}) + N_{\text{с}} / \eta_{\text{вп}}] \quad (14)$$

Полный сухой (также как рекламный и универсальный) тепловой баланс содержит в приходных статьях физически обоснованную теплоту фазового превращения $Q_{\text{фаз}}$. Поэтому КПД для этих трех балансов вычисляется по формуле:

$$\eta_{\text{э}} = N_{\text{вод}} / [V(Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{сп}}^{\text{т}} + Q_{\text{сп}}^{\text{в}}) + N_{\text{с}} / \eta_{\text{вп}}] \quad (15)$$

На рис. 2 в точках С, D, E представлены значения энергетического КПД: $\eta_{\text{э}}^{\text{тп}}$ – для традиционного теплового баланса, $\eta_{\text{э}}$ – полного сухого теплового баланса. Видно, что $\eta_{\text{э}}^{\text{тп}}$ примерно на 10% превышает $\eta_{\text{э}}$. Если вместо В подставить в формулу (15) $V_{\text{р}}$, то получим энергетический КПД для рекламного теплового баланса $\eta_{\text{э}}$ (точка R), а если вместо В подставить $V_{\text{у}}$, то получим энергетический КПД для универсального теплового баланса $\eta_{\text{э}}$ (точки С, D, E, K, R, M).

Авторы, утверждающие, что КПД может быть больше 1 (или 100%), ошибаются именно в этом месте. С одной стороны они рассчитывают $V_{\text{р}}$ с учетом теплоты конденсации $Q_{\text{фаз}}^{\text{гоп}}$ (что справедливо, см. рекламный тепловой баланс в таблице), а с другой – при расчете $\eta_{\text{э}}$ по формуле (15) не включают $Q_{\text{фаз}}$ в затратные статьи, а это является нарушением закона сохранения энергии. Важно отметить, что при расчете КПД промышленных печей и котельных установок в затратные статьи часто включают только $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$, пренебрегая теплотой фазового перехода $Q_{\text{фаз}}$. Такой прием существенно (примерно на 10%) завышает КПД.

В числовом примере расчета КПД берем ранее принятый природный газ и рекуперативный тепло-

обменник (рис. 1), который дополняем следующими исходными данными:

$$G_{\text{в}} = 0,604 \text{ кг/с}; v_2 - v_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{т}} = t_{\text{в}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}; d_{\text{в}} = 10 \text{ г/кг}; Q_{\text{ос}} = 0,03 Q_{\text{н}}^{\text{п}}; N_{\text{с}} / \eta_{\text{вп}} = 0,01 V Q_{\text{н}}^{\text{п}}$$

Температура уходящих газов и их влагосодержание в точках С, D, F, K, R, M приведены на рис. 3, а рассчитанные расход топлива и КПД – на рис. 2. Из этих данных видно, что по мере уменьшения температуры уходящих газов расход топлива снижается с $3,13 \cdot 10^{-3}$ до $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при отсутствии конденсации и более резко в зоне конденсации (о чем свидетельствует излом линии расхода топлива) – с $3,07 \cdot 10^{-3}$ до $2,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Одновременно $\eta_{\text{э}}$ повышается с 81,8% до практически предельных 95,5% (т.е. когда $v_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$). Для рекламного теплового баланса КПД равен 95,1%, а если использовать ошибочную методику, имеющую место в рекламных публикациях, то получим КПД равным 106,7%, что противоречит закону сохранения энергии. Результат ошибочного подсчета КПД показан на рис. 2 знаком «?».

В смесительных водонагревателях, использующих способ дробления воды на капли конденсация водяных паров из поступающего газа произойдет только в случае, когда температура воды ниже температуры точки росы [8]. Пройдя теплообменник, смесь газов приобретает температуру $t_{\text{yx}}^{\text{см}}$, превышающую температуру насыщения (рис. 3).

В смесительных водонагревателях с погруженными горелками продукты горения поступают в толщу воды. Газовые пузырьки при всплывании отдают теплоту воде и в случае, когда температура воды ниже температуры точки росы, происходит конденсация водяных паров из продуктов горения с передачей теплоты нагреваемой воде. Температура уходящих газов в таких теплообменниках на 1–5 °С выше температуры воды [4, 8].

Для смесительных водонагревателей справедливо универсальное уравнение теплового баланса (8) с той разницей, что во вспомогательных выражениях (10) и (11) вместо $t_{\text{н}}^{\text{к}}$ надо использовать $t_{\text{yx}}^{\text{см}}$. Энергетический КПД вычисляется по формуле (15). Тепловой КПД смесительных водонагревателей с дроблением воды на капли и с погруженными горелками в литературе оценивается в 95–96% [2, 8]. Значит, энергетический КПД будет несколько ниже и безусловно не превысит 100%.

Дополнительно поясним невозможность получения КПД выше 100%, используя обратный баланс [7, 9]. Приняв для упрощения рассуждений в выражении (15) $N_{\text{с}} = 0$, получим теплотехнический КПД для универсального теплового баланса $\eta_{\text{т}}^{\text{у}}$. Подставив в него значение $V_{\text{у}}$ из выражения (8), получим:

$$\eta_{\text{т}}^{\text{у}} = 1 - [Q_{\text{сух}}^{\text{yx}} + (1-n) \cdot Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{сп}}^{\text{yx}} + Q_{\text{ос}} / Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{сп}}^{\text{т}} + Q_{\text{сп}}^{\text{в}}] \quad (16)$$

Уменьшаемое (выражение в квадратных скобках) больше 0, поэтому $\eta_{\text{г}}^{\text{в}}$ всегда меньше 1 из-за наличия потерь с уходящими газами и в окружающую среду, а энергетический КПД будет еще меньше ввиду имеющих сопутствующих затрат электроэнергии.

На основании приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

1. Имеется три источника водяных паров, поступающих в теплообменник и потенциально способных при конденсации внести теплоту для подогрева воды. Это водяные пары, образующиеся от сгорания водородосодержащих компонентов газообразного топлива, а также пары изначально содержащиеся как в газообразном топливе, так и в дутьевом воздухе.

2. Снижение расхода топлива в конденсационных водонагревателях происходит:

- за счет теплоты конденсации;
- из-за более глубокого охлаждения уходящих газов;
- вследствие снижения количества водяных паров в уходящих газах.

3. КПД водонагревателя всегда меньше 100% из-за наличия потерь: с уходящими газами, стенками теплообменника в окружающую среду и сопутствующих затрат электроэнергии. Получение некоторыми авторами КПД более 100% связано с ошибочной методикой расчета, в которой при расчете КПД в затратные статьи включают только $Q_{\text{г}}^{\text{п}}$, в то время как нужно дополнить их, во-первых, теплотой фазового превращения паров от всех трех источников, во-вторых, теплотой сухой части и перегрева паров как топлива, так и дутьевого воздуха, в-третьих, сопутствующими энергозатратами.

Литература:

1. Определитель типа котла. Конденсационные настенные котлы. www.tsmu.ru/the-determinant-of-the-type-of-boiler/. «Энерготехмонтаж». 2014.
2. Сало В. П., Кучеренко С. В. Использование водонагревателей конденсационного типа в схемах децентрализованного теплоснабжения // ЭСКО. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». № 6, июнь 2007.
3. Филоненко Г. К., Лебедев П. Д. Сушильные установки. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1952.— 264 с.
4. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М.—Л.: Энергия, 1966.— 288 с.
5. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / Под ред. Бакластова А. М.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 328 с.
6. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Тайца Н. Ю.— Киев: Техника, 1969.— 540 с.
7. Семенов Н. А. Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехнологическое комбинирование. М.: Энергия, 1968.— 296 с.
8. Бакластов А. М., Горбенко В. А. Удыма П. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообмен. установок. М.: Энергоиздат, 1981.— 336 с.
9. Хованов П. А., Маркевич Ю. Г., Чуленев А. С. Определение потерь теплоты с уходящими газами при составлении теплового баланса конденсационных котлов // Промышленное и гражданское строительство.— 2014.— № 12.— С. 80–83.

