

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Ланкин,
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,
В. Д. Позняков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
В. И. Лысак (Россия)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Г. А. Туричин (Россия)
Чжан Янмин (Китай)
Д. фон Хофе (Германия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина
Электронная верстка:
А. И. Сулима, И. Р. Наумова,
И. В. Петушков

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечни
утвержденных ВАК Украины
и Российской Федерации изданий
для публикации трудов
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кривцун И. В., Семенов И. Л., Демченко В. Ф. Численный анализ процессов нагрева и конвективного испарения металла при обработке излучением импульсного лазера 5
Махненко В. И., Бут В. С., Козлитина С. С., Олейник О. И. Риск разрушения магистрального трубопровода с дефектами утонения стенки при ремонте под давлением 11
Устинов А. И., Зиньковский А. П., Токарь И. Г., Скородзиевский В. С. Возможности снижения динамической напряженности конструктивных элементов машин с помощью наноструктурированных покрытий 15
Черных И. В., Рачков С. А. Моделирование процесса индукционного нагрева труб в зоне сварного шва 22
Васильев Ю. С., Паршутин Л. С., Чукашкин А. Н. Разработка технологии формирования механических и клеємеханических соединений методом продавливания 25
Левченко О. Г., Лукьяненко А. О., Полукаров Ю. О. Экспериментальное и расчетное определение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны при дуговой сварке покрытыми электродами 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Кравчук Л. В., Ляшенко Б. А., Цыбанев Г. В., Куриат Р. И., Буйских К. П., Налимов Ю. С. Оценка эффективности ремонтных технологий для эксплуатации энергетических установок 35
Козулин С. М., Лычко И. И., Козулин М. Г. Повышение сопротивляемости сварных швов образованию кристаллизационных трещин при ремонте бандажей обжиговых печей электрошлаковой сваркой 41
Касаткин О. Г., Царюк А. К., Скульский В. Ю., Гаврик А. Р., Моравецкий С. И. Особенности технологии сварки трубопроводов из разнородных сталей в атомной энергетике 44
Письменный А. С., Кислицын В. М. Влияние ударной обработки металла шва на прочность сварного соединения 47

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Долиненко В. В., Коляда В. А., Скуба Т. Г., Шаповалов Е. В. Методика оценки транспортных запаздываний в АСУ формированием сварного шва 51
Диссертации на соискание ученой степени 53
По страницам Welding and Cutting 57

ХРОНИКА

Семинар Deloro Stellite GmbH в Запорожье 59
Четвертый международный семинар «Новые направления исследований в области высокочастотной электросварки живых мягких тканей» 63
Семинар-форум ПИИ ООО «БИНЦЕЛЬ УКРАИНА» 65

ИНФОРМАЦИЯ

Календарь выставок и конференций на 2010 г. 66

Avtomaticheskaya Svarka

№ 1 (681)
January 2010
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,
A. T. Zelnichenko,
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),
V. I. Kiryan, Yu. N. Lankin,
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,
V. I. Makhnenko,
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
V. I. Lysak (Russia)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
G. A. Turichin (Russia)
Zhang Yanmin (China)

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23

Fax: (38044) 528 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua

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

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina

Electron galley:

A. I. Sulima,

I. R. Naumova,

I. V. Petushkov

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

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

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

CONTENTS

NEWS 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Krivtsun I. V., Semyonov I. L., Demchenko V. F. Numerical analysis of processes of heating and convective evaporation of metal in treatment by a pulsed laser radiation 5
Makhnenko V. I., Boot V. S., Kozlitina S. S., Oleinik O. I. Risk of fracture of main pipeline with defects of wall thinning in repair under pressure 11
Ustinov A. I., Zinkovsky A. P., Tokar I. G., Skorodzievsky V. S. Possibilities of reduction of dynamic intensity of machine design elements by using nanostructured coatings 15
Chernykh I. V., Rachkov S. A. Modeling of process of induction heating of pipes in weld zone 22
Vasiljev Yu. S., Parshutina L. S., Chukashkin A. N. Development of technology of formation of mechanical and adhesive-mechanical joints using a method of punching 25
Levchenko O. G., Lukjanenko A. O., Polukarov Yu. O. Experimental and calculated determination of concentration of harmful elements in air of working zone in arc welding with coated electrodes 31

INDUSTRIAL

Kravchuk L. V., Lyashenko B. A., Tsybanov G. V., Kuriat R. I., Bujskikh K. P., Nalimov Yu. S. Evaluation of effectiveness of repair technologies for service of power equipment 35
Kozulin S. M., Lychko I. I., Kozulin M. G. Improvement of weld resistance against formation of crystalline cracks in ESW repair of bands of kiln rotary furnaces 41
Kasatkin O. G., Tsaryuk A. K., Skulsky V. Yu., Gavrik A. R., Moravetsky S. I. Peculiarities of technology of welding pipelines of dissimilar steels in nuclear power engineering 44
Pismennyi A. S., Kisilitsin V. M. Effect of impact treatment of weld metal on strength of welded joint 47

BRIEF INFORMATION

Dolinenko V. V., Kolyada V. A., Skuba T. G., Shapovalov E. V. Method of evaluation of transportation lag in automatic control systems of weld bead formation 51
Theses for scientific degree 53
Review of journal «Welding and Cutting» 57

NEWS

Technological seminar Deloro Stellite GmbH in Zaporozhye 59
IV International Seminar «New trends in investigations in the field of high-frequency electric welding of live soft tissues» 63
Seminar-forum of «Binzel Ukraine» 65

INFORMATION

Calendar of exhibitions and conferences for 2010 66

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

ЕСЛИ НЕЛЬЗЯ ПРИВА- РИТЬ, ПРИКРЕПИМ «КНОПКАМИ» (скрепление металла органи- ческим материалом)

Электродуговая сварка предполагает использование электропроводящих металлов. Эта прописная истина получает удивительное дополнение: электродуговая сварка может создать условия для соединения металлов органическими и другими материалами! Благодаря новинке компании «Фрониус» — процессу SMT Pin — такие материалы, как, например, сталь вступает в «зацепление» с внутренним геометрическим замыканием в пластмассе. Такое соединение может быть временным или постоянным: разъемным по принципу молнии либо прочно соединенным.

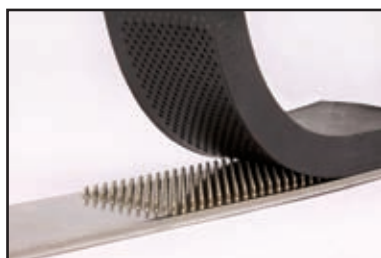


Рис. 1. С помощью эластичного материала, например, пластмассы или резины, штифты создают на металле разъемное соединение по принципу застёжки-липучки

При соединении SMT Pin металлическая часть приобретает специальную трехмерную поверхность, схожую со щеткой. Будучи зафиксированной клеем в пластмассовом материале соединение способно переносить в продольном направлении в десять раз большее усилие по сравнению с чистым клеевым соединением между гладкими поверхностями. Отправной точкой для нового метода соединения «Fronius» стали металлические штифты диаметром 0,8мм и длиной 3мм.

Модифицированная SMT-система наваривает около десяти таких штифтов на квадратный сантиметр соединяемой металлической поверхности. В зависи-

мости от требуемого вида соединения они имеют шарообразные «булавочные головки», острые или плоские концы. Шарообразные головки, вдавленные в эластичную пластмассу, создают эффект, подобный застёжке-липучке. При жесткой фиксации клеем или погружении в материал с жестким геометрическим замыканием можно добиться прочного, неразрывного соединения.

Из металлической обшивки с расположенными штифтами, усиленной текстильным или стекловолокном, залитой бетоном или пластмассой, получают готовые элементы для строительства мостов, зданий или передвижных конструкций. Разъемы для строительных элементов CFK можно встроить в металло-



Рис. 2. Штифты на валу из высоколегированной стали служат в качестве анкеров или геометрически замыкаемых «зацепляющихся крючков» для алюминиевой оболочки

конструкции уже при изготовлении; в этом случае вместо ввертываемых единичных элементов получают прочный моноблок. Металлические соединения в элементах CFK отлично подходят для деталей, подвергающихся высоким нагрузкам, например, в авиационной промышленности. Для керамических, металлических и иных толстых изнашиваемых слоев SMT-штифты создают надежное сцепление с подложкой. Имеется потенциал также для сухих и клеевых деревянных соединений. Технология SMT Pin основана на уникальном процессе CMT (Cold Metal Transfer — перенос холодного металла). Он отличается электронно-цифровым высокоточным регулированием процесса и

реверсируемой подачей проволоки в качестве неотъемлемого компонента. Кроме того, решающим для технологии SMT Pin является точно воспроизводимая длина проволоки между поверхностью металла и электрической контактной поверхностью в контактно токоподводе электродуговой сварочной системы. Это становится возможным благодаря инновационной контактной трубке Contec компании «Fronius». Точное и быстрое управление, например, выключение и включение тока, отвод назад проволоки в сочетании с сопряжением нагрева проволоки для расплавления в центре провода и усилия возврата проволоки, создает готовые штифты с 2-секундным тактом.

KEMPACT™ PULSE 2800 AUTOMOTIVE — ИДЕА- ЛЕН ПРИ АВТОРЕМОНТЕ

При разработке сварочной машины Kemptac™ Pulse 2800 Automotive «KEMPPi» были учтены требования автомобильной промышленности и авторемонтных предприятий. Сегодня в автомобильной промышленности широко используют оцинкованную сталь и проволоки системы легирования Cu-Si и Cu-Al, для сварки которых Kemptac™ Pulse 2800 Automotive как раз и был создан. Машина достаточно эффективна для сварки и сваркопайки различных материалов, идеальна при сварке оцинкованной стали толщиной от 0,5 до 0,8мм.

В машине имеются готовые синергетические программы как для сваркопайки, так и для сварки стали и алюминия. Способ сваркопайки позволяет обеспечить высокую производительность без разбрызгивания.

Аппарат Kemptac™ Pulse 2800 Automotive осуществляет сварку либо в импульсном, либо в однонопочном режиме МИГ. Благодаря готовым синергетическим программам, настройка сварочных параметров и сама сварка происходит быстро. Малогабаритный и легкий аппарат может находиться рядом с местом сварки. При необходимости ра-



бочий вылет может быть увеличен шестиметровой горелкой WeldSnake™. По своей конструкции и безопасности установки Kempack™ Pulse 2800 Automotive соответствуют стандартам IEC 974-1 и IEC 60974-5, они имеют также маркировку CE, класс защиты установок IP23C.

Преимущества: синергетические программы для ремонтной сварки кузовов автомобилей, пригодность для сварки всех материалов, высокопроизводительная сваркопайка без брызг, возможность регулировки одной кнопкой, таймер точечной сварки — для точной прихватки, отличное соотношение мощности к массе, легкая, компактная конструкция.

Область применения: авторемонт там, где необходима сварка алюминия, тонколистовые работы.

«ГИДРОБЭБИ» ИЗМЕРЯЕТ ВЛАЖНОСТЬ ГАЗОВ

Влага, содержащаяся в газах и сжатом воздухе, способна причинить существенный ущерб, поэтому важное значение имеет регулярный контроль влажности. Новейший прибор для этого называется «HYDROBABY» и является продуктом фирмы «Witt-Gasetechnik» (Германия).

Этот уместающийся в одной руке анализатор разработан для мобильного применения. Он оборудован керамическим металлооксидным датчиком, определяющим влажность газов по точке росы. Этот способ имеет значительные преимущества перед другими: обеспечивает быст-

рый и точный анализ, минимальную восприимчивость к температуре окружающей среды, незначительную погрешность ($\pm 2^\circ\text{C}$), а также широкий диапазон измерения от -110 до $+20^\circ\text{C}$.

Благодаря этому «Гидробэби» идеально подходит для отраслей с очень высокими требованиями к точности, например, в медицине, фармацевтике и биотехнологиях.

Классическими областями его применения являются технологические процессы в металлообработке, в том числе сварке, пищевой промышленности, защите окружающей среды, индустрии газообразных видов топлива и многих других областях применения технических газов и воздуха.



Компактный и удобный прибор изготовлен из ударопрочной пластмассы и прессованного алюминия и весит всего около 1600 г. Оснащен долговечным аккумулятором и подсвеченным графическим дисплеем с возможностью выбора языка меню.

Предусмотрена индикация всех существенных параметров, в частности, точки росы, относительной влажности в процентах или концентрации влаги в ppm (частях на миллион), и, кроме того, температуры окружающей среды, давления в измерительной камере, а также представления в виде графика результатов анализа. Для хранения последних предусмотрена динамическая память на 4000 измерений. Встроенная функция самоконтроля защищает от ошибок измерения и предупреждает о засорении фильтра.