● #1026

14-16 ноября 2017

Сварка Контроль и диагностика Металлообработка

17-я специализированная выставка-конференция с международным участием

Место проведения:

МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»
Екатеринбург, Бульвар Экспо, 2

Организатор:
УРАЛЬСКИЕ ВЫСТАВКИ
(343) 385-35-35
www.uv65.ru



Качество сварных швов при ручной дуговой сварке зависит от квалификации сварщиков

В.О. Муктепавел, ст. преподаватель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Ручная дуговая сварка покрытыми металлическими электродами является широко применяемым способом сварки в судостроении при формировании корпусных конструкций из сталей типа АК и АБ, относящимся к среднелегированным высокопрочным конструкционным сталям. Для обеспечения равнопрочности сварного соединения основному металлу при сварке этих сталей должны выполняться специальные требования. К ним относятся: сварка на определённых погонных энергиях, подогрев кромок перед сваркой, сварка только в определённом интервале температур среды, применение специальных сварочных материалов и др. При ручной дуговой сварке применяются низколегированные перлитные и высоколегированные аустенитные электроды.

При разработке технологий сварки закаливающих сталей типа АК и АБ научным центром по конструкционным материалам «ЦНИИ КМ «Прометей» предусмотрены меры по исключению образования в сварных соединениях трещин закалочного характера [1]. Ручная дуговая сварка выполняется электродами, имеющими основной вид покрытия (их называют низководородными). Главные составляющие покрытия электродов мрамор CaCO_3 и плавленый шпат CaF_2 . Основной вид покрытия обеспечивает: хорошую раскисленность сварочной ванны, десульфурацию, дефосфорацию, высокий коэффициент перехода легирующих элементов, малое содержание водорода в наплавленном металле, высокую стойкость против холодных трещин. Но наличие в покрытии дестабилизатора сварочной дуги CaF_2 , необходимого для уменьшения содержания водорода в металле шва, не обеспечивает достаточной стабильности горения дуги. Качественная сварка возможна только при сварке короткой дугой. При удлинении сварочной дуги имеется склонность к «стартовой», «финишной» пористости и пористости наплавленного металла, т.е. в сварном шве присутствуют дефекты в виде газовых включений [2, 3].

В отраслевых стандартах так и сказано: «выполнение швов следует производить короткой дугой».

На многих судостроительных предприятиях исторически сложилась техника сварки «с отрывом дуги» при выполнении вертикальных и потолочных

швов. Сварщики, стремясь выплавить шлак из затвердевающего металла сварного шва, применяют завышенные режимы сварочного тока. При большом токе образуется повышенный объем расплавленного металла, который при сварке в вертикальном и потолочном положениях не удается удержать от вытекания, если не оборвать сварочную дугу и не дать металлу сварочной ванны затвердеть.

Сварка «с отрывом дуги» обеспечивает глубокое проплавление металла, предполагает отсутствие в шве шлаковых включений, но нарушает стабильную газшлаковую защиту жидкой сварочной ванны от окружающего воздуха, что приводит к дефектам в виде пор в сварном шве. Принцип короткой дуги для электродов с основным видом покрытия нарушается.

В 1950–60-е гг. на судостроительных предприятиях считалось, что при обнаружении рентгенографией в сварных швах шлака – виноват сварщик; в наличии пор – виноваты некачественные электроды. Что в корне не верно.

Автор в 1970-е гг. проводил специальные показательные испытания в лаборатории сварки и цехах машиностроения «Звездочка» (г. Северодвинск), чтобы доказать необходимость переучивания сварщиков на технику сварки в вертикальном и потолочном положениях «без отрыва дуги». Сварщики лаборатории освоили такую сварку без отрыва дуги – «короткой дугой», без шлаковых и газовых включений в сварных швах.

Характерный сварной шов, выполненный с отрывом дуги, показан *рис. 1*. Наружных дефектов нет, но при воздушно-дуговой строжке внутри сварного шва обнаруживаются распределенные поры.

«Стартовую пористость» иллюстрирует *рис. 2*. Снаружи шва ее нет, а при строжке выявляется групповая пористость из-за некачественного начала

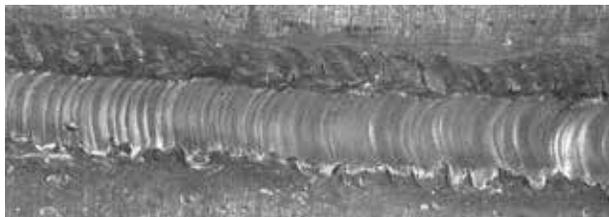


Рис. 1. Распределение пористости в металле сварного шва

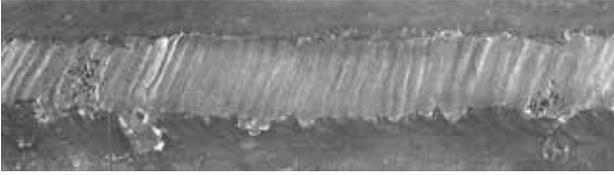


Рис. 2. «Стартовая пористость» в металле сварного шва сварного шва. Была грубо нарушена газошлаковая защита расплавляемого металла в момент возбуждения сварочной дуги и начала плавления металла. Металл в месте начала сварки качественно не переплавлен. Дефекты в виде пор остались в затвердевшем металле.

В свое время в одном из корпусных цехов («Звездочка») проводился конкурс сварщиков. Выполнялась сварка стыков пластин с Х-образной разделкой с обеих сторон в потолочном положении. Номинировались семь сварщиков. Анализировалась техника сварки, швы контролировались внешним осмотром, проверялись на наличие внутренних дефектов рентгенографией и послойной воздушно-дуговой строжкой.

Из семи выполненных конкурсантами стыков три получили при рентгенографии оценку 1 балл, т.е. «не прошли», т.к. имели недопустимые дефекты в виде пор. Остальные стыки получили балл 3: имелись лишь мелкие допустимые поры. Все семь стыков не имели в шве шлаковых включений. При послойной воздушно-дуговой строжке на всех стыках в сварных швах выявлены поры: где больше, где меньше. Лучшие показатели при выполнении задания показал сварщик Лодочников. Техника его сварки отличалась от техники других сварщиков. Все конкурсанты выполняли сварку с отрывом дуги, он сваривал стык с аккуратным зажиганием дуги и без отрыва дуги. Выяснилось, что Лодочников учился в техническом училище Газпрома, там сварку ведут короткой дугой, без отрыва!

Автором была предложена тренировка сварщиков перед сваркой съемных листов корпусных конструкций. Анализ техники сварки и уровня знаний показали, что многие сварщики не осознают необходимости выполнения технологических мероприятий, рекомендованных руководящей технической документацией. Сварщики не удерживают сварочную дугу стабильно короткой, почти все они сварку в потолочном и вертикальном положении ведут с отрывом дуги; часто наблюдаются неаккуратные, с периодическими ударами конца электрода, зажигания дуги. Многим не совсем понятно назначение испытания электродов на содержание водорода в наплавленном металле, назначение подогрева свариваемых узлов. Наблюдая за техникой сварки, можно с достаточной степенью достоверности предсказать качество сварного шва исполнителя.

Беседы, проведенные с прошедшими тренировки сварщиками, разъяснение технологических реко-

мендаций, особенностей сварки низколегированными электродами с основным видом покрытия, демонстрация дефектов, полученных при сварке и строжке контрольных пластин, обсуждение результатов, помогли достичь понимания особенностей сварки корпусных конструкций и возможности улучшения техники сварки каждым сварщиком. При сварке съемного листа сварщиками были получены лучшие результаты, чем ранее. Было выпущено пособие для сварщиков.

Однако, бывая нынче в цехах предприятий, убеждаешься в живучести техники сварки вертикальных и потолочных швов с отрывом дуги.

Автор посетил предприятие (ОАО «Межрегион-трубопроводстрой»), проводящее сварку неповоротных стыков труб газопроводов. Лично присутствовал при сварке стыка трубы небольшого диаметра электродами основного вида.

Техника сварки высококлассная (сварщик А.Р. Валиулин, 6 разряд). Сварка корневого прохода с V-образной разделкой электродами Ø 2,5 мм, последующих проходов электродами Ø 3,0 мм. Сварка короткой дугой без отрыва, идеальное зажигание электрода с одного касания, качественное переваривание места начала шва и кратера окончания шва. Шов с обратной стороны стыка, т.е. корень шва, получен с отличным формированием. Такая технология сварки в Газпроме обязательна для всех, иначе недопустимо!