Пользователь может сортировать результаты по наименованиям различных продуктов или процессов. Встроенный интер-

фейс USB позволяет экспортировать данные в целях их дальнейшей обработки и документирования. Порт USB имеет и еще одну практическую функцию: зарядка аккумулятора.

Для эксплуатации во взрывоопасных зонах «HYDROBABY» выпускается в отдельном исполнении, а также с различными опциями.

НОВЫЕ РАСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

«Thermal Dynamics» разработал новый электрод для работы в автоматическом режиме с установками воздушно-плазменной резки Cutmaster серии A. Новый электрод обеспечивает превосходное качество резки металлов с толщиной от 10 до 40 мм и обладает более высоким и постоянным ресурсом по сравнению со стандартным. Электрод пригоден для использования не только на производимых в настоящее время аппаратах Cutmaster серии A, но и на аппаратах Cutmaster, выпускаемых «Thermal Dynamics» ранее.



Компания также разработала новое сопло «120 ампер» для автоматической резки, используемое с установкой Cutmaster A120. Оно предназначено для резки при токе дуги 120 А, и, работая в сочетании с новым электродом, дополнительно улучшает качество резки, при этом имеет более высокий ресурс. Модельный ряд установок Cutmaster серии A включает источники на ток дуги от 40 до 120 А, способные разрезать листы из низкоуглеродистой стали толщиной до 40 мм.



ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И КОНВЕКТИВНОГО ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

Чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **И. Л. СЕМЕНОВ**, инж., **В. Ф. ДЕМЧЕНКО**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена математическая модель процессов нагрева, плавления и испарения металла под воздействием импульса сфокусированного лазерного излучения. Модель позволяет описывать тепловые процессы в объеме металла и газодинамические процессы в потоке металлического пара при лазерной обработке с использованием импульсных лазеров. Проведен численный анализ процессов нагрева и конвективного испарения металла при воздействии миллисекундного импульса излучения Nd:YAG-лазера на образец из низкоуглеродистой стали.

Ключевые слова: импульсный лазер, лазерное излучение, металл, температурное поле, испарение, металлический пар, Кнудсеновский слой, газодинамические процессы, математическая модель

Исследование физических процессов, происходящих при взаимодействии лазерного излучения высокой интенсивности с веществом, играет важную роль в развитии новых технологий лазерной сварки и обработки различных, в первую очередь, металлических материалов [1–4]. Особый интерес для развития таких технологий, как микросварка, гравировка, сверление и прочих, представляет изучение процессов взаимодействия с металлами сфокусированного излучения импульсных и импульсно-периодических лазеров [5–8]. К таким процессам относятся поглощение лазерного излучения металлом, его нагрев, плавление и последующее испарение, сопровождающееся разлетом металлического пара в окружающий газ (конвективный режим испарения). Обычно при анализе конвективного испарения металлов для определения количественных характеристик процесса испарения (плотности, температуры и скорости разлета пара) используют модель, предложенную Ч. Найтом [9]. Данная модель построена в предположении, что течение пара является одномерным и стационарным. Однако при высокоскоростном нагреве металла сфокусированным излучением импульсного лазера оба эти предположения заведомо не выполняются, так как после достижения температуры кипения T_b в центре пятна нагрева поверхность расплава продолжает нагреваться до температур, намного превышающих T_b , а поток пара, истекающего из пятна нагрева, получает боковую разгрузку, что нарушает одномерную картину течения, предполагаемую в работе [9]. В настоящей работе проводится анализ применимости различных моделей конвективного

испарения металла в условиях нагрева металлической пластины сфокусированным пучком излучения импульсного лазера (без учета ионизации пара и образования лазерной плазмы).

Рассмотрим процесс нагрева металлической пластины одиночным импульсом сфокусированного лазерного излучения. Полагая пространственное распределение интенсивности излучения симметричным относительно оси пучка, сформулируем математическую модель нагрева пластины в осесимметричной постановке. Введем цилиндрическую систему координат так, как показано на рис. 1. Предположим, что интенсивность излучения I_0 распределена равномерно по пятну нагрева радиуса R_0 и остается постоянной в течение импульса. Интенсивность излучения I_0 определяется через полную энергию импульса W , его длительность τ и площадь поперечного сечения пучка на поверхности пластины $S = \pi R_0^2$ следующим образом: $I_0 = W/(\tau S)$.

Для большинства металлов можно пренебречь объемным характером поглощения лазерного излучения. Тогда тепловое воздействие лазерного пучка на металлический образец можно представить в виде поверхностного источника тепла, распределенного по поверхности пластины с плотностью $q(r)$:

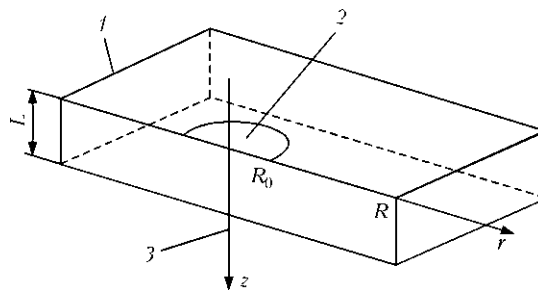


Рис. 1. Схема нагрева металлической пластины лазерным пучком: 1 — пластина; 2 — пятно нагрева; 3 — ось лазерного пучка



$$q(r) = \begin{cases} A(T_s)I_0 & \text{при } r \leq R_0, \\ 0 & \text{при } r > R_0, \end{cases} \quad (1)$$

где $A(T_s)$ — коэффициент поглощения лазерного излучения, зависящий от температуры поверхности металла $T_s(r)$.

Уравнение теплопроводности в образце запишем в виде

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (2)$$

$$0 < r < R, \quad 0 < z < L, \quad t > 0,$$

где $C(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ — соответственно эффективная теплоемкость металла (с учетом скрытой теплоты плавления), плотность и коэффициент теплопроводности.

Граничные условия для уравнения (2) запишем в виде

$$\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0; \quad T(r, L, t) = T(R, z, t) = T_0;$$

$$-\lambda(T_s)\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0} = q - q_{rc} - q_e. \quad (3)$$

Здесь $q_{rc}(T_s) = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_0^4) + \alpha(T_s - T_0)$ — потери тепла на излучение и теплообмен поверхности с окружающей средой; ε — степень черноты поверхности металла; σ — постоянная Стефана-Больцмана; α — коэффициент теплообмена; T_0 — температура окружающей среды; $q_e(T_s) = \kappa q_m(T_s)$ — удельный поток тепла, уносимого паром с поверхности расплава; κ — удельная теплота парообразования; $q_m(T_s) = \bar{\rho}\bar{u}$ — удельный массовый поток пара; $\bar{\rho}$, $\bar{u}$ — соответственно плотность и скорость металлического пара вблизи испаряющейся поверхности.

Для замыкания задачи (2), (3) требуется использовать модель конвективного испарения металла, позволяющую рассчитывать скорость $\bar{u}$ и плотность $\bar{\rho}$. В рамках модели испарения Найта структуру одномерного дозвукового течения пара можно представить следующим образом (рис. 2): по внешнему газу распространяется ударная волна, за которой движется контактный разрыв, представляющий собой область контакта внешнего газа и расширяющегося металлического пара.

Вблизи испаряющейся поверхности металла существует кнудсеновский слой толщиной порядка нескольких длин свободного пробега, за пределами которого (в газодинамической области течения) устанавливается равновесие по поступательным степеням свободы частиц пара. В работе [9] предложены следующие соотношения, связывающие плотность $\bar{\rho}$ и температуру $\bar{T}$ пара на

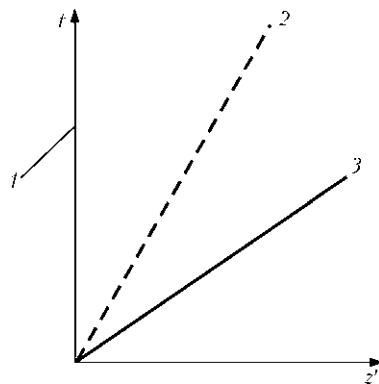


Рис. 2. Схема одномерного разлета пара [9]: 1 — кнудсеновский слой; 2 — контактный разрыв; 3 — ударная волна

границе кнудсеновского слоя с плотностью насыщенного пара ρ_s и температурой испаряющей поверхности T_s :

$$\frac{\bar{T}}{T_s} = \left[\sqrt{1 + \pi \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \frac{m}{2} \right)^2} - \sqrt{\pi} \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \frac{m}{2} \right]^2, \quad (4)$$

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} = \sqrt{\frac{T_s}{\bar{T}}} \left[\left(m^2 + \frac{1}{2} \right) e^{m^2} \operatorname{erfc}(m) - \frac{m}{\sqrt{\pi}} \right] + \frac{1}{2} \frac{T_s}{\bar{T}} [1 - \sqrt{\pi} m e^{m^2} \operatorname{erfc}(m)]. \quad (5)$$

Здесь $m = \bar{u} / \sqrt{2\Re\bar{T}} = \sqrt{\gamma/2\bar{M}}$; $\Re$ — газовая постоянная; $\gamma = 5/3$ — показатель адиабаты пара, предполагаемого одноатомным идеальным газом; $\bar{M}$ — число Маха на границе кнудсеновского слоя.

Давление насыщенного пара находится из уравнения Клайперона-Клаузиуса, а плотность — из уравнения состояния идеального газа $\bar{p} = \bar{\rho}\Re\bar{T}$. Скорость $\bar{u}$ и давление $\bar{p}$ связаны с плотностью ρ_0 и давлением во внешнем газе через соотношение на ударной волне [9]

$$\bar{u} = \frac{\bar{p} - p_0}{\sqrt{\frac{\rho_0}{2}(\bar{p}(\gamma+1) + p_0(\gamma-1))}}. \quad (6)$$

Из соотношений (4)...(6) можно получить одно нелинейное уравнение для определения скорости $\bar{u}$ (возможность применения сопряженной модели (2)...(6) ограничивается предположением Найта о стационарном характере течения пара).

Рассмотрим задачу нестационарной газовой динамики металлического пара, сохраняя, как и ранее, предположение об одномерной картине течения. Пусть Oz' — ось цилиндрической системы координат, направленная перпендикулярно поверхности пластины в сторону паровой фазы. При большом числе Рейнольдса (скорость разлета пара по порядку величины составляет 500...700 м/с)



для описания газодинамики парогазовой смеси можно использовать уравнения Эйлера

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial z'} = 0, \quad z' \in [0, H], \quad (7)$$

где $\vec{U} = (\rho_m, \rho, \rho u, E)$; $\vec{F} = (\rho_m u, \rho u, \rho u^2 + p, (E + p)u)$; ρ, u, p — соответственно плотность, скорость и давление смеси; ρ_m — плотность металлического пара; $E = \rho e + \rho u^2/2$ — энергия смеси; $e = p/(\gamma - 1)$ — внутренняя энергия.

Уравнения (7) интегрируем при следующих граничных и начальных условиях:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial z'} \Big|_{z'=H} = 0, \quad t > 0, \quad (8)$$

$$u(0, t) = u_{0+} + \frac{p(0, t) - p_{0+}}{\sqrt{\frac{\rho_{0+}}{2} [p(0, t)(\gamma + 1) + p_{0+}(\gamma - 1)]}}, \quad (9)$$

$$\rho_m(0, t) = \rho(0, t), \quad p(0) = p(0, t)RT, \quad t \geq 0; \quad (10)$$

$$p(z', 0) = p_0, \quad u(z', 0) = 0, \quad \rho(z', 0) = \rho_0,$$

$$\rho_m(z', 0) = 0, \quad 0 < z' < H,$$

где $p_{0+} = p(+0, t)$; $\rho_{+0} = \rho(+0, t)$; $u_{+0} = u(+0, t)$.

Плотность ρ и температура T при $z' = 0, t \geq 0$ определяются из условий (4) и (5), полагая $\bar{\rho} = \rho, \bar{T} = T, \bar{u} = u(0, t)$.

Для численного решения задачи (2), (3) использовали метод Писмена–Рэкфорда [10] с локальными итерациями по нелинейности в разностном аналоге условия локального баланса энергии на поверхности пластины. Задачу нестационарной газовой динамики (7)–(10) решали методом Годунова 2-го порядка точности [11].

Рассмотрим нагрев пластины из низкоуглеродистой стали одиночным импульсом сфокусированного лазерного излучения со следующими параметрами: $I_0 = 5 \cdot 10^6$ Вт/см², $\tau = 1$ мс, $R_0 = 0,1$ мм, что соответствует, например, характерным параметрам режима работы импульсного Nd:YAG-лазера, входящего в состав установки для сварки, резки и глубокой гравировки [12]. Толщина пластины L и радиус расчетной области R (см. рис. 1) выбраны следующими: $L = 1$ мм, $R = 2$ мм. Теплофизические свойства низкоуглеродистой стали были взяты из работы [13], а соответствующую температурную зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения рассчитали по данным работ [14–16] (рис. 3). В качестве испаряемого вещества рассматривали железо, а в качестве атмосферного газа — воздух при нормальных условиях.

Проведем сравнительный анализ решения самосогласованной задачи нагрева (1)–(3) и конвективного испарения металла для двух моделей

газодинамики пара: стационарной [9] и нестационарной (4), (5), (7)–(10) применительно к нагреву пластины импульсом лазерного излучения. Результаты расчета приведены на рис. 4, 5 (время на рис. 4, б, 5 отсчитывается от начала испарения). При выбранных параметрах лазерного импульса температура в центре пятна нагрева достигает температуры кипения за 7 мкс (рис. 4, а) и в течение примерно 80 мкс продолжает повышаться до 3800 °С, после чего остается практически постоянной до конца импульса. В режиме стабилизации температуры поверхности металла тепловой поток за счет лазерного нагрева компенсируется потерями тепла на испарение и отчасти лучистым теплообменом поверхности с окружающей средой.

К моменту времени (относительно начала испарения), когда температура поверхности металла перестает изменяться во времени, ударная волна перемещается на расстояние, значительно превышающее характерный размер области решения газодинамической задачи (например, диаметра пятна нагрева) и не влияет на кинетику процесса испарения металла с поверхности расплава. Если время выхода на стационарное значение температуры поверхности жидкого металла стремится к нулю (бесконечно большая скорость нагрева), то газодинамические характеристики потока (скорость, давление) соответствуют модели Найта. Несмотря на то что в нестационарной модели конвективного испарения эти характеристики отличаются от идеализированной схемы течения Найта (см. рис. 5), значения удельного массового потока пара на границе Кнудсеновского слоя, рассчитанные по стационарной и нестационарной моделям испарения, практически совпадают (см. рис. 4, б). Это объясняется тем, что время выхода температуры поверхности на стационарное значение (см. рис. 4, а) намного меньше характерного времени установления газодинамических процессов. Поэтому следует ожидать, что при уменьшении скорости нагрева будет наблюдаться более существенное отличие в структуре течения и со-

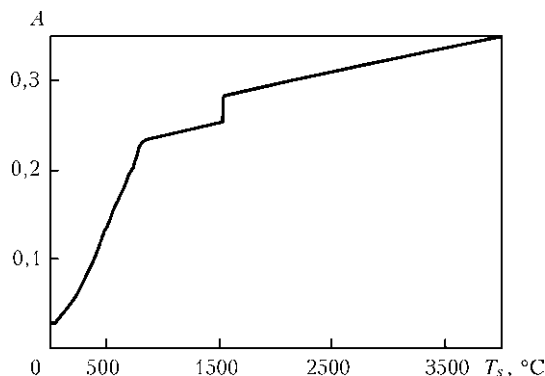


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента поглощения излучения Nd:YAG-лазера на образец из низкоуглеродистой стали

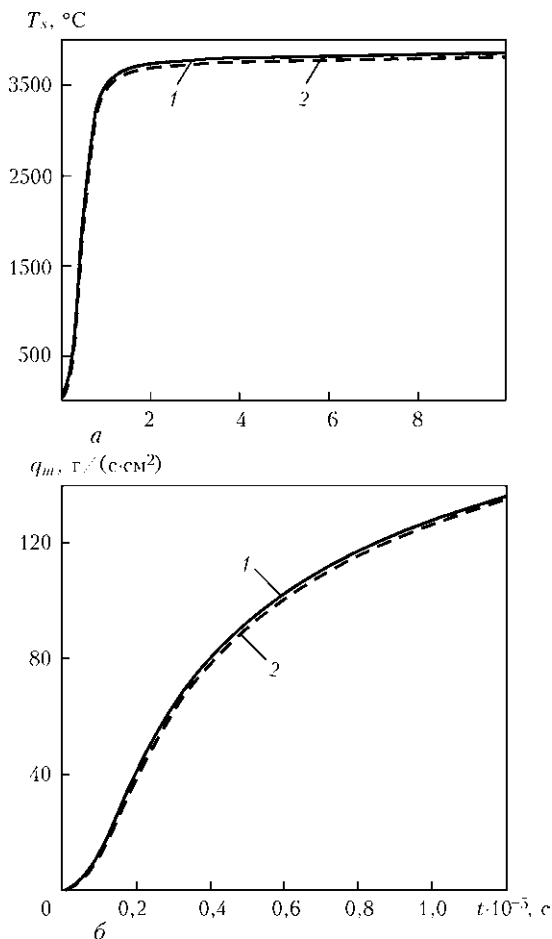


Рис. 4. Динамика изменения температуры металла в центре пятна лазерного нагрева (а) и массового потока пара с поверхности расплава (б): 1 — нестационарная; 2 — стационарная модель

ответственно в значении удельного массового потока $q_m(t)$.

В качестве иллюстрации к последнему утверждению рассмотрим нагрев пластины лазерным излучением с меньшей интенсивностью $I_0 = 7 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$. В отличие от условий нагрева, рассмотренных выше, при невысоких скоростях нагрева различия между стационарной и нестационарной моделями испарения с точки зрения решения тепловой задачи становятся более существенными (рис. 6). Таким образом, при более низких скоростях нагрева требуется учитывать нестационарный характер газодинамических процессов.

Рассмотренные выше модели справедливы для испарения металла с развитой поверхностью жидкости (с неограниченной плоской поверхностью). При испарении с поверхности пятна небольшого диаметра, как это имеет место при воздействии на металл сфокусированного лазерного излучения, предположение об одномерной структуре газодинамического течения нарушается. Для исследования влияния бокового разлета пара рассмотрим двухмерную задачу газовой динамики для парогазовой смеси в осесимметричной постановке.

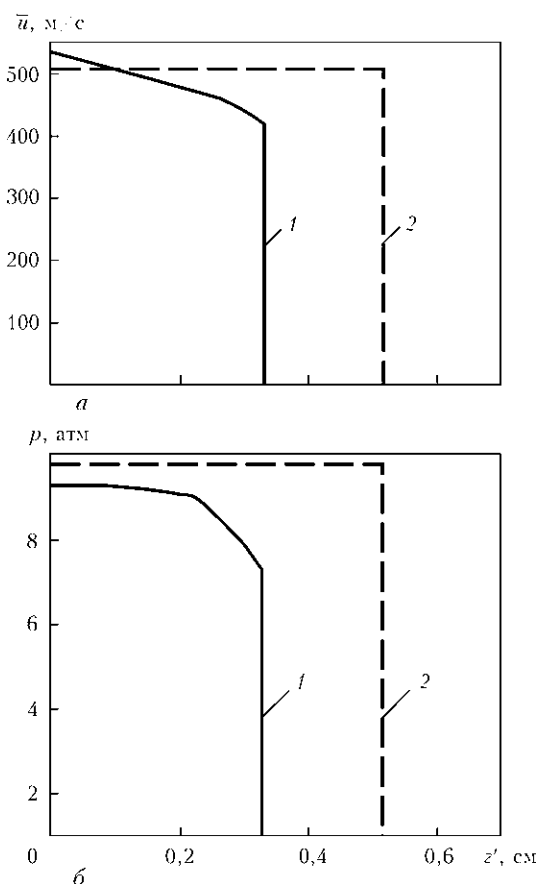


Рис. 5. Распределение скорости движения пара (а) и газодинамического давления (б) в паровой фазе при $t = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$: 1, 2 — то же, что и на рис. 4

Уравнения Эйлера в цилиндрической системе координат (r, z') имеют вид

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial r} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial z'} = -\frac{\vec{f}}{r}. \quad (11)$$

Здесь $\vec{U} = (\rho_1, \rho, \rho u, \rho v, E)$; $\vec{f} = (\rho_1 u, \rho u, \rho u^2, (E+p)u)$; $\vec{F} = (\rho_m u, \rho u, \rho u^2 + p, \rho u v, (E+p)u)$; $\vec{G} = (\rho_m v, \rho v, \rho u v, \rho v^2 + p, (E+p)v)$; u, v — соответственно аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости;

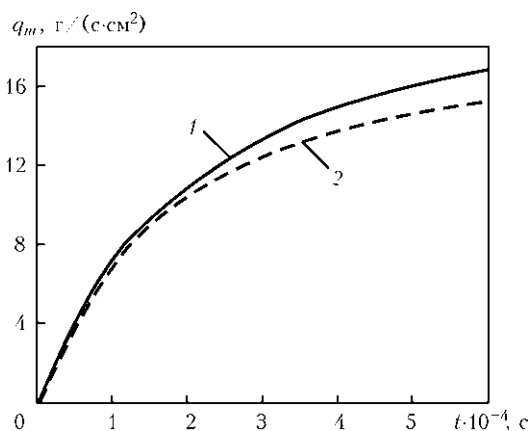


Рис. 6. Изменение массового потока пара во времени при $I_0 = 7 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$: 1, 2 — то же, что и на рис. 4



$E = \rho e + (\rho u^2 + \rho v^2)/2$ — энергия смеси; $e = p/\rho(\gamma - 1)$.

Уравнение (11) будем интегрировать в области, показанной на рис. 7.

Границы Γ_4 , Γ_5 являются внешними границами области течения, Γ_3 — ось симметрии, Γ_6 — поверхность металла вне пятна испарения. Кнудсеновский слой на поверхности жидкой металлической ванны моделируется прямоугольным выступом с границами Γ_1 , Γ_2 . На границе Γ_1 задается граничное условие, аналогичное (9). Касательная компонента вектора скорости на этой границе определяется из области течения по характеристическим соотношениям. На поверхности металла ставится граничное условие непротекания, на оси течения — условие симметрии, а на внешних границах Γ_4 и Γ_5 — неотражающие граничные условия. Начальные условия задаются в виде: $p = p_0$, $u = 0$, $v = 0$, $\rho = \rho_0$, $\rho_1 = 0$, где p_0 , ρ_0 — давление и плотность атмосферного газа.

Сформулированную задачу двумерной газовой динамики решали методом Годунова 2-го порядка точности (TVD схема). Размеры расчетной области выбирали следующим образом: длина границы Γ_1 составляла 0,015 см, толщину кнудсеновского слоя Γ_2 принимали равной 0,006 см (исходя из оценки средней длины свободного пробега в атмосферном газе и в парах металла непосредственно над расплавом). Размеры внешних границ расчетной области Γ_5 , Γ_6 принимали равными $6L_0$. В качестве внешнего газа рассматривали воздух при нормальных условиях. Температуру испаряющейся поверхности металла принимали постоянной и равной 4000 °С.

Результаты расчетов представлены на рис. 8, 9. При наличии боковой разгрузки парового потока возникает качественно иная картина течения. Скорость на границе кнудсеновского слоя не достигает стационарного значения (как в одномерном случае), а монотонно возрастает, пока число Маха на границе слоя не станет равным единице (рис. 8, б). После этого в области течения пара образуется

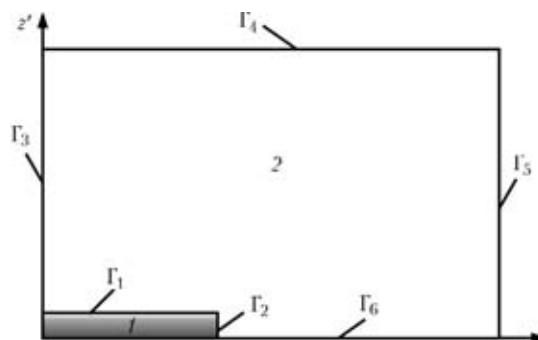


Рис. 7. Схема расчетной области для решения двумерных уравнений газовой динамики: 1 — кнудсеновский слой; 2 — газодинамическая область

стационарный скачок уплотнения, за которым с постоянной скоростью распространяется контактный разрыв. Скачок уплотнения образуется вследствие того, что давление в области между границей кнудсеновского слоя и внешним газом становится меньше атмосферного (область пониженного давления на рис. 8, а). Ударная волна в рассматриваемый момент времени находится на расстоянии 0,075 см от границы кнудсеновского слоя, а область пониженного давления и скачок уплотнения — на расстоянии 0,05 см. Подобная картина течения зафиксирована экспериментально в работе [5] при исследовании воздействия импульсного лазерного излучения на металл. Следует отметить, что аналогичная структура течения наблюдается также при сверхзвуковом истечении газа из сопла в режиме недорасширения.