Автор посетил и профессиональное училище. Присутствовал при обучении сварщиков в сварочной мастерской. Учебный мастер проводил практику учащихся по сварке тавровых соединений в вертикальном положении. Но, к сожалению, обучение ведется при сварке электродами с основным видом покрытия марки УОНИИ 13/45 Ø 4,0 мм с отрывом дуги. Это плохо!

Наши судостроительные сварщики, попадая на объекты Газпрома или в зарубежные фирмы, вынуждены переучиваться на сварку без отрыва дуги, иначе их не допускают к работе.

Из изложенного выше следует, что на наших предприятиях и в учебных центрах, для повышения качества сварных швов, необходимо совершенствовать технику ручной дуговой сварки сварщиков, используя свой опыт и опыт ведущих ответственных производителей сварных конструкций.

Литература

1. Л. В. Грищенко, Т. В. Калетина и др. Низколегированные электроды для сварки среднелегированных сталей. Сб. ст. «Сварка», № 5. Судпромгиз, 1962.
2. Сварка в машиностроении: Справочник. / Под ред. Н. А. Ольшанского. — М: Машиностроение, 1978. — т. 1. — стр. 79–96.
3. И. А. Ворновицкий и др. Способы предупреждения образования пор при сварке электродами с фтористокальциевым покрытием. ЛДНТП. Л, 1972.

● #1027

XVIII Международная выставка «Сварка / Welding 2017»: актуальные вопросы сварочного производства

С 25 по 28 апреля 2017 г. в г. Санкт-Петербурге прошла XVIII Международная выставка «Сварка / Welding 2017». Ведущие сварщики страны собрались в конгрессно-выставочном центре «ЭкспоФорум», чтобы обсудить вопросы модернизации отрасли и передовые технологии сварочного производства, выставка-конгресс объединила свыше 4000 специалистов. Свою продукцию и разработки презентовали более 100 компаний из Бельгии, Германии, Индии, КНР, России, Франции, Швейцарии, Эстонии.

В этом году выставка обновила формат, расширила деловую программу, превратившись в главную площадку страны для обсуждения стратегии развития индустрии. Центральным событием конгрессной части выставки стало пленарное заседание «Актуальные проблемы повышения эффективности сварочного производства», прошедшее при поддержке Минпромторга РФ. Представители органов власти и ведущие эксперты обозначили проблемы и пути развития сварочного производства, выявили потребности российской промышленности и обсудили вопрос подготовки высококвалифицированных кадров. Вячеслав Селуянов, советник отдела развития современных высокотехнологичных средств производства Департамента станкостроения и инвестиционного машиностроения Минпромторга РФ, отметил, что поддержка сварочной отрасли является одним из приоритетов в работе правительства, поскольку от ее модернизации зависит общее состояние развития промышленного производства нашей страны. «В Минпромторге работает научно-координационный совет по развитию сварки и родственных технологий, министерство объединило на своей площадке представителей предприятий ОПК, ракетно-космической отрасли, атомной промышленности,



ТЭК, научных институтов, профсоюзов и ассоциаций», — уточнил Вячеслав Анатольевич.

О трудностях использования высокопроизводительных процессов сварки при строительстве конструкций для Арктики рассказал Алексей Ильин, д.т.н., заместитель генерального директора ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Выступающий отметил, что применение высокопроизводительных технологий сварки для сварных конструкций, используемых в Арктике должно контролироваться проведением сертификационных испытаний. Юрий Сараев, д.т.н., главный научный сотрудник ИФПМ СО РАН, продолжил тему сварки на Севере, сделав акцент на надежности оборудования: «Все, что будет работать на севере, будет работать по всему миру, более критических условий эксплуатации не придумать — от +40 до -60 °С. Сварка как основной вид металлообработки определяет развитие промышленности в целом».

Вопросы подготовки кадров обсудили на заседании секции научно-координационного совета по развитию сварки и родственных технологий в РФ Минпромторга России. Были затронуты аспекты, касающиеся профессионального стандарта для специальности «сварщик» и классификатора профессий. Как было отмечено, Минтруда разработал концепт нового классификатора профессий, благодаря которому появятся дополнительные критерии отбора и сертификации будущих сварщиков. В рамках секции поднимались вопросы о подготовке кадров со средним профессиональным образованием.

При поддержке ПАО «Газпром» и ПАО «Транснефть» прошла международная научно-практическая конференция «Разработка и внедрение передовых технологий сварки и контроля качества сварных соединений на предприятиях нефтегазовой отрасли». Представители отраслевых компаний рас-

сказали о технологиях и разработках, применяемых на производстве. По словам *Евгения Вышемирского*, заместителя начальника производственно-технического управления ПАО «Газпром» — начальника отдела главного сварщика, «Газпром» использует технологии высокопроизводительных сварочных комплексов, которые не только обеспечивают необходимый темп работ, высокие свойства и качество сварных соединений, но и снижают затраты на выполнение сварочно-монтажных работ. Кроме того, разрабатываются и внедряются новые эффективные технологии одно- и двухсторонней сварки труб большого диаметра, в т.ч. технологии комбинированной сварки.

В этом году экспозиция объединила ведущих российских и зарубежных производителей сварочного оборудования и материалов, которые представили новейшие технологии и продемонстрировали их внедрение в сварочное производство на промышленных предприятиях. Свою продукцию и разработки презентовали более 100 компаний, среди них: Государственный рязанский приборный завод, НТО «ИРЭ-Полос», НПК «УТС ИНТЕГРАЦИЯ», «SERIMAX» (Франция), «RIDGID» (США), «Эмерсон» (Россия – Бельгия). Оборудование по неразрушающему контролю и технической диагностике, а также измерительные системы по контролю качества сварных соединений представили компании НПЦ «Кропус-ПО», «Ньюком-НДТ», «MT-Solutions GmbH» (Германия) и др.

Традиционно на выставке состоялись премьерные показы сварочных технологий, оборудования и материалов. Главная новинка этого года — разработка НПК «УТС-Интеграция» — серийный самодостаточный агрегат лазерной сварки САЛС-1, готовый решать производственные задачи в условиях трассового строительства для предприятий нефтегазовой отрасли. Это уникальная, не имеющая мировых аналогов технология для сварки труб большого диаметра на основе волоконных лазеров, разработана в России. САЛС способен обеспечивать ведение строительства магистральных трубопроводов как поточно-расчлененным способом, так и строительство с выполнением сварки всех слоев стыка на одном посту.

Среди новинок также — высокотехнологичное оборудование от ООО «ТБК»: машина сварочная внутренняя автоматическая АСМТ-1420



(«ТБК», «ЭСО», С.-Петербург), предназначенная для автоматической сборки стыка, сварки корневого прохода в сварочно-монтажном потоке строительства магистральных трубопроводов. Разработка, производство и сборка машины АСМТ проводится силами российского производства.

Среди новинок систем неразрушающего контроля — измерительные системы контроля качества сварных соединений от компании «MT-Solutions GmbH».

В этом году экспозиция выставки была существенно расширена за счет Китайской национальной экспозиции, организованной партнером выставки — Китайским машиностроительным обществом (CMES). Высокотехнологичное сварочное оборудование, принадлежности и средства защиты сварщиков представили 17 компаний, в числе которых крупнейшие производители — FARINA (JINAN) WELDETEC MACHINERY CO., KENT STUD WELDING CO., Холдинг компаний Xiamen Tungsten CO. и другие.

«Сварка / Welding» — ведущий форум передовых сварочных технологий в России и крупнейшая отраслевая площадка для конструктивного диалога власти, бизнеса и научного сообщества по вопросам развития сварочной индустрии.

Генеральный информационный партнер выставки — журнал «Мир сварки», информационные партнеры — журналы «Сварщик в России», «Сварщик», «Индустрия», «Территория Нефтегаз» и др.

Организатором выставки-конгресса выступила компания «ЭкспоФорум-Интернэшнл» в партнерстве с ПАО «Газпром», Альянсом сварщиков Санкт-Петербурга и СЗФО. «Сварка / Welding 2017» проходила при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, Правительства Санкт-Петербурга, Национального комитета по сварке РАН, Национального Агентства Контроля Сварки (НАКС), Союза промышленников и предпринимателей РФ, Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга, Торгово-промышленной палаты РФ, Китайского машиностроительного общества (CMES).