Рассмотрим условия нестационарного режима нагрева металла лазерным излучением. Время выхода температуры поверхности на стационарное значение примерно на три порядка превышает время, за которое число Маха на границе кнудсеновского слоя становится равным единице. Следовательно, при наличии боковой разгрузки пара задачу о нагреве металла лазерным излучением с достаточно хорошим приближением можно рассматривать, полагая число Маха на границе кнудсеновского слоя равным единице. При этом из

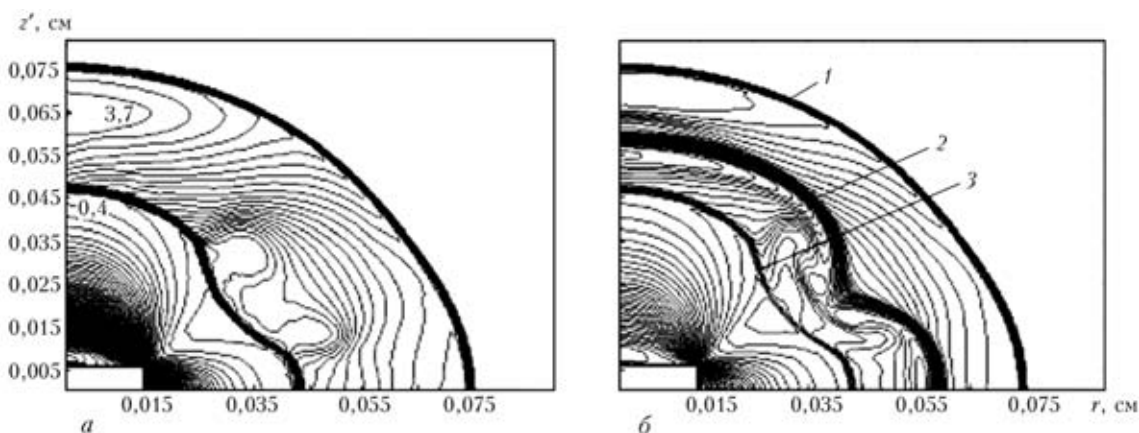


Рис. 8. Изолинии давления p/p_0 (а) и плотности (б) при $t = 4 \cdot 10^{-7}$ с: 1 — ударная волна; 2 — контактный разрыв; 3 — скачок уплотнения

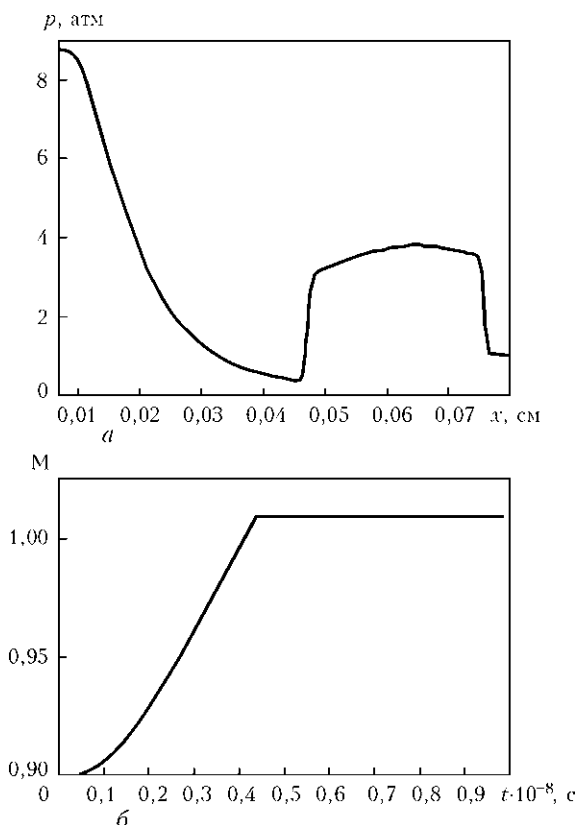


Рис. 9. Распределение давления вдоль оси симметрии при $t = 4 \cdot 10^{-7}$ с (а) и зависимость максимального числа Маха на границе кнудсеновского слоя от времени (б)

соотношений (4), (5) можно найти массовый поток, не решая задачу газовой динамики.

В заключение следует отметить, что такие важные с точки зрения технологических приложений характеристики, как тепловое состояние металла, плотность массового потока металлического пара, скорость его разлета, потери тепла на испарение и давление реакции отдачи пара, определяются не только условиями нагрева металла, но и газодинамическими процессами, протекающими в паровой фазе. В общем случае для моделирования рассматриваемой ситуации необходимо использовать самосогласованную модель, описывающую тепловые процессы в объеме металла, процессы

тепло-, массопереноса в кнудсеновском слое, а также газодинамические процессы в потоке пара.

1. *Воздействие лазерного излучения на материалы* / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
2. *Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов*. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 208 с.
3. *Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов*. — М.: Мир, 1986. — 504 с.
4. *Действие излучения большой мощности на металлы* / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов и др. — М.: Наука, 1970. — 272 с.
5. *Неподвижная ударная волна, возникающая при стационарном испарении металла под действием лазерного излучения* / В. А. Батаров, Ф. В. Бункин, А. М. Прохоров и др. // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1970. — **11**. — С. 113–118.
6. *Gas dynamics of laser ablation: Influence of ambient atmosphere* / A. V. Gusarov, A. G. Gnedovets, I. Smurov // J. Appl. Phys. — 2000. — **88**. — P. 4352–4364.
7. *Ионизационные процессы в лазерной плазме* / Ю. В. Афанасьев, Э. М. Беленов, О. Н. Крохин и др. // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1969. — **10**. — С. 553–557.
8. *Воробьев В. С. Плазма, возникающая при взаимодействии лазерного излучения с твердыми мишенями* // Укр. физ. журн. — 1993. — **163**, № 12. — С. 51–82.
9. *Найт Ч. Дж. Теоретическое моделирование быстрого поверхностного испарения при наличии противодавления* // Ракетная техника и космонавтика. — 1979. — № 5. — С. 81–86.
10. *Peacemen D. W., Rachford H. H. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations* // J. Soc. Ind. Appl. Math. — 1955. — **3**. — P. 28–41.
11. *Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений*. — М.: Физматлит, 2001. — 608 с.
12. *Кириченко В. В., Грязнов Н. А., Кривцун И. В. Экспериментальный комплекс для исследования процессов импульсной лазерно-микроплазменной сварки* // Автомат. сварка. — 2008. — № 8. — С. 34–39.
13. *Hu J., Tsai H. L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding*. — Pt I: The arc // Int. J. of Heat and Mass Transfer. — 2007. — **50**. — P. 833–846.
14. *Kikuo Uj. Reflectivity of metals at high temperatures* // J. Appl. Phys. — 1972. — **43**, № 5. — P. 2376–2383.
15. *Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared* / M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell et al. // Appl. Opt. — 1983. — **22**, № 7. — P. 1099–1119.
16. *Miller J. Optical properties of liquid metals at high temperatures* // Phil. Mag. — 1969. — **20**, № 12. — P. 1115–1132.

Mathematical model of the processes of heating, melting and evaporation of metal under the effect of a focused laser beam pulse is suggested. The model allows describing thermal processes in metal and hydrodynamic processes in a metal vapour flow occurring in laser treatment by using the pulse lasers. Numerical analysis has been conducted to study the processes of heating and convective evaporation of metal with a millisecond pulse of the Nd:YAG-laser beam affecting the low-carbon steel sample.

Поступила в редакцию 08.05.2009



РИСК РАЗРУШЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ДЕФЕКТАМИ УТОНЕНИЯ СТЕНКИ ПРИ РЕМОНТЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. С. БУТ**, канд. техн. наук,
С. С. КОЗЛИТИНА, **О. И. ОЛЕЙНИК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Показано, что ремонт сваркой дефектов типа утонения стенки трубопровода, обеспечивающий компенсацию потерянному в зоне утонения металла наплавленным металлом при ручной дуговой наплавке на малых токах (~90 А), является достаточно эффективным. Широкое применение такой технологии ремонта магистральных трубопроводов под давлением ограничивается проблемой безопасности. Показано, что минимально допустимая толщина стенки в зоне дефекта при рабочих давлениях зависит от размеров дефекта вдоль образующей и значительно меньше от размера по окружности, а также теплового режима сварки и принятого порядка заварки (наплавки) дефекта.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, давление, дефекты утонения, минимальная толщина, ремонт сваркой, порядок наплавки

В настоящее время важной задачей является ремонт линейной части магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. Наиболее распространенные дефекты в таких конструкциях обусловлены коррозионными повреждениями на наружной поверхности трубы, сопровождаемыми уменьшением толщины металла стенки. Обычно такие дефекты схематизируются некоторой пространственной фигурой с габаритными размерами S , c и a (рис. 1). При приближенном описании этого объема в системе координат x , y , z (рис. 2) поверхностью второго порядка в виде

$$\left(\frac{2x}{S}\right)^2 + \left(\frac{2y}{c}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2 = 1, \quad (1)$$

объем V присадочного металла, необходимого для заварки такого дефекта без учета разбрызгивания, определяется в виде

$$V = \pi \frac{Sca}{6}. \quad (2)$$

Время t_p , необходимое для компенсации потерянного объема металла V , равно

$$t_p = \frac{V\gamma}{\alpha_n I_{св}} \xi, \quad (3)$$

где γ — удельный вес наплавляемого металла (для стальных труб 7,8 г/см³); α_n — коэффициент наплавки ~ 7,8 г/(А·ч) для ручной дуговой сварки на низких токах $I_{св}$; $\xi > 1,0$ — коэффициент, учитывающий потери времени на выполнение вспомогательных операций.

При $\xi \approx 1,5$ и $I_{св} = 90$ А за смену (6 ч) один сварщик в состоянии заполнить объем наплавленного металла, характеризуемый размерами S , c , a и поверхностью, описываемую выражением (1), при этом объем соответствует произведению $Sca = 688 \cdot 10^3$ мм³. При указанных условиях раз-

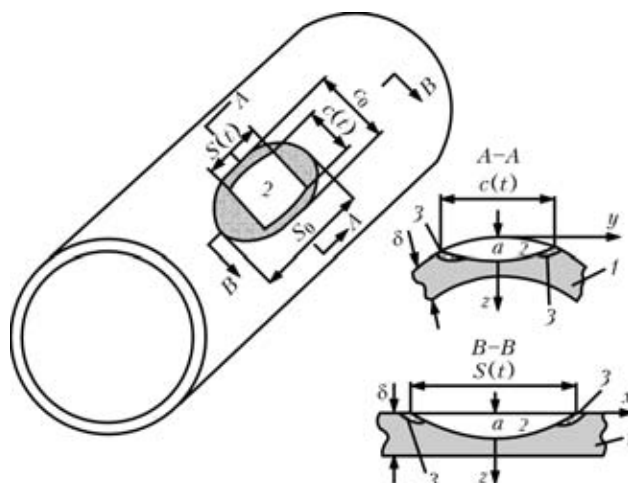


Рис. 1. Схема трубы с дефектом утонения $a \times S \times c$: 1 — труба; 2 — дефект утонения; 3 — заплавленные участки к моменту времени t

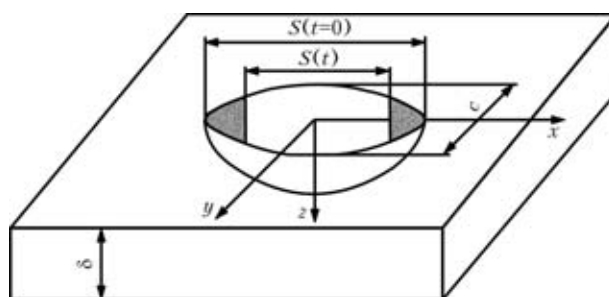


Рис. 2. Схема заправки дефекта проходами по окружности трубы (направление y) от краев дефекта к середине



Размеры дефектов утонения (мм), устранение которых возможно за смену одному сварщику при режиме $I_{CB} = 90$ А, $\xi = 1,5$

$a = 2$		$a = 3$		$a = 4$		$a = 5$		$a = 6$		$a = 7$		$a = 8$	
S	c	S	c	S	c	S	c	S	c	S	c	S	c
100	3440	100	2300	100	1470	100	1380	100	1150	100	980	100	860
200	1720	200	1150	200	735	200	690	200	575	200	490	200	430
400	860	300	575	400	375	400	345	400	290	400	245	400	115
800	430	400	290	800	185	800	172	800	145	800	122	800	60

меры дефекта, которые можно устранить одному сварщику за 6 ч работы на достаточно низких режимах ручной дуговой сварки плавлением, приведены в табл. 1. Из данных таблицы видно, что ремонт сваркой коррозионных дефектов является весьма эффективной технологией, однако ее широкое применение на трубопроводе под давлением сдерживается трудностями обеспечения безопасности выполнения такой технологии.

Условно вопросы безопасности можно разделить на две группы. Первая объединяет вопросы, связанные с тепловым воздействием сварочной дуги и соответствующим риском получения прожога либо разрушения стенки трубопровода в результате снижения ее сопротивляемости силовым нагрузкам (внутреннее давление, изгибающие моменты при ремонте). Вторая группа связана с проблемами свариваемости трубных сталей при достаточно жестких режимах сварки и силового нагружения, а именно с предупреждением образования холодных (водородных) трещин, а также неблагоприятных микроструктурных изменений, способных существенно снизить работоспособность отремонтированного сваркой участка трубопровода.

Известны публикации как по первой, так и по второй группе вопросов безопасности, однако их сложность и ответственность требует дальнейшего изучения, а также разработки методов прогнозирования последствий от применения тех или иных технологических решений.

В данной статье рассматриваются вопросы сохранения целостности трубопровода, непосредственно связанные с нагревом сварочной дугой стенки трубы при заварке дефектов утонения на наружной поверхности, т. е. вопросы безопасности первой группы. Применительно к заварке отдельных язвенных дефектов эти вопросы достаточно подробно рассмотрены в работе [1]. Применительно к заварке дефектов утонения, достаточно обширных как по окружности, так и вдоль оси трубопровода, эти вопросы исследованы экспериментально в работах [2, 3].

Полученные результаты дают важные ориентиры относительно предельных границ применимости ручной дуговой сварки при ремонте указанных выше дефектов утонения. Однако отсут-

ствие теоретического обобщения результатов ограничивает их применение для случаев за пределами рассмотренных исходных данных.

В настоящей работе предлагается математическая модель для оценки риска нарушения целостности стенки трубы под давлением в условиях сварочного нагрева зоны утонения (см. рис. 1). В основу модели положено отслеживание температурного поля в процессе заварки (наплавки) дефекта с фиксированием во времени изменений его габаритных размеров $S(t)$ и $c(t)$ (рис. 1). При этом расчете глубина дефекта $a_p(t)$ определяется в различные моменты времени t по максимальной глубине проникновения температуры $T_p^{\max}$, при которой сопротивление материала деформированию незначительно. Для трубных сталей значение $T_p^{\max}$ по различным рекомендациям соответствует 720...1000 °С. Последнее значение достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными [3], а первое более консервативно.

Условие допустимости в трубопроводе коррозионного дефекта утонения с размерами $S(t)$, $c(t)$, $a_p(t)$ в момент времени t по данным работы [4] можно представить в виде

$$Y(t) = \delta - a_p^m(t) - [\delta]R_j > 0 \quad (j = S, c), \quad (4)$$

где

$$R_S = \begin{cases} 0,2, & \text{если } \lambda = \frac{1,285}{\sqrt{D[\delta]}} \leq 0,3475; \\ \left(0,9 - \frac{0,9}{\sqrt{1 + 0,48\lambda^2}}\right) \left(1,0 - \frac{0,9}{\sqrt{1 + 0,48\lambda^2}}\right)^{-1}, & \text{если } \lambda > 0,3475; \end{cases}$$

$$R_c = \begin{cases} 0,2, & \text{если } \frac{c}{D} \leq 0,348, \\ \frac{-0,7358 + 10,511(c/D)^2}{1,0 + 13,838(c/D)^2}, & \text{если } \frac{c}{D} > 0,348; \end{cases} \quad (5)$$

D — внутренний диаметр трубопровода; $[\delta]$ — допускаемая расчетная толщина стенки трубопровода в отсутствии дефектов, которая зависит от материала трубы и ее силовой нагруженности и известна для данного участка трубопровода.

Как отмечалось выше, необходимые для расчета значения $S(t)$, $c(t)$, $a_p(t)$ при заварке данного



дефекта определяются в зависимости от режимов сварки, начального подогрева, порядка выполнения отдельных проходов. В большинстве случаев достаточно определить условия сохранения целостности при выполнении первого слоя наплавки дефекта для $S(t) = S(0)$, либо после наплавки концевых зон дефекта с целью существенного уменьшения величины $S(t)$ по сравнению с $S(0)$ (рис. 2).

Для этих целей можно использовать современные методы математического моделирования температурных полей при сварке соответствующим способом. Ниже рассмотрим такую возможность при дуговой заварке дефекта утонения на поверхности трубы диаметром $D = 1420$ мм, толщиной стенки $\delta = 20$ мм из стали 17Г1С и $[\delta] = 16$ мм. Режим сварки: $I_{\text{св}} = 120$ А, $U_{\text{д}} = 22$ В, $v_{\text{св}} = 2,0$ мм/с. Начальная температура подогрева в зоне дефекта T_0 менялась в пределах 20...150 °С (для стенок толщиной $\delta = 15$ и 10 мм использовали режим сварки с $I_{\text{св}} = 90$ А).

Заварку вели валиками по окружности трубы (направление y на рис. 2) от концов дефекта по образующей трубы (направление x на рис. 2).

При моделировании каждого прохода учитывалось, что эффективная мощность сварочной дуги $q_3 = \eta U_{\text{св}} I_{\text{св}}$ вносится частично с наплавленным металлом q_1 , а остальная $q_2 = q_3 - q_1$ по нормальному закону от движущегося со скоростью $v_{\text{св}} = 2,0$ мм/с источника тепла.

Величина q_1 определяется зависимостью

$$q_1 = \frac{\alpha_{\text{н св}} I_{\text{св}}}{3600\gamma} (T_{\text{пр}} c\gamma + \kappa), \quad (6)$$

где $T_{\text{пр}}$ — температура присадочного металла; $c\gamma$ — объемная теплоемкость металла; κ — скрытая теплота плавления.

При $T_{\text{пр}} = 2100$ °С, $\alpha_{\text{н}} = 8,0$ г/(А·ч), $\gamma = 7,8$ г/см³, $\kappa = 2080$ Дж/см³, $I_{\text{св}} = 120$ А, $c\gamma = 5,2$ Дж/(см³·°С) получим $q_1 = 445$ Вт.

Соответственно q_2 при $\eta = 0,8$ и $U_{\text{д}} = 22$ В равно

$$q_2 = 2112 - 445 = 1667 \text{ Вт.}$$

Параметр q_2 распределен по нормально-круговому закону, когда

$$g(r) = g_0 e^{-kr^2}, \quad (7)$$

где $g_0 = q_2 k / \pi$; $r^2 = (x - x_{\text{и}})^2 + (y - y_{\text{и}})^2$; $x_{\text{и}} = x_{\text{и}}(t)$; $y_{\text{и}} = y_{\text{и}}(t)$ — координаты источника в момент времени t ; k — коэффициент концентрации, равный 0,05 1/мм².

Для получения данных относительно температурного поля $T(x, y, z, t)$ использовали компьютерную программу, разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона, реализующую соответствующее

численное решение задачи теплопроводности для объема, ограниченного поверхностью (1), с учетом наплавленного металла, а также поверхностями $z = \delta$ и $z = 0$, на которых заданы условия теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона с коэффициентами теплообмена α_1 для поверхности $z = 0$ и α_2 для $z = \delta$. Коэффициент $\alpha_2 = 0,05$ Вт/(см²·°С) учитывает теплообмен на внутренней поверхности с газом, имеющим температуру 40 °С и движущимся со скоростью 6 м/с, а $\alpha_1 = 0,005$ Вт/(см²·°С) — теплообмен на наружной поверхности.

Теплофизические свойства стали 17Г1С принимали в зависимости от температуры по справочным данным, как в работе [1].

Результаты расчетов по описанной методике в виде допускаемых минимальных толщин в зоне утонения

$$\delta_{\text{min}} = \begin{cases} \delta - a^{\text{max}}(t), \\ \delta - a_0, \end{cases}$$

где a^{max} — максимальная глубина изотермы $T_{\text{пр}}$, начиная с поверхности $z = 0$; a_0 — максимальная глубина по (4) при c_0 и S_0 (5) с начальными размерами $a_0 \times c_0 \times S_0$ представлена на рис. 3 в зависимости от величины S_0 . Из этих данных видно влияние толщины стенки δ в пределах $\delta = 20, 15, 10$ мм при диаметре $D = 1420$ мм, когда допускаемые толщины $[\delta]$ в отсутствии дефекта принимались соответственно 16, 12 и 8 мм.

Варьировались также начальная температура подогрева зоны дефекта T_0 в пределах 20 и 150 °С и критическая температура $T_{\text{кр}}$ в пределах 750...1000 °С.

Из приведенных на рис. 3 данных следует, что минимальная толщина стенки в зоне дефекта при режиме его заварки, соответствующем ручной дуговой сварке плавлением на токе, не выше 120 А, для $\delta = 20$ мм и 90 А для $\delta = 15$ и 10 мм при начальной температуре подогрева 150 °С (что соответствует достаточно значительному разогреву в зоне сварки) зависит от размеров дефекта S_0

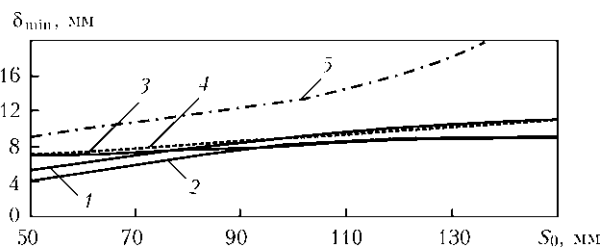


Рис. 3. Результаты расчета минимальной толщины трубы в зоне дефекта в зависимости от его размера S_0 при $c_0 = 70$ мм (рис. 2), $D = 1420$ мм и режиме заварки $I_{\text{св}} = 90...120$ А, $U_{\text{д}} = 22$ В, $v_{\text{св}} = 2$ мм/с: 1, 4, 5 — $\delta = 20$ мм, $[\delta] = 16$ мм; 2 — $\delta = 15$ мм, $[\delta] = 12$ мм; 3 — $\delta = 10$ мм, $[\delta] = 8$ мм; 1–3 — $T_0 = 150$ °С, $T_{\text{кр}} = 1000$ °С; 4 — $T_0 = 20$ °С, $T_{\text{кр}} = 750$ °С; 5 — $T_0 = 150$ °С, $T_{\text{кр}} = 750$ °С; 1, 4, 5 — $I_{\text{св}} = 120$ А; 2, 3 — $I_{\text{св}} = 90$ А

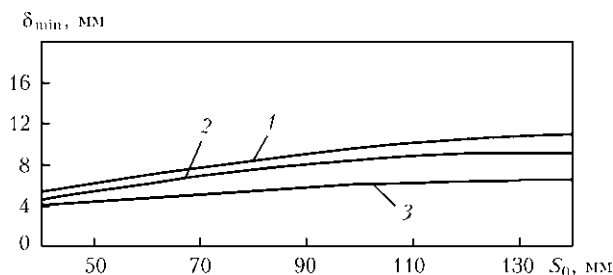


Рис. 4. Влияние снижения рабочего давления на минимальную толщину в зоне дефекта при $I_{св} = 120$ А, $T_0 = 150$ °С, $\delta = 20$ мм, $c_0 = 70$ мм, заварка по окружности: 1 — $p = 7,5$; 2 — 5,6; 3 — 3,75 МПа

вдоль оси трубы. Однако при малых δ и $[\delta]$ (рис. 3, кривая 3) эта зависимость возрастает от 6 мм при $S_0 = 50$ мм до примерно 9 мм при $S_0 = 150$ мм, в то время как при $\delta = 20$ мм и $[\delta] = 16$ мм (рис. 3, кривая 1) эта зависимость возрастает примерно от 5 мм при $S_0 = 50$ мм до 11 мм при $S_0 = 150$ мм. Кривая 2 на рис. 3, соответствующая $\delta = 15$ мм и $[\delta] = 12$ мм, находится между кривыми 3 и 1, причем в зоне малых S_0 она ближе к кривой 1, а при больших S_0 — к кривой 3.

Кривые 4 и 5 на рис. 3 показывают, что постулируемая в ряде предложений критическая температура $T_{кр} = 720...750$ °С существенно завышает минимальные толщины стенки в зоне дефекта с позиций применения сварки по сравнению с достаточно экспериментально проверенной $T_{кр} \approx 1000$ °С [3] для современных трубных сталей, используемых для транспортировки углеводородов.