Более подробная информация о выставке-конгрессе — на сайте: www.welding.expoforum.ru

Международная конференция «Материалы и технологии для Арктики»



Национальный исследовательский центр (НИЦ) «Курчатовский институт», ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов (ЦНИИ КМ) «Прометей» им. И. В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт» приглашают руководителей предприятий, ведущих ученых и специалистов принять участие в работе Международной конференции «Материалы и технологии для Арктики».

Цель конференции: Обсуждение актуальных материаловедческих и технологических проблем развития и освоения Арктики; обеспечение взаимодействия и координации усилий всех привлеченных к участию в данной тематике сторон: ведущих российских и зарубежных нефтегазовых компаний, заказчиков, проектантов, строителей морских судов и конструкций, профильных федеральных и региональных структур, научных и учебных центров.

Организаторы конференции: НИЦ «Курчатовский институт»; ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» им. И. В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»; Российская академия наук; Министерство промышленности и торговли РФ; Министерство образования и науки РФ; Государственная корпорация «Росатом»; Фонд перспективных исследований; ПАО «НК «Роснефть»; ПАО «Газпром»; АО «Объединенная судостроительная корпорация»; ФГУП «Атомфлот»; Российское научно-техническое общество судостроителей им. академика А. Н. Крылова.

Председатель организационного комитета: Ковальчук Михаил Валентинович, президент НИЦ «Курчатовский институт». Сопредседатели: Орыщенко Алексей Сергеевич, ген. директор НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей»; Леонтьев Леопольд Игоревич, академик РАН, председатель научного совета по металлургии и металловедению; Рудской Андрей Иванович, академик РАН, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; Каблов Евгений Николаевич, академик РАН, ген. директор ФГУП «ВИАМ», ГИЦ РФ.

Время проведения конференции: 4–6 декабря 2017 г. Место проведения: Санкт-Петербург, КВЦ «Экспофорум».

Направления работы конференции:

- Современные конструкционные хладостойкие и коррозионностойкие стали и сплавы.
- Хладостойкие сварочные материалы и технологии сварки при низких температурах.
- Полимерные и композиционные материалы для

эксплуатации в арктических условиях.

- Высокорадиационностойкие материалы для атомного энергетического оборудования.
- Обеспечение надежности конструкций и оборудования в экстремальных условиях, в том числе на всех этапах жизненного цикла.
- Математическое моделирование материалов и технологий.
- Проблемы эксплуатации, технологические методы обеспечения работоспособности, оценка и продление срока эксплуатации материалов в составе оборудования и трубопроводов.
- Экологические и экономические проблемы развития Арктического региона.

5 и 6 декабря 2017 г. состоятся пленарные заседания; работа круглых столов: «Материалы и конструкции для освоения Арктического шельфа», «Малая атомная энергетика для Арктики», «Вопросы технического регулирования. Экономические и экологические аспекты создания объектов для работы в Арктической зоне»; выставочная экспозиция предприятий — участников конференции.

По результатам работы конференции предполагается выпуск специального номера научно-технического журнала «Вопросы материаловедения» (ВАК, РИНЦ, Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, статьи английской версии — Scopus, Ulrich's Periodicals Directory), а также публикация статей в «Трудах Крыловского государственного научного центра» (ВАК), журнале «Известия вузов. Черная металлургия» (ВАК, РИНЦ, Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, Chemical Abstracts Service и Google Scholar), научно-техническом журнале «Металлы» (ВАК, РИНЦ, статьи английской версии — Scopus), Научно-техническом сборнике Российского морского регистра судоходства (ВАК, РИНЦ), научном информационно-аналитическом журнале «Арктика: экология и экономика» (ВАК, РИНЦ), информационно-аналитическом журнале «Арктические ведомости».

Заявки на участия с докладами и тезисы докладов принимаются до 15 сентября 2017 г. Заявки от слушателей принимаются до 25 ноября 2017 г.

Заявки на участие в работе конференции необходимо выслать ответственному секретарю конференции Фоминой Ольге Владимировне:

тел.: (812) 458–50–66, факс: (812) 274–29–24,
e-mail: oknir@crism.ru

Дополнительная информация размещена на сайте НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей»:

www.crism-prometey.ru

• #1029

Мосты Патона *

А. А. Мазур, канд. экон. наук, В. И. Снежко, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ (Киев)

Как и у многих ученых, интересовавшихся широким кругом вопросов, у Евгения Оскаровича Патона были любимые проблемы, разработкой которых он занимался лично в течение многих лет: механизация сварочных процессов и мостостроение. Создание научных основ сварного мостостроения является большой заслугой Е. О. Патона, позволившей на основе механизированных сварочных процессов осуществить массовое изготовление мостов.

Применение сварки в мостостроении вместо клепки обеспечивало значительную экономию металла и труда, улучшение условий эксплуатации сооружения и сокращало сроки строительства.

Когда в начале 1930-х гг. Е. О. Патон приступил к изучению проблемы сварного мостостроения, применение сварки в этой области во всем мире развивалось стихийно, без учета технологических особенностей процесса, его возможностей и условий работы сварных соединений. Большинство из построенных до этого периода сварных мостов были сняты с эксплуатации в связи с появлением дефектов, угрожающих безопасности движения. Однако Е. О. Патон был твердо убежден в том, что некоторые неудачи вызваны не недостатками сварки, а низкой культурой производства и отсутствием единого научного подхода к вопросам сварного мостостроения.

В начале 1940 г. Е. О. Патон располагал уже надежными данными о реальной прочности сварных конструкций. Был создан способ автоматической сварки под флюсом, обеспечивающий стабильное качество швов и высокую производительность процесса, уточнены требования к используемым сталям и сварочным материалам. Это позволило ученому поставить вопрос и при поддержке правительства УССР добиться решения о строительстве сварного варианта моста через р. Днепр в Киеве, по которому он должен был строиться из сварных элементов с клепаными монтажными соединениями. Однако успешно начавшееся изготовление сварных элементов было прервано войной.

Под руководством Е. О. Патона проводились исследования по разработке оптимальных режимов сварки, новых сварочных материалов, созданию необходимой аппаратуры, выбору основного металла. Результаты исследований позволили ученому рекомендовать для изготовления мостов и др. ответственных конструкций низкоуглеродистую спокойную, дополнительно раскисленную алюминием

мартеновскую сталь М16С. Из этой стали были построены все мосты, введенные в эксплуатацию при жизни Евгения Оскаровича.

О значении качества стали для надежности сварных конструкций Е. О. Патон писал: «Разработка стали для сварных мостов — это только первый шаг. Сварщикам совместно с металлургами нужно много и упорно работать над проблемой выпуска хорошо сваривающихся сталей, актуальной для многих отраслей промышленности».

Строительство и эксплуатация мостов со сварными элементами и клепаными монтажными узлами были значительным достижением отечественного мостостроения. Вес сварного пролетного строения с клепаными монтажными узлами примерно на 8–10%, а цельносварного — на 20–25% меньше клепаного. Но это не позволяло полностью использовать все преимущества сварки.

В 1946 г. Е. О. Патон совместно с Министерством путей сообщения (МПС) и Министерством строительства предприятий тяжелой индустрии подали союзному правительству докладную записку о преимуществах сварного мостостроения и замене клепаных пролётов сварными.

Придавая большое значение внедрению в мостостроении сварных металлических конструкций, дающих экономию металла и рабочей силы по сравнению с клепаными конструкциями, Совмин СССР 31.07.1946 г. принимает постановление «О применении автоматической сварки в строительстве железнодорожных и шоссежных мостов с металлическими фермами». Постановление поручает МПС и ИЭС:

- организовать наблюдение за изготовлением на заводах пролетных строений и за работой их в эксплуатации;
- развернуть НИР по изучению вопросов, связанных с переходом на широкое применение автоматической сварки в мостостроении;
- разработать до 01.01.1947 г. технологию автоматической сварки низколегированной стали типа СХЛ и к 01.01.1948 г. метод автоматической сварки монтажных соединений пролетных строений.

Институт электросварки для исполнения постановления выполнил разработки по 24 научно-исследовательским темам и провел на предприятиях порученную ему работу.

Всего в 1950–1953 гг. в разных климатических регионах страны было изготовлено и установлено более 150 сварных мостов.

На основании положительного опыта, полученного при строительстве и эксплуатации большого числа железно- и автомобильных мостов, Е. О. Патон снова предложил изготовить цельносварным авто-

* Часть 6. Продолжение серии публикаций по материалам книги: «ИЭС и государственное планирование развития сварочной науки, техники и производства»



Фото 1. Мост Патона на фоне монумента «Родина-мать» — дорожный мост через р. Днепр в Киеве. Это предложение ученого опять встретило сопротивление некоторых мостовиков и даже сварщиков.

Евгению Оскаровичу было тогда около 80 лет, но он не отступил от направления, которое считал правильным, и победил.

В развитие Распоряжения СМ СССР от 29.06.1948 г. «О строительстве в г. Киеве шоссейного моста через р. Днепр» правительство УССР принимает решение построить в Киеве цельносварной шоссейный мост через р. Днепр.

Уникальность данного цельносварного сооружения заключается, прежде всего, в его размерах. Это один из крупнейших мостов Европы. Он имеет 20 пролетов по 58 м между опорами и 4 судходных пролета (на главном русле реки) по 87 м между осями опор. Общая длина моста 1492 м с общим весом пролетных строений более 13 тыс. т.

В основу проекта был положен индустриальный метод, согласно нему в Днепропетровске на заводе им. И. В. Бабушкина изготовлялись крупно-блочные элементы, из которых, на стройплощадке формировалась металлоконструкция всего моста. Свыше 84% всех заводских и монтажных швов выполнены автоматической и полуавтоматической сваркой под флюсом. При сварке главных ферм эта цифра составляла 97% для заводских швов и 88% для монтажных. Широко использовалась автоматическая сварка вертикальных монтажных стыков. При проектировании особое внимание обращалось на технологичность элементов.

Е. О. Патон возглавлял и принимал самое активное участие во всех исследовательских, проектных, заводских, строительно-монтажных работах. Он сумел объединить все организации, участвующие в строительстве, как в заводских, так и в монтажных условиях.

Исключительными были сроки изготовления и монтажа пролетных строений. Строительство началось в декабре 1951 г. и закончилось в октябре 1953 г. Сварочные работы проводились круглый год. Трудоемкость выполнения сварных монтажных стыков составила 4,17 чел.—ч на 1 т конструкций вместо 13,5 чел.—ч на 1 т клепаных конструкций.

Однако Евгению Оскаровичу не довелось воспользоваться почетным правом автора первому пройти по мосту после ввода его в эксплуатацию. Он умер 12 августа 1953 г. на 84-м году жизни, не дожив менее трех месяцев до торжественного открытия

моста, до осуществления главного дела всей своей жизни, воплотившего идеи выдающего мостовика и великого сварщика.

В строительстве моста, который сейчас носит его имя, ученый вложил свои разносторонние знания, огромную энергию и ясность мысли. Уже более 60-ти лет мост Патона, который Американское сварочное общество признало выдающимся инженерным сооружением XX века, верно служит людям.

Конструктивные и технологические решения, использованные при проектировании и сооружении моста Патона, открыли дорогу широкому использованию сварки в мостостроении. Они были использованы при постройке мостов через р. Днепр в Киеве (Южного, Московского, Гаванского, Подольско-Воскресенского, автодорожного, железнодорожного), мостов в Днепропетровске, Запорожье, Каменец-Подольском и многих других.

Евгений Оскарович Патон во всех разнообразных областях своей деятельности оставил заметный и самобытный след. Единство теории и практики органически пронизывало все его работы. Благодаря глубоким теоретическим знаниям, огромному практическому опыту, исключительной целеустремленности он доводил до конца все дела, за которые принимался.

Патон проявлял постоянную заботу о приоритете отечественной науки и техники. Защищая и подчеркивая оригинальность новаторских разработок советских ученых, он резко отвергал пренебрежительное отношение к достижениям ученых зарубежных стран: «Мы не должны замыкаться в себе. Мы обязаны внимательно следить за движением мировой науки и техники, но не преклоняться перед иностранным, не слепо копировать, а брать здравые идеи и критически их осваивать, перерабатывать, обогащать».

На протяжении всей своей деятельности Е. О. Патон искал и эффективно использовал различные пути творческого содружества руководимого им Института электросварки с заводами и стройками страны. Уже на первом этапе работы Института он организовал специальный отдел внедрения, занимающийся вопросами практического использования разработок. Для ускорения работ создавались комплексные бригады, в которые входили научные сотрудники и конструкторы Института, а также инженерно-технические работники, рационализаторы заводов и монтажных организаций.

Весьма удачной формой содружества с производством Е. О. Патон считал введение в состав Ученого совета Института электросварки опытных производственников — представителей крупных заводов. Это облегчало составление программ исследований, т.к. давало возможность оперативно и наиболее полно учитывать потребности производства. Творческое содружество сотрудников Института и заводов привело к созданию новых эффективных способов изготовления ряда изделий массового производства, позволило в сжатые сроки

освоить выпуск труб для трубопроводов высокого давления, разработать технологию изготовления сварно-литых конструкций толщиной до 300 мм, создать высокоэффективную технологию изготовления толстостенных сварных барабанов для котлов высокого и сверхвысокого давления. Совместно с работниками металлургических заводов были разработаны новые марки сталей, которые наряду с хорошей свариваемостью и высокой статической прочностью обеспечивали прочность сварных конструкций, работающих при разных видах нагрузок.

Вдумчиво и серьезно относился Евгений Оскарович к воспитанию научных кадров, новых сотрудников, приобщению их к духу и стилю работы Института. Он был противником преклонения перед «абсолютными» истинами и незыблемыми авторитетами. «Каждое научное учреждение — обязано творить людей! Грош цена тому НИИ, который держится и живет одним лишь именем своего директора, одной его научной репутацией».

Е.О. Патон придавал большое значение выбору тематики диссертационных работ сотрудников: «Диссертация должна отстаивать передовые взгляды — то, что сегодня еще не всеми признано, а не с упорством, достойным лучшего применения, пересказывать всем уже давно известные истины; должна давать что-то новое, полезное для практики». Патон категорически отвергал темы, разработка которых имела целью только получение ее исполнителем ученой степени.

В работах Е.О. Патона этого периода, посвященных изучению прочности сварных конструкций, был выдвинут и сформулирован ряд идей и положений, послуживших основой последующих исследований, проведенных в нашей стране и за ее пределами. Это прежде всего дальнейшее изучение влияния остаточных сварочных напряжений на работоспособность сварных конструкций, проблем их хрупкого разрушения и усталостной прочности, влияния конструктивного оформления сварных соединений на несущую способность сварных изделий и др. Широким фронтом велись работы по рациональному конструированию конкретных сварных изделий и отдельных узлов. Особое внимание уделялось повышению качества сварных соединений.

Выступая на одном из своих юбилеев, Евгений Оскарович сказал: «Передо мной в юности открывалось два пути: путь праздной беззаботной жизни и путь упорного повседневного труда. Я выбрал труд. С тех пор прошло 60 лет, но, если бы сейчас мне снова пришлось сделать выбор, я снова выбрал бы труд. Человеку не дано самому судить о том, как он выполняет свой долг. Истинным судьей в этом является только народ. Но одно я знал твердо: всего себя, без остатка, я отдаю работе, стараюсь жить так, чтобы всегда прямо и честно смотреть в глаза советским людям».

И еще одну очень важную для нас вещь Евгений Оскарович написал незадолго до смерти: «Я нахо-

жу удовлетворение в том, что научил работать других, подготовил целое поколение молодых ученых-сварщиков. Это настоящая хорошая смена и они успешно двигают вперед наше общее дело. Среди них и мои сыновья. С надеждой смотрю я на нашу талантливую молодежь. У большинства товарищей еще сравнительно невелик стаж научной деятельности, но они научились работать коллективно, спаянно, дружно, не зазнаваться и критически оценивать свои успехи, держать тесную связь с жизнью, с производством. Это позволяет мне надеяться, что созданный нами почти двадцать лет тому назад Институт электросварки и дальше справится со своими большими задачами».

В наследство от великого теоретика и практика сварки Евгения Оскаровича Патона остались разработанные им принципы рациональной организации деятельности Института, новая идеология и методика научно-технической и инновационной деятельности на всех этапах — от разработок идеи до ее выполнения в металле и широкого использования в промышленной практике (то, что сейчас мы называем НИР-ОКР-внедрение), умелое сочетание экономических и административно-директивных методов повышения эффективного взаимоотношения науки с государством и государства с наукой во имя повышения экономической и оборонной мощи страны, во имя повышения благосостояния народа. Все это непосредственно имело огромное значение в условиях административно-командной экономики времен СССР. Но что очень важно — многое из опыта, накопленного Институтом в прошлом, может и должно быть использовано и сейчас, в условиях рыночной экономики независимой Украины.