Следует отметить, что при заварке рассматриваемого дефекта вдоль образующей, когда длина дефекта $S(t)$ во времени меняется незначительно, минимальная толщина в зоне данного дефекта для рассматриваемого режима сварки определяется глубиной проникновения температуры $T_{кр}$ в зоне максимума исходной глубины дефекта a_0 , т. е. соответственно примерно на 5 мм выше кривых на рис. 3: для кривой 1 ($\delta = 20$ мм) минимальные значения толщины в зоне дефекта будут $\delta_{min} = 9$ мм при $S_0 = 50$ мм и $\delta_{min} = 16$ мм при $S_0 = 150$ мм, для кривой 2 ($\delta = 15$ мм) получим $\delta_{min} = 9,5$ мм при $S_0 = 50$ мм и $\delta_{min} = 14$ мм при $S_0 = 150$ мм. Для $\delta = 10$ мм такой порядок выполнения сварки

неприемлем в рамках принятых условий безопасности.

Отметим возможность использования снижения давления в трубопроводе в качестве приема для повышения безопасности при заварке дефекта утонения. На рис. 4 приведены кривые, демонстрирующие эффективность такого приема при больших размерах утонения.

Выводы

1. При ремонте дуговой сваркой дефектов утонения в магистральных трубопроводах минимально допустимая толщина в зоне дефекта по условиям безопасности при рабочих давлениях зависит от размеров дефекта вдоль образующей S , значительно меньше от размера по окружности c , а также от теплового режима сварки и принятой последовательности заварки дефекта.

2. Наиболее целесообразно из условий безопасности заваривать дефект валиками по окружности, начиная с крайних участков, расположенных вдоль образующей, что позволяет уменьшать в процессе ремонта протяженность дефекта в указанном направлении.

3. С практической точки зрения заслуживает внимания разработка номограмм для определения возможности применения сварки на конкретном режиме для устранения рассмотренных дефектов утонения в зависимости от геометрических параметров дефекта S_0 , c_0 , a_0 , толщины стенки δ , диаметра трубы D и внутреннего давления в трубопроводе.

1. Математическое моделирование язвенных дефектов на действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
2. Bruce W. A., Mishier H. D., Kiefner J. F. Repair of pipelines by direct deposition of weld metal. A.G.A. Pipeline Research Committee. Project PR-186-9110. Edison Welding Institute, June 1993.
3. Bruce W. A., Swatzel J. F., Dorling D. V. Repair of pipeline defects using weld deposition // Proc. of the 3d Intern. pipeline technology conf., Brugge, Belgium, 2000, May 21–24.
4. Fitness-for-service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. — 2000. — 625 p.

It is shown that repair welding of defects of the type of wall thinning by compensation of metal lost in the thinning zone by deposited metal in low-current manual arc cladding (~ 90 А) is a sufficiently effective technology of repair of line pipelines under pressure, a wide application of which is limited by the safety problem. It is also shown that the minimum admissible wall thickness in the defect zone at the working pressures depends on defect dimensions along the generatrix and to a much lower degree on its size around the circumference, as well as on the thermal mode of welding and accepted sequence of defect welding-up (cladding).

Поступила в редакцию 04.05.2009



ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН С ПОМОЩЬЮ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ*

А. И. УСТИНОВ, д-р физ.-мат. наук (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины),

А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ, д-р техн. наук, **И. Г. ТОКАРЬ**, канд. техн. наук

(Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины),

В. С. СКОРОДЗИЕВСКИЙ, канд. физ.-мат. наук (Ин-т металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния характеристик структуры на физико-механические свойства материалов покрытий и демпфирующую способность конструктивных элементов с покрытиями при учете таких факторов, как температура, частота и амплитуда напряжения.

Ключевые слова: покрытие, наноструктура материала, температура, конструктивный элемент, частота колебаний, логарифмический декремент колебаний, динамическая напряженность

В связи с развитием современного машиностроения высокие требования предъявляются к надежности и долговечности как отдельных конструктивных элементов, так и машин в целом. Поскольку большинство из них эксплуатируются в условиях широкого спектра динамических нагрузок, которые могут вызвать выход из строя и разрушение конструктивных элементов, а также привести к катастрофическим последствиям, одной из ключевых задач достижения надежного функционирования в течение требуемого ресурса является обеспечение их динамической прочности. Особенно актуально это для авиационных газотурбинных двигателей (АГТД), большинство (более 60 %) дефектов у которых, выявляемых при проектировании, доводке и эксплуатации, обусловлены недостаточной прочностью узлов и конструктивных элементов и в первую очередь рабочих лопаток. При этом около 70 % дефектов имеют вибрационное происхождение.

Одним из наиболее важных технико-экономических показателей качества изделий машиностроения является обеспечение их вибрационной надежности. Однако в большинстве случаев вследствие значительной плотности частот собственных и вынужденных колебаний при эксплуатации рассматриваемых объектов невозможно

исключение опасных резонансных режимов. Поэтому используют различные конструктивно-технологические способы, снижающие опасность их последствий, среди которых определяющим является повышение демпфирующей способности как средства ограничения максимальных резонансных напряжений наиболее напряженных конструктивных элементов.

Применительно к рабочим лопаткам компрессоров АГТД, изготавливаемым из высокопрочных титановых сплавов с низкими значениями диссипативных свойств, одним из эффективных способов повышения вибрационной надежности является нанесение на перо высокодемпфирующих покрытий [1]. Поскольку эти сплавы чувствительны к поверхностным повреждениям, покрытия должны также отличаться необходимым комплексом физико-механических характеристик — высокими показателями твердости, предела выносливости, коррозионной стойкости и прочее, т. е. одновременно обеспечивать надежное сопротивление воздействию условий, в которых эксплуатируются конструктивные элементы.

В настоящее время накоплен значительный опыт в создании таких покрытий, которые в той или иной мере удовлетворяют условиям производства и эксплуатации АГТД [2]. Вместе с тем следует отметить, что параметры указанных характеристик материалов, которые можно было бы использовать в качестве высокодемпфирующих покрытий, недостаточны, а их повышение путем легирования или термомеханической обработки, как правило, приводит к ухудшению диссипативных свойств.

С учетом тенденций развития современного авиадвигателестроения, проявляющихся в повышении температуры газа и амплитуд динами-

* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



ческих напряжений, расширении спектра частот внешних нагрузок, возникает потребность в создании новых материалов для покрытий. К последним можно отнести разрабатываемые в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины наноструктурированные вакуумные конденсаты (в дальнейшем конденсаты) [3], осаждаемые на конструктивные элементы из паровой фазы по технологии, приведенной в работе [4].

Актуальной задачей с точки зрения возможности применения материалов таких покрытий при производстве рабочих лопаток компрессоров современных АГТД является определение оптимальных параметров структуры их материала и условий осаждения для обеспечения повышения демпфирующей способности лопаток при эксплуатации, что и является целью настоящей работы.

Материалы покрытий и способ их получения. В данной работе в качестве основного материала покрытия выбрали квазикристаллический сплав Al–Cu–Fe, характеризующийся повышенными значениями твердости (10...11 ГПа) и коррозионной стойкости [5, 6], а также медь чистую и с добавками железа (до 4 %). Последние два материала можно использовать как связующий подслои, отличающийся высоким уровнем адгезии с материалом конструктивного элемента и покрытия. Кроме того, наличие меди в составе покрытия обуславливает возрастание рассеяния энергии в колебательной системе, поскольку в наноструктурированном состоянии она относится к высокодемпфирующим материалам [7].

Покрытия толщиной 50...150 мкм из выбранных материалов получали по технологии электронно-лучевого испарения и осаждения в вакууме [4]. Последнее осуществляли на стержневые образцы из титанового сплава BT1-0, характеризующегося низкими диссипативными свойствами при температуре до 450 °C [8]. Заготовками для покрытий служили слитки меди и железа, а также таблетки спрессованной смеси порошков алюминия, меди, железа. При осаждении покрытий Cu–Fe испарение металлов осуществлялось из двух мишеней одновременно. Предварительно поверхность образца очищали в вакуумной печи ионным пучком аргона. Скорость осаждения покрытий составляла 2...3 мкм/мин, а их структурное состояние изменялось путем вариации температуры образца в пределах 160...600 °C.

Осаждение покрытий на компрессорные лопатки АГТД с целью обеспечения их однородности по всей поверхности выполняли в режиме их вращения. Для этого лопатки крепили к горизонтальному валу, вращающемуся в процессе формирования покрытий.

Структуру покрытий исследовали методами сканирующей и электронной микроскопии (прибор CamScan4), а их микротвердость измеряли на

поперечных шлифах образцов методом Виккерса с использованием оптического микроскопа «PolyvarMet» при нагрузке 0,05 Н в течение 10 с.

Основные положения методик исследования диссипативных свойств материалов покрытий и демпфирующей способности конструктивных элементов. Характеристики рассеяния энергии материала покрытий определяли расчетно-экспериментальным путем. Первоначально по результатам испытаний консоли закрепленных образцов с покрытием на установке, приведенной в работе [9], в режиме затухающих колебаний получали амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний. Затем на их основе по расчетной методике работы [10] определяли амплитудные зависимости истинного логарифмического декремента для материала покрытия, т.е. его характеристики рассеяния энергии при однородном напряженном состоянии.

Для определения демпфирующей способности конструктивных элементов использовали созданные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины экспериментальные средства для изучения диссипативных свойств материалов и конструктивных элементов как при комнатной, так и повышенных значениях температуры [11], обеспечивающих минимизацию потерь энергии в сочленениях, не связанных с гистерезисными потерями в материалах объекта испытаний и покрытиях. Логарифмический декремент колебаний определяли методом резонансной кривой [1].

В качестве объекта испытаний выбрали консолильный образец прямоугольного поперечного сечения ($h \times b \times l = 4 \times 12 \times 150$ мм). Покрытие наносили только на одну поверхность рабочей части образца по всей ее ширине b , начиная от корневого сечения. Оно имело неизменную длину 50 мм. Образец испытывали при постоянной толщине $h = 4$ мм и уменьшении длины l его рабочей части от 150 до 50 мм для достижения необходимой частоты колебаний.

В соответствии с постановкой задачи установлен следующий диапазон изменения параметров испытаний: частота колебаний 150...1000 Гц, температура 20...400 °C (в целом соответствует основным режимам эксплуатации рабочих лопаток компрессора АГТД).

Структура и свойства материалов покрытий. Структуру покрытий из меди изменяли путем вариации температуры осаждения T_c в диапазоне 160...600, вследствие чего размер зерна D (кристаллита) столбчатой формы уменьшался от 4...5 мкм ($T_c = 600$ °C) до 0,3...0,4 мкм ($T_c = 160$ °C). При этом обнаружено качественное изменение субструктуры кристаллитов.

Из рис. 1 видно, что с уменьшением температуры осаждения изменяется внутреннее стро-

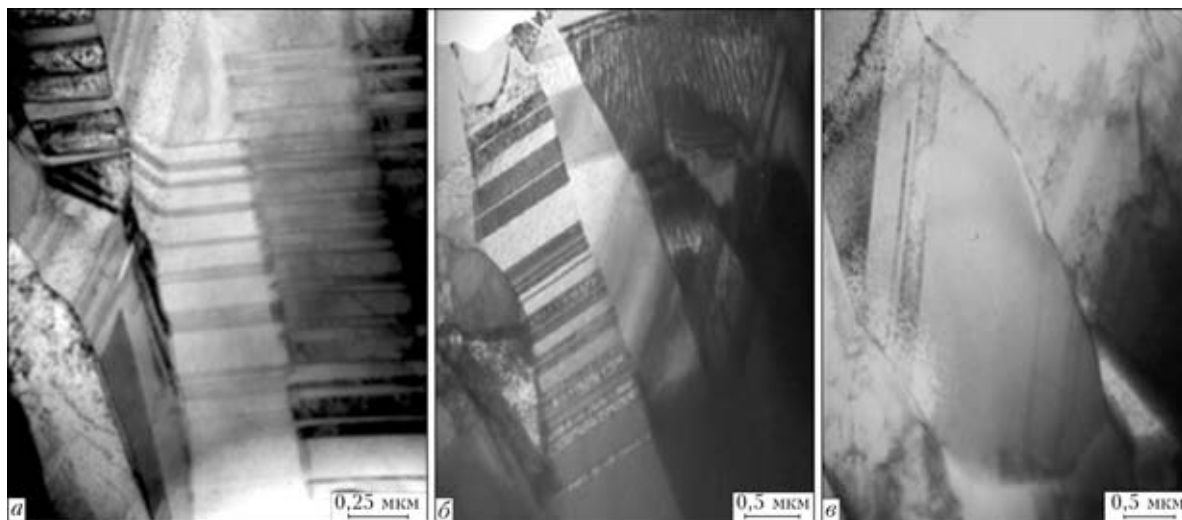


Рис. 1. Микроструктура конденсатов меди (поперечное сечение), осажденных на образец при температуре 170 (а), 230 (б) и 350 (в) °С

ение кристаллитов, что проявляется в образовании прослойки из двойниковых доменов, расположенных преимущественно параллельно фронту роста кристаллитов (таблица). Количество таких двойников резко возрастает с понижением температуры осаждения, начиная с $T_c \approx 350$ °С [7]. При дальнейшем снижении температуры их количество увеличивается настолько, что приводит к формированию в кристаллитах полидоменной нанодвойниковой субструктуры (рис. 1, а).