В 1953 г. Евгения Оскаровича Патона не стало, но остался созданный им Институт электросварки, носящий имя великого ученого, который уже более 60-ти лет возглавляет его сын Борис Евгеньевич Патон — ученый с мировым именем в области сварки, металлургии и технологии металлов, дважды Герой Социалистического Труда, первый Герой Украины, академик, Президент НАН Украины. Под его руководством Институт вырос в крупнейший в мире научный центр по сварке.

За годы, прошедшие со дня смерти Евгения Оскаровича, коллектив созданного им Института электросварки НАНУ продолжает работать над дальнейшим совершенствованием и развитием сварочной науки и техники.

И в наше время не утратили своей актуальности идеи Е.О. Патона о необходимости комплексного взаимосвязанного развития фундаментальных и экспериментальных исследований с прикладными разработками. Это привело к возникновению исследований принципиально нового вида, которые Б.Е. Патон определил как «целенаправленные фундаментальные».

Создание электродуговой сварки и организация сварочного производства

Г. И. Ширшова, директор музея Н. Н. Бенардоса (пгт. Лух, Ивановская обл., РФ)

Журнал «Сварщик» публиковал материалы о выдающемся отечественном изобретателе Николае Николаевиче Бенардосе [1]. Он родился 26 июля (7 августа) 1842 г. в деревне Бенардосовка Херсонской губернии в семье военных, переселившихся из Греции. В 1970-х гг. сотрудниками Института электросварки имени Е. О. Патона были собраны документы и доказано создание первого способа дуговой сварки именно Н.Н. Бенардосом [2, 3]. На основании этих документов ЮНЕСКО занесло в календарь памятных дат 1981 года: «100-летие изобретения дуговой электросварки Бенардосом». Этот юбилей широко отмечала мировая общественность. Тогда же были созданы музеи, сооружены памятники, проведены конференции, опубликованы книги и статьи [4, 5]. К 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса предлагаются к рассмотрению материалы, уточняющие обстоятельства изобретения и оформления патентов на электродуговую сварку, организацию товарищества «Электрогефест» и создание первого в мире предприятия по выполнению сварочных работ и выпуску сварочного оборудования.

В 1802 г. в С.-Петербурге В. В. Петров открыл явление электрического дугowego разряда. В 1808 г. Г. Дэви также обнаружил электрическую дугу. Со времени открытия дугowego разряда неоднократно выдвигались идеи и предпринимались попытки использовать дугу для прочного соединения металлов.

В апреле 1881 г. в Париже (на I-ой Международной электротехнической выставке) при подготовке

экспозиции изобретателя электрической свечи П. Н. Яблочкова Н. Н. Бенардос применил электрическую дугу для сварки деталей аккумуляторов, генераторов, коммутирующей аппаратуры. На эту новейшую эффективную технологию обратили внимание специалисты, сообщив о том, что Бенардос решил проблему дуговой сварки [6–8].

Исследование деятельности Н. Н. Бенардоса показало, что возможность использования энергии электрической дуги для соединения металлов выдающийся изобретатель обнаружил еще раньше. В своем имении «Привольное» вблизи города Лух в Костромской губернии (теперь пгт Лух, Ивановская обл.) он занимался изготовлением образцов новых паровых колес, плугов, жаток и др. металлоемких изделий. Дугу он использовал для разогрева деталей перед тем, как соединять их кузнечной сваркой и заметил, что иногда кромки металла оплавляются, жидкий металл обеих кромок сливается в общую ванну и, застывая, образует монолитное соединение.

Занимаясь изобретательством и благотворительной деятельностью, Бенардос разорился, продал усадьбу и переехал в Петербург.

Хорошую экспериментальную базу Бенардос имел на заводе Яблочкова, где совершенствовал оборудование и технологию сварки. Однако заявки на патенты начал подавать лишь с 1885 г. — патентование изобретений в то время стоило дорого. Необходимо было довести процесс до совершенства, реализовать как можно больше идей и совместить их в одном патенте. Тем более что по законам многих стран, не внедрение патента в течение



Рис. 1. Президент АН СССР А. П. Александров и президент АН УССР Б. Е. Патон у музея Н. Н. Бенардоса в Лухе (1981 г.)



Рис. 2. Н. Н. Бенардос в лаборатории Н. И. Кабата в Париже. Гравюра из статьи [7]

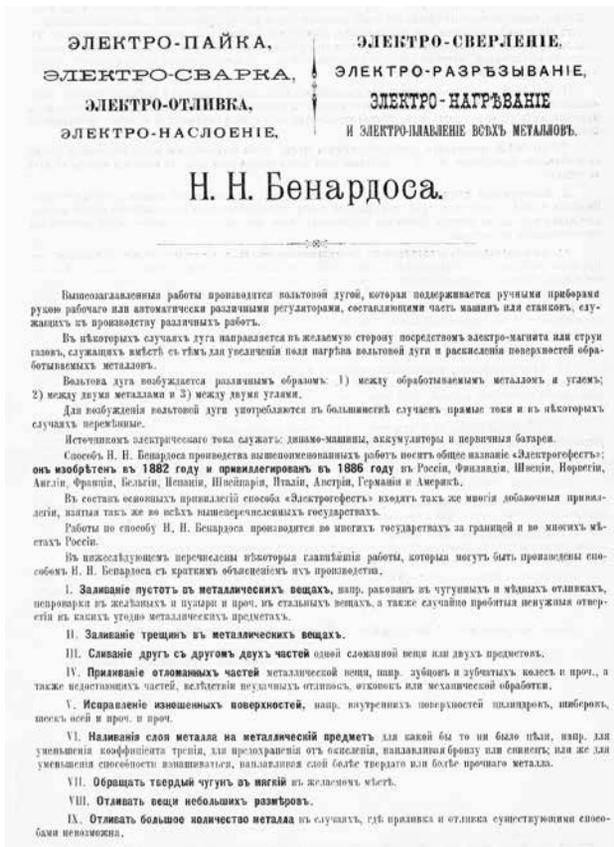


Рис. 3. Проспект Товарищества «Электроgefест»

ние короткого времени, лишало владельца прав на него. Чтобы владеть патентом, не требовалось доказывать авторство. Необходимо было заплатить установленную законом пошлину. Причем, в ряде стран (Франция, Бельгия и др.) не проверялась новизна изобретения и в случае претензий владельца патентов сами решали спорные вопросы. В России, США, Великобритании была принята проверочная система, принималось во внимание наличие аналогичных технических решений как запатентованных, так и опубликованных в журналах или зафиксированных др. образом.

6 июня 1885 г. Николай Николаевич подал прошение о выдаче ему патента-привилегии России на «Способ прочного скрепления металлических частей и их разъединения непосредственным воздействием электрического тока». Первый в мире патент на электродуговую сварку, в котором указано только одно имя — Н. Н. Бенардос, он получил 31 декабря 1886 г. за № 11982.

В этом первичном документе государственного учреждения, уполномоченного охранять права владельцев патентов — Совета торговли и мануфактур написано: «...удостоверяя, что на сие изобретение прежде сего никому другому в России привилегии выдано не было, дает дворянину Николаю Бенардосу сию привилегию на десятилетие от нижеписанного числа и исключительное право вышеозначенное изобретение по представленным описанию и чертежу

во всей Российской Империи употреблять, продавать, дарить, завещать и иным образом уступать другому на законном основании». Ни соавторов, ни совладельцев в первом в мире патенте на дуговую сварку не было. Доказательством могут служить также материалы спора между Н. Н. Бенардосом и Н. Г. Славяновым по поводу первенства изобретения дуговой электросварки металлическим электродом. В этом споре не участвовал Ольшевский потому, что к первичному российскому патенту не имел никакого отношения, даже финансового.

Н. Н. Бенардосу впервые в мире удалось решить несколько сложнейших проблем: энергетическую, создав аккумулятор, пригодный в качестве источника тока питания сварочных аппаратов; технологическую, заключающуюся в разработке принципа использования теплоты электрической дуги для соединения и разъединения металлов. По сути, это был комплекс изобретений, каждое из которых впоследствии развивалось по самостоятельным направлениям и могло быть защищено отдельным патентом. Изобретатель разработал многие типы сварных соединений и форм разделок кромок. Бенардос блестяще использует возможности сварки и не только заменяет клепаные конструкции сварными, но и создает оригинальные узлы и изделия. Например, облегченные прочные конструкции, составленные из волнистых листов, многослойные конструкции и др. Все эти новейшие технические решения указаны в первой заявке на привилегию (патент) России.

Однако, не имея достаточных средств на патентование за рубежом и организацию сварочного производства, Бенардос вынужден был пригласить к участию в финансировании владельца доходных домов в Петербурге и Варшаве С. А. Ольшевского (в его доме, в Петербурге на улице Литейной д. 18 жил Бенардос). Его же пришлось указывать совладельцем в зарубежных заявках на патенты. Содержание заявок, подаваемых в промышленно развитые страны Европы и США, не отличались от первого российского патента. Домовладелец С. А. Ольшевский, финансировавший уплату пошлин за получение зарубежных патентов, не участвовал в решении технических проблем и претензий на авторство изобретения сварки никогда не предъявлял.

Еще при жизни Н. Н. Бенардоса начались попытки умалить его заслуги в создании выдающегося технологического прорыва. Даже известные электротехники и металлурги заявляли, что у них были мысли применить дугу для пайки-сварки металлов. В 1887 г. по поводу возникавших претензий немецкий физик Р. Рюльман писал: «Невольно вспоминается история с яйцом Колумба. На одном из банкетов придворные, завидуя адмиралу, говорили, что могли бы поплыть через океан и обнаружить новые земли. Колумб, взяв из тарелки

яйцо, предложил поставить его на острый конец. Никто не смог этого сделать. Тогда он слегка ударил яйцо о стол, скорлупа сломалась и задача была решена. И на реплики завистников: «Что они могли это же сделать», Колумб ответил: «После меня вы можете» [6].

В 1885 г. было организовано Товарищество «Электрогефест» по эксплуатации и внедрению изобретения Бенардоса. Инвесторы — капиталовладельцы С. Ольшевский, Н. Галумнов, К. Вахтер, И. Фелейзен основали в С.-Петербурге (по Большой Невке, д. № 41) завод и стали владельцами имущественных прав товарищества. «Производство означенного завода заключается в сварке и пайке электричеством, а также в изготовлении приборов для электрического освещения» — значилось в заявке на получение от Департамента торговли и мануфактур разрешения на производство работ. Работы велись в сварочном, литейном, кузнечном, механическом, аккумуляторном, сборочном и др. цехах. В каждом из них могли работать до 200 человек. В показательной мастерской Н. Н. Бенардос демонстрировал приемы сварки. На втором этаже находился кабинет изобретателя и исследовательская лаборатория. Всею работой руководил сам Бенардос, его имя значилось и на бланке товарищества.

Доход от выполненных работ и продажи лицензий забирали инвесторы. Они не хотели финансировать новые разработки Бенардоса и весь заработок он тратил на проверку новых идей, проектирование и изготовление образцов оборудования. Так изобретатель оказался в сложном материальном положении.

Новый технологический процесс металлообработки привлек внимание многих ученых, технологов и в первую очередь инженеров железнодорожного и водного транспорта — наиболее наукоемких в то время видов техники. В опубликованных статьях ученых, электротехников и др. специалистов о работах Н. Н. Бенардоса, давалась высокая оценка его изобретению и компетентности в вопросах электротехники и металлургии, отмечалось важное значение электросварки. Напечатанная Р. Рюльманом фотография русского изобретателя за сваркой котла для завода наждачных кругов Струка в С.-Петербурге разошлась по всему миру [6]. Выходившие в то время технические журналы так писали о работах Бенардоса: «...электрическая сварка является простым, удобным и практичным способом, достойным многочисленных и полезных видов применения электрического тока, и мы должны поздравить г-на Бенардоса, который одним поворотом руки сумел преобразовать лабораторию в целую отрасль промышленности, имеющую большое значение как в настоящем, так и в будущем» [7].

Профессор Императорского технического учи-

лища (теперь МГТУ им. Н. Э. Баумана) С. Э. Кордес изучил работы Бенардоса и составил подробное описание, заканчивающееся предложением: «...желаю г-ну Бенардосу иметь многих последователей, могущих еще более усовершенствовать обработку металлов электрическим путем, его изобретение — первое, осуществленное в технике — успело показать, насколько универсальны и просты работы электричеством» [8]. В журнале «Нижегородский вестник пароходства и промышленности» в июле 1887 г. отмечалось: «Кто не согласится после всего изложенного, что изобретение Н. Бенардоса должно быть по всей справедливости приурочено к числу величайших. Оно обещает с одной стороны, в отношении упрощения и ускорения производства, а с другой, в отношении увеличения прочности производимых предметов одинаково громадные выгоды машино- и судостроению, арсеналам и оружейным заводам, а также почти всем обрабатывающим металлы фабрикам и заводам». Н. Н. Бенардос организовывал также сварочное производство и обучал специалистов за рубежом. Только в 1887 г. об изобретении Н. Н. Бенардоса было опубликовано не менее 26 статей в российских и зарубежных журналах. Ни в одной из публикаций, касающихся сварки или др. работ фамилия С. Ольшевского не упоминается. Он не был специалистом в области электротехники и не мог быть причастен к созданию и внедрению дуговой электросварки. Организаторы производства и инженеры отмечали только Н. Бенардоса [9].

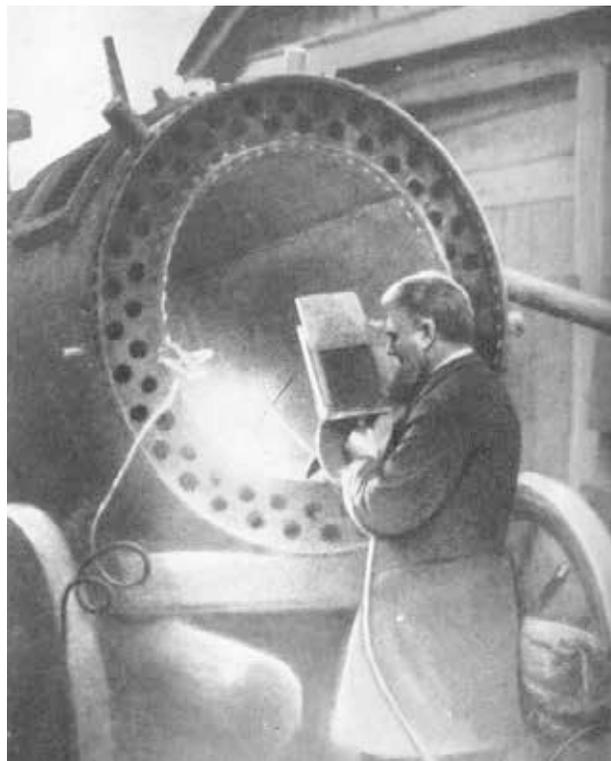


Рис. 4. Н. Н. Бенардос за сваркой котла [6]

В 1895 г. А. А. Троицким в Петербурге было организовано «Русское товарищество электрической обработки металлов» с задачей внедрения изобретений электросварки по способам Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова. Товарищество выкупило акции у С. Ольшевского и др. К середине 1890-х гг. новый технологический процесс был внедрен более чем на 120 заводах России, Западной Европы и США. По данным на 1895 г. способ Бенардоса эксплуатировали в Германии (заводы Ф. Круппа в Эссене, К. Мюллера в Швельме, Ю. Пинча в Берлине и др.), во Франции (фабрика Крезю и общество «Комантри» в Шатильоне), в Австро-Венгрии (Витковицкий завод в Остраве, заводы Ганца в Будапеште, Розе в Вене), в Великобритании (заводы в Бирмингеме, Шеффилде, Лидфилде, Глазго) и в др. странах.

Н. Н. Бенардос в течение 1880–1890-х гг. продолжал совершенствовать технологии и оборудование. В 1887 г. он подал заявки на «Систему аккумуляторов» и «Способ приготовления губчатого свинца для пластин аккумуляторов», в 1889 г. — на «Тигельное электропаяние, электроотливку и электронаслоение металлов», в 1893 г. — на «Способ и приборы электропаяния тонких металлических листов» и т. д. На оригинальные технические решения он получил другие единоличные патенты.