Переход к нанодвойниковому структурному состоянию покрытий из меди обуславливает резкое увеличение их микротвердости от 0,8 до 1,5 ГПа [7], а также качественное изменение характеристик рассеяния энергии, что проявляется в существенном ослаблении амплитудной зависимости логарифмического декремента колебаний, присущей крупнозернистой меди, с сохранением высоких значений при нагреве (рис. 2). Кроме того, в отличие от крупнозернистой меди характеристики рассеяния энергии этих покрытий сохраняются после многократного циклического деформирования.

Дополнительное увеличение микротвердости покрытия (до 2 ГПа) достигается в результате до-

бавления в медь 2...4 % железа. Характеристики рассеяния энергии такого покрытия Cu-Fe в этом случае снижаются при больших амплитудах деформации. Вместе с тем они остаются достаточно высокими и циклически стабильными при температуре испытаний 20...350 °С. При этом зафиксировано почти полное совпадение кривых, полученных в ходе циклического деформирования образцов при температуре 250 °С, с исходной кривой.

Изменение механических и диссипативных свойств покрытий из конденсатов меди и Cu-Fe при формировании в них нанодвойниковой субструктуры обусловлено существенным ослаблением роли внутризеренных дислокаций как в процессе пластической деформации, так и при рассеянии механической энергии.

При размерах структурных элементов примерно 100 нм генерация «свежих» дислокаций в металлах становится невозможной [12]. В то же время с уменьшением размера зерен увеличивается роль зернограничной поверхности, в результате чего в наноструктурированных материалах доминируют механизмы рассеяния энергии, связанные с термически активированной перестройкой атомных конфигураций на границах зерен.

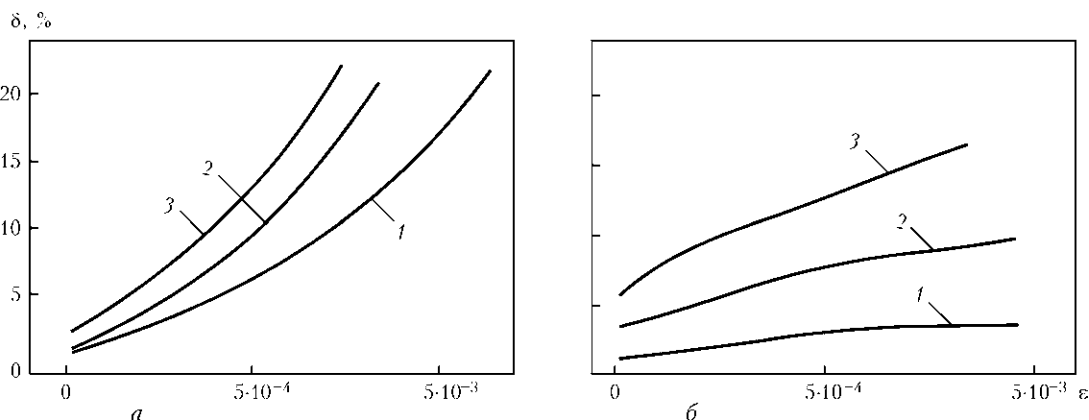


Рис. 2. Амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний образца, полученные для конденсатов меди с размером зерна 2,5 мкм (а), и с полидоменной нанодвойниковой субструктурой (б) при температуре 20 (1), 250 (2) и 350 (3) °С

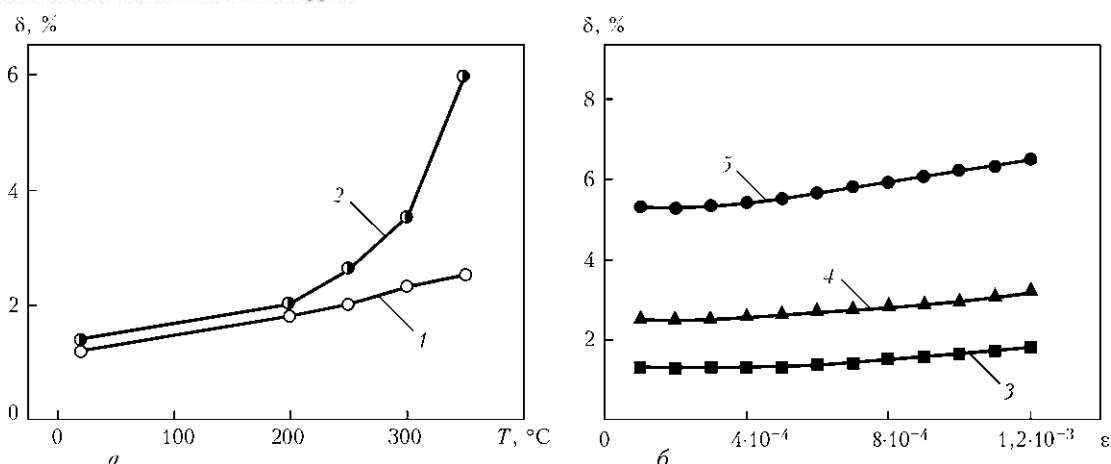


Рис. 3. Зависимость логарифмического декремента колебаний образца с покрытием из сплава Al–Cu–Fe от температуры (а) при амплитуде относительной деформации $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ для зерен размером 580 (1) и 30 нм (2) и от амплитуды относительной деформации (б) при размере зерен 30 нм и температуре 20 (3), 300 (4) и 350 °C (5)

На рис. 3 приведены результаты исследования влияния размера зерна на характеристики рассеяния энергии для покрытий из композитного сплава Al–Cu–Fe. В покрытиях, осаждаемых при $T_c = 650$ °C, средний размер зерен D составлял 580 нм. При снижении температуры осаждения до 350 и 270 °C он уменьшался соответственно до 270 и 30 нм. Для покрытий зерен размером 580 и 270 нм параметры характеристик рассеяния энергии в интервале температуры 20...400 °C оказались невысокими, однако с уменьшением зерен до 30 нм зафиксировано резкое возрастание логарифмического декремента колебаний при температуре 250...400 °C (рис. 3).

Особенностью рассматриваемых наноструктурированных покрытий является амплитудно-независимый характер вплоть до амплитуд относи-

тельной деформации $\varepsilon = 1,2 \cdot 10^{-3}$, что важно с практической точки зрения. Следует также отметить высокую твердость таких покрытий (15 ГПа) и меньшее значение модуля упругости (177 МПа) по сравнению с покрытием такого же состава с размерами зерна, равными 270 и 580 нм, и модулем упругости соответственно 207 и 210 МПа.

Таким образом, из результатов проведенных исследований следует, что путем выбора соответствующих режимов электронно-лучевого осаждения на поверхности конструктивных элементов можно формировать наноструктурированные покрытия с повышенным уровнем диссипативных и механических свойств.

Результаты определения демпфирующей способности конструктивных элементов с покрытиями и их анализ. Для анализа выбрали три вида покрытий из указанных материалов, характеристики которых приведены в таблице.

По полученным амплитудно-частотным характеристикам образцов определяли значения их логарифмического декремента колебаний и соответствующую его зависимость от амплитуды максимальных напряжений $\sigma_{\max}$ при варьировании частоты колебаний и температуры испытаний при различных значениях параметров покрытий. Следует отметить, что при резонансных испытаниях невозможно обеспечить одинаковую частоту колебаний образцов. Но поскольку это расхождение незначительно, то оно несущественно повлияло на анализ результатов испытаний.

Для выполнения сравнительного анализа влияния тех или иных факторов на демпфирующую способность образцов с выбранными покрытиями предварительно определили амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний для образца без покрытия в заданном диапазоне частот колебаний при комнатной температуре (20 °C), приведенные на рис. 4, а. Из представленных результатов видно, что указанные зави-

Состав покрытий и их характеристики

№ образца	Состав покрытия	Температура осаждения T_c , °C	Размер зерна D/d , нм	Толщина покрытия $h_{\text{п}}$, мкм
1	Медь	605	3000	97
2	»	345...350	1400/160	150
3	»	240...245	780/65	170
4	»	600	2800	33
5	»	600	2800	100
6	»	300	1100/105	87
7	»	300	105	72
8	Железо	700	2500	110
9	»	340	70	102
10	Al–Cu–Fe	500	430	53
11	»	500	430	62
12	»	300	110	55
13	»	300	110	58

Примечание. d — толщина двойников в конденсатах меди.

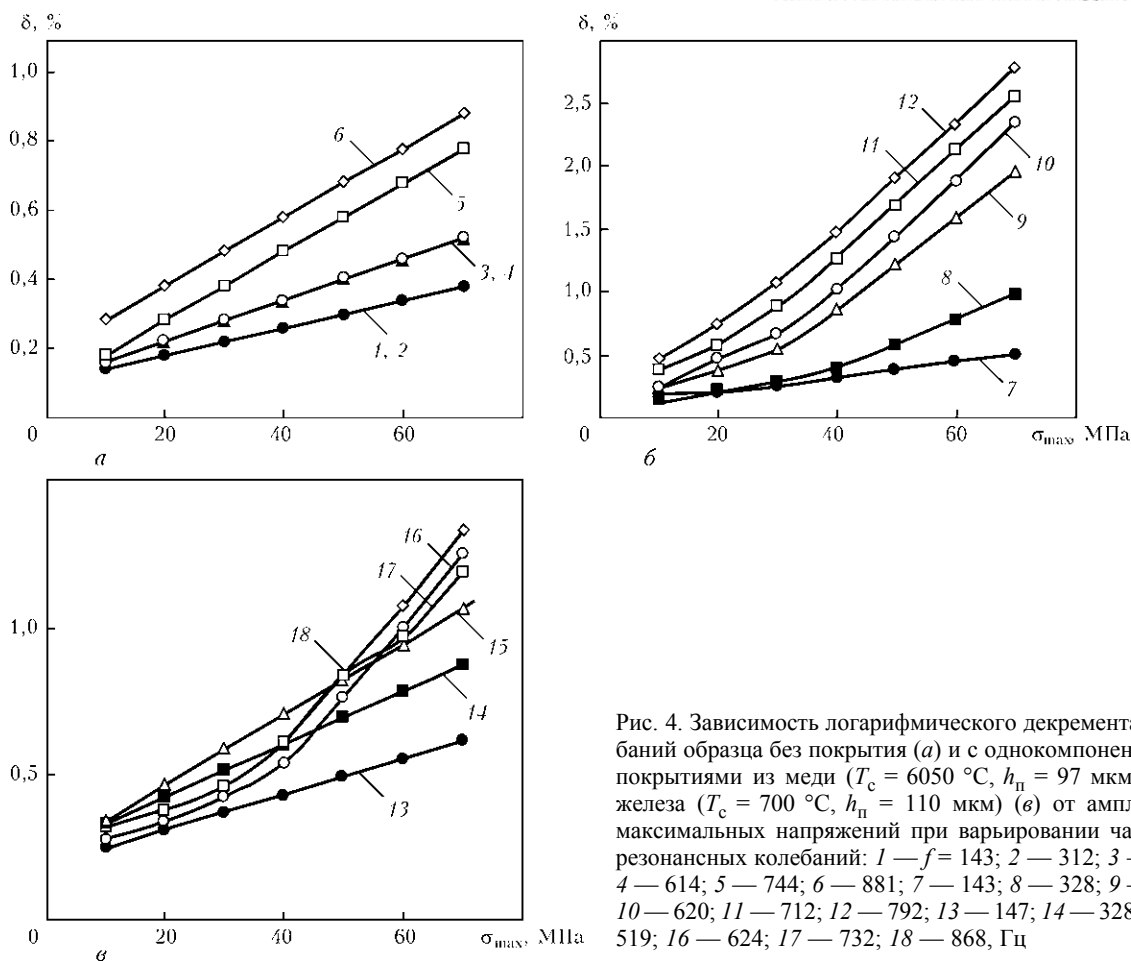


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента колебаний образца без покрытия (а) и с однокомпонентными покрытиями из меди ($T_c = 6050^\circ\text{C}$, $h_n = 97$ мкм) (б) и железа ($T_c = 700^\circ\text{C}$, $h_n = 110$ мкм) (в) от амплитуды максимальных напряжений при варьировании частотой резонансных колебаний: 1 — $f = 143$; 2 — 312; 3 — 507; 4 — 614; 5 — 744; 6 — 881; 7 — 143; 8 — 328; 9 — 492; 10 — 620; 11 — 712; 12 — 792; 13 — 147; 14 — 328; 15 — 519; 16 — 624; 17 — 732; 18 — 868, Гц

симости носят линейный характер, а влияние частоты колебаний на значение логарифмического декремента колебаний не существенно при малых амплитудах напряжений и несколько возрастает при их увеличении.

Рассмотрим результаты выполненных испытаний с точки зрения влияния частоты колебаний на демпфирующую способность образцов с выбранными покрытиями.

Анализ амплитудных зависимостей логарифмического декремента колебаний образцов с однокомпонентными покрытиями (образцы 1–9 получены при комнатной температуре), соответствующих их определенному структурному состоянию (рис. 4, б, в), показал, что в данном случае влияние частоты колебаний на значение логарифмического декремента зависит от типа покрытия. Так, наиболее существенная частотная зависимость логарифмического декремента колебаний характерна для медного покрытия, особенно при повышенных амплитудах максимальных напряжений. Менее выражена она для образцов с покрытием из железа.

Наглядно влияние частоты на декремент колебаний образцов иллюстрируется его частотными зависимостями, которые для амплитуды максимальных напряжений ($\sigma_{\max} = 50$ МПа) при-

ведены на рис. 5, где по оси абсцисс отложена средняя частота колебаний с учетом невозможности обеспечения при испытаниях ее одинакового значения.

Из представленных результатов испытаний следует, что демпфирующая способность образцов существенно зависит от характеристик микроструктуры.

В целом на основании полученных данных можно сделать вывод, что частотная зависимость логарифмического декремента колебаний образца больше характерна при осаждении медного покрытия. При этом степень его роста наиболее выражена у покрытий с крупными зёрнами и более высокими значениями амплитуды максимальных напряжений. Для образцов с покрытием из железа указанная зависимость логарифмического декремента от частоты колебаний практически не зафиксирована, особенно при снижении амплитуды максимального напряжения.

В соответствии с постановкой работы проанализируем результаты исследований по определению совместного влияния частоты колебаний и температуры эксплуатации на демпфирующую способность образцов с покрытиями. Решение задачи рассмотрим на примере покрытия из квазикристаллического сплава Al–Cu–Fe (более вероятного) в сравнении с однокомпонентными для

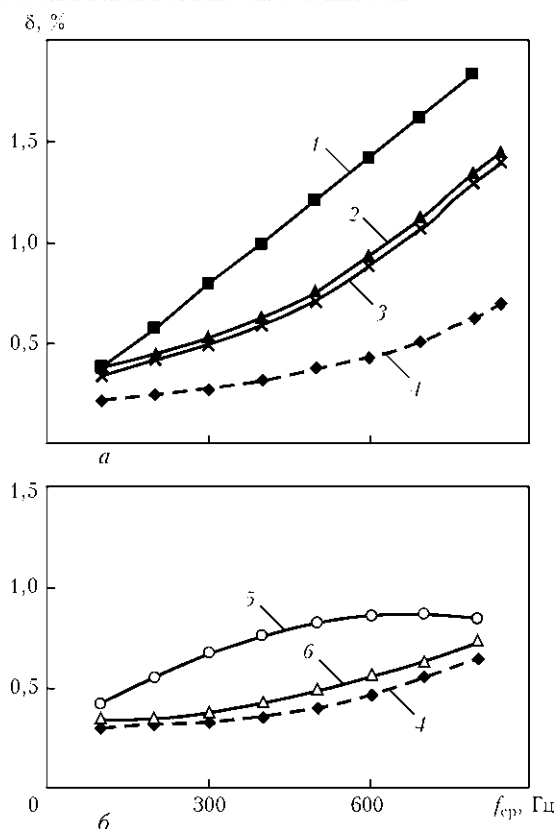


Рис. 5. Зависимость логарифмического декремента колебаний при амплитуде максимальных напряжений 50 МПа образцов с однокомпонентными покрытиями из меди (а) и железа (б) от средней частоты f_{cp} резонансных колебаний при различных параметрах покрытия: 1 — $T_c = 605^\circ\text{C}$, $h_n = 97$ мкм; 2 — $T_c = 350^\circ\text{C}$, $h_n = 150$ мкм; 3 — 245°C , $h_n = 170$ мкм; 4 — образец без покрытия; 5 — $T_c = 700^\circ\text{C}$, $h_n = 110$ мкм; 6 — $T_c = 340^\circ\text{C}$, $h_n = 102$ мкм

практической реализации особенно для рабочих лопаток компрессоров АГТД.

Образцы испытывали при варьировании тех же технологических и эксплуатационных факторов, рассмотренных для однокомпонентных покрытий, а также температуры эксплуатации. Как и для однородных покрытий, получены амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний от амплитуды максимальных напряжений, на основании анализа которых установлено, что демпфирующая способность образцов с рассматриваемым покрытием при повышенной температуре может возрасти в три и более раз.

На основе полученных амплитудных зависимостей логарифмического декремента колебаний построили диаграмму его изменения в зависимости от частоты резонансных колебаний образца (рис. 6). Как следует из представленных данных, частота колебаний практически не оказывает влияния на демпфирующую способность образца с многокомпонентным покрытием из квазикристаллического сплава Al-Cu-Fe.

Оценка циклической прочности титановых лопаток с покрытиями из наноструктурированной меди. Высокий уровень и циклическая

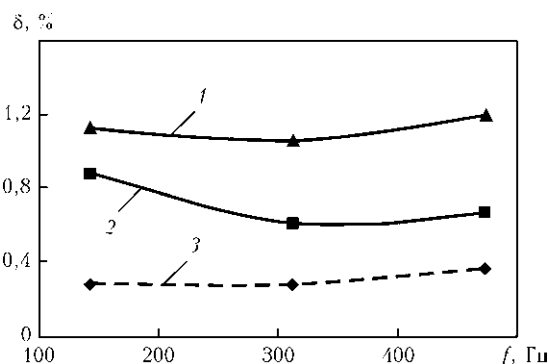


Рис. 6. Диаграмма изменения логарифмического декремента колебаний образца с покрытием из сплава Al-Cu-Fe ($T_c = 500^\circ\text{C}$, $h_n = 62$ мкм) в зависимости от частоты резонансных колебаний при амплитуде максимальных напряжений 45 МПа и температуре испытаний 350 (1) и 20 (2) $^\circ\text{C}$ и образца без покрытия (3)

стабильность характеристик рассеяния энергии наноструктурированными конденсатами на основе меди, а также хорошая их адгезия по отношению к титановым сплавам позволяют рассматривать данные конденсаты в качестве возможной составляющей промежуточного слоя композитных защитных покрытий для лопаток АГТД.

На основе проведенных испытаний определены технологические режимы осаждения покрытий из меди на титановые лопатки, при которых обеспечивалось их наноструктурированное состояние. Исследовано влияние таких покрытий толщиной 5...10 мкм на устойчивость против разрушения титановых лопаток из сплава ВТЗ-1. Для сравнения на другую часть лопаток осаждали покрытия из меди с микронным размером зерен. Испытания проводили при температуре 20°C и частоте колебаний 530 Гц. Циклическую усталость лопаток оценивали по ускоренной методике в условиях дискретного повышения амплитуды напряжений после каждых из $5 \cdot 10^6$ циклов колебаний [13].

Положительное влияние на вибрационную устойчивость лопаток, имеющих покрытия с микронным размером зерен, отмечено у 50 % образцов. В случае же наноструктурированных покрытий положительный результат получен для всех образцов, причем 50 % из них не разрушались вплоть до окончания испытаний.

Приведенные результаты подтверждают предположение о том, что конденсаты на основе наноструктурированной меди могут быть использованы в качестве составляющих композитных покрытий, например связующих слоев между конструктивным элементом и основной частью покрытия.

Выводы

1. Показано, что демпфирующая способность образцов с покрытиями существенно зависит от их структуры и параметров получения, в первую очередь от температуры осаждения покрытия, а также частоты колебаний.



2. Установлено, что логарифмический декремент колебаний образца с наноструктурированным покрытием при повышенной температуре может возрасти в три и более раз по сравнению с таковым при комнатной температуре.

3. Необходим дальнейший поиск оптимальных наноструктур покрытия и параметров их получения для обеспечения максимальной демпфирующей способности конструктивных элементов машин типа рабочих лопаток компрессоров АГТД в условиях их эксплуатации.

1. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. — Киев: Наук. думка, 1985. — 263 с.
2. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. — Киев: Наук. думка, 1985. — 248 с.
3. Устинов А. И., Скородзиевский В. С., Косенко Н. С. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщ. 2. Конденсаты меди с различными характеристиками микроструктуры // Пробл. прочности. — 2008. — № 2. — С. 149–159.
4. Paton B. E., Movtchan B. A. Composite materials deposited from the vapour phase in vacuum soviet technologies: Rev. // Weld and Surfacing. — 1991. — № 2. — P. 43–64.
5. Effect of the addition of crystalline β -phase in Al-Cu-Fe quasi-crystalline coating on their tribological properties /

M. Sales, A. Merstallinger, A.I. Ustinov et al. // Surf. and Coat. Tech. — 2007. — № 201. — P. 6206–6211.

6. Mechanical properties of quasi-crystalline Al-Cu-Fe coatings with submicron-sized grains / Yu.V. Milman, D.V. Lotsko, S.N. Dub et al. // Ibid. — P. 5937–5943.
7. Ustinov A.I., Skorodzievski V.S., Fesiun E.V. Damping capacity of nanotwinned copper // Acta Materialia. — 2008. — № 56. — P. 3770–3776.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1988. — 734 с.
9. Устинов А.И., Мовчан Б.А., Скородзиевский В.С. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti-6 % Al-4 % V с покрытиями из олова и иттрия // Пробл. прочности. — 2001. — № 4. — С. 55–61.
10. Устинов А.И., Скородзиевский В.С., Косенко Н.С. Изучение диссипативных свойств однородных материалов, осажденных в виде покрытий. Сообщ. 1. Метод определения амплитудной зависимости истинного декремента колебания материала покрытия // Там же. — 2007. — № 6. — С. 134–143.
11. Прочность материалов и конструкций / А. А. Лебедев, В. Г. Трошенко, В. В. Матвеев и др. — Киев: Академ-періодика, 2005. — 1008 с.
12. Kaschner G.C., Gibeling J.C. Evolution of dislocation glide kinetics during cycling deformation of copper // Acta Materialia. — 2002. — № 50. — P. 653–662.
13. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. — Киев: Наук. думка, 1988. — 200 с.

The paper gives the results of experimental studies of the influence of structural characteristics on physico-mechanical properties of coating materials and damping capacity of coated structural elements allowing for such factors as temperature, frequency and amplitude of stress.

Поступила в редакцию 06.08.2009

XXXVII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ZVARANIE 2009»

4–6 ноября 2009 г. в Татранской Ломнице (Высокие Татры, Словацкая Республика) состоялась XXXVII международная конференция и дискуссионный форум «Zvaranie (Сварка) 2009». Организатор конференции — Словацкое сварочное общество (SZS).

В конференции приняло участие 88 ученых и специалистов из Словацкой Республики, Чешской Республики, Украины и Польши. Был представлен 31 доклад по шести тематическим направлениям: прогресс в сварочных технологиях, прогрессивное изготовление сварных конструкций, контроль качества сварных соединений, направления развития и разработок в сварке, современное состояние и предполагаемые разработки нормативных документов в области сварки, ремонт сваркой и наплавкой. Состоялся также дискуссионный форум «Прошлое и настоящее в сварке. К 60-летию Исследовательского института сварки (VUZ) Словакии».

Все доклады отличались высоким уровнем и имели практическую направленность. Можно отметить ряд наиболее интересных докладов. В работе норвежских и словацких ученых (J. B. Stav, E. Engh, L. Mraz) был представлен опыт применения в обучении студентов-сварщиков метода ABT (Activity Based Training), заключающийся в немедленной передаче теоретических знаний или «ноу-хау» на рабочее место, где возникла новая практическая задача, а также опыт применения в

лабораторной практике студентов современной цифровой техники iPod Touch и iPhone. Часть докладов словацких фирм была посвящена электронно-лучевой и лазерной сварке ряда сложных изделий в автомобильной и энергетической промышленности. В словацкой фирме «Prva Zvaracka a. s.» создан высоковольтный инверторный источник питания мощностью до 30 кВт для электронно-лучевой сварки. Эта фирма также представила новый универсальный комплекс PZ-Autoweld для дуговой сварки и наплавки МИГ и МАГ способами различных элементов строительных конструкций (балки, листы и трубы) в положениях