Новое товарищество, как и предыдущее, лишило изобретателя материальных выгод и он фактически был рабочим — сварщиком. Безгранично веря в возможности дуговой сварки и пытаясь получить большой заказ, Н. Н. Бенардос рискнул предложить отремонтировать Царь-колокол (в Москве) и разработал технологию приварки отделившегося куска и заварки трещин [5].

Своеобразным отчетом об изобретательской деятельности Н. Н. Бенардоса в области сварки явилась его экспозиция на IV Всероссийской электрической выставке, организованной Русским техническим обществом, проходившей в 1892 г. в С.-Петербурге. В проспекте выставки было указано 15 технологий применения дуговой электросварки. В экспозиции были представлены цельносварные трубы, сосуды и др. металлические предметы, отремонтированные колокола. Впервые в мире были показаны устройства для сварки металлическим электродом на переменном токе, в струе горючего газа, с магнитным управлением дугой, наклонным электродом, для механизации и автоматизации сварочного процесса. Кроме дуговой электросварки на IV Всероссийской электрической выставке Н. Н. Бенардос представил пять чертежей устройства для контактной сварки, разработанной им в 1887 г. [10]. Н. Н. Бенардосу была вручена высшая награда выставки — золотая медаль. 7 декабря 1899 г. ему вместе с А. С. Поповым и А. Н. Лодыгиным Петербургским электротехниче-

ским институтом было присвоено почетное звание «Инженера-электрика».

Любовь к изобретательству Н. Н. Бенардос пронес через всю свою жизнь. Он был в постоянном поиске: конструировал, экспериментировал, проверял новые технологии и работу создаваемых им устройств. Многие его изобретения значительно опередили время (электромагнитная пушка, электрокультура растений, летательный аппарат, винт с поворотными лопастями и др.) Изобретательская деятельность требовала значительных расходов, а материальное положение оставляло желать лучшего. В 1900 г. Бенардос уезжает из С.-Петербурга и поселяется неподалеку от г. Фастова, продолжая заниматься совершенствованием техники.

8 (21) сентября 1905 г. Н. Н. Бенардос умирает вследствие болезни, вызванной отравлением парами свинца. Смерть великого изобретателя не была замечена. В 1920-х гг., молодые инженеры-сварщики, направленные советским правительством учиться в Германию, заметив с каким почтением говорят о Бенардосе думали, что он немецкий изобретатель. Только в конце 1935 г. узнали, что Бенардос жил и творил в Российской империи [1].

Литература

1. Корниенко А. Н. Судьба Н. Н. Бенардоса и тайна создания первого способа дуговой сварки. // Сварщик. — 2011. — № 3. — С. 44–48.
2. Корниенко А. Н. Столетие изобретения электрической дуговой сварки. // Автомат. сварка. — 1981. — № 2. — С. 1–6.
3. Патон Б. Е. Изобретение века. // Наука и жизнь. — 1981. — № 10. — С. 2–10.
4. 100-летие со дня изобретения электродуговой сварки / Новости. Информационный бюллетень ЮНЕСКО. — Париж — 1981. — № 5. — С. 16–18.
5. Н. Н. Бенардос. Научно-технические изобретения и проекты. Избранные труды / Киев: Наукова думка, 1982. — 238 с.
6. Рюльман Р. Способ г-на Бенардоса электрического спаивания и сваривания под названием «Электрогест» / С.-Петербург: Отчет, 1887. — 18 с.
7. Hospitalier E. Le travail électrique des métaux // Nature / E. Hospitalier. — 1887. — № 754. — P. 57–58.
8. Кордес С. Э. Электрогест. Опытная станция электрической обработки металлов по способу Н. Н. Бенардоса // Отчет политех. О-ва при Московском техн. училище за 1881–1888 гг. — М., 1888. — С. 35–56.
9. Очерк работ русских по электротехнике с 1800 по 1900 год. — СПб., 1900. — 129 с.
10. Каталог изобретений потомственного дворянина Николая Николаевича Бенардоса. — СПб., 1890. — 12 с.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

Название книги Цена (руб.)*

- В. М. Литвинов, Ю. Н. Лысенко.**
Кислородная резка и внепечной нагрев в тяжелом машиностроении. 2017.— 368 с. 600
- В. И. Лакомский, М. А. Фридман.**
Плазменно-дуговая сварка углеродных материалов с металлами. 2004.— 196 с. 400
- А. А. Кайдалов.** Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Издание 2-е, переработанное и дополненное. 2004.— 260 с. 500
- В. Я. Кононенко.** Газовая сварка и резка. 2005.— 208 с. 400
- С. Н. Жизняков, З. А. Сидлин.** Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология. 2006.— 368 с. 500
- А. Я. Ищенко и др.** Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях. 2006.— 112 с. с илл. 400
- П. М. Корольков.** Термическая обработка сварных соединений. 3-е изд., перераб. и доп. 2006.— 176 с. 400
- А. Е. Анохов, П. М. Корольков.** Сварка и термическая обработка в энергетике. 2006.— 320 с. 500
- Г. И. Лащенко.** Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. 2006.— 384 с. 500
- А. А. Кайдалов.** Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. 2007.— 456 с. 500
- П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев.** Плазменная наплавка. 2007.— 292 с. 500
- А. Г. Потапьевский.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. 2007.— 192 с. 500
- Г. И. Лащенко, Ю. В. Демченко.** Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций. 2008.— 168 с. 400
- Б. Е. Патон, И. И. Заруба и др.** Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги. 2008.— 248 с. 400
- З. А. Сидлин.** Производство электродов для ручной дуговой сварки. 2009.— 464 с. 600
- В. Н. Радзиевский, Г. Г. Ткаченко.** Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении. 2009.— 400 с. 500
- В. Н. Корж, Ю. С. Попиль.** Обработка металлов водородно-кислородным пламенем. 2010.— 194 с. . 400
- Нормирование расхода покрытых электродов при ручной дуговой сварке и наплавке.**
Нормирование расхода сварочных материалов при сварке в углекислом газе и его смесях.
Нормирование расхода сварочных материалов при сварке под флюсом.
Справочное пособие. 2008.— 68 – 68 – 40 с. 200
- ** Г. И. Лащенко.** Современные технологии сварочного производства. 2012.— 720 с. 300

* Цены на книги указаны без учета стоимости доставки.

** Продается только в электронной версии.

Электронные версии книг стоят в два раза дешевле.

Тарифы на рекламу в 2017 г.

На внутренних страницах

Площадь	Размер, мм	Стоимость, руб.*
1 полоса	210×295	25000
1/2 полосы	180×125	13000
1/4 полосы	88×125	7000

На страницах основной обложки

Страница	Размер, мм	Стоимость, руб.
1 (первая)	215×185	50000
4 (последняя)	210×295 (после обрезки 205×285)	36000
2		33000
3		30000

(* все цены в руб. с НДС)

Изготовление оригинал-макета

- 10% стоимости рекламной площади

Статья на правах рекламы

- 1 стр. — 10000 руб.

Прогрессивная система скидок

Количество подач	2	3	4	5	6
● Скидка	5%	10%	13%	17%	20%

Требования к оригинал-макетам

Для макетов «под обрез»: формат издания после обрезки 205×285 мм; до обрезки 210×295 мм; внутренние поля для текста и информативных изображений не менее 15 мм.
Файлы принимаются в форматах: PDF, AI, INDD, TIF, JPG, PSD, EPS, CDR, QXD с прилинкованными изображениями и шрифтами. Изображения должны быть качественными, не менее 300 dpi, цветовая модель CMYK, текст в кривых, если нет шрифтов. Размеры макета должны точно соответствовать указанным редакцией.

Зам. гл. ред., рук. ред. **В. Г. Абрамишвили**, к. ф. - м. н. :
тел./факс: +380 44 200-80-14, моб.: +380 50 413-98-86,
моб.: +380 95 146-06-91
e-mail: welder.kiev@gmail.com

Ред., зам. рук. ред. **О. А. Трофимец**:
тел./факс: +380 44 200-80-18
e-mail: trofimits.welder@gmail.com

www.welder.stc-paton.com

Подписка-2017 на журнал «Сварщик в России»

Подписной индекс **20994**
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103**
в каталоге российской прессы

«Почта России» — персональная подписка
На электронную версию журнала можно подписаться в редакции или на сайте:
www.welder.stc-paton.com (скидка 50 %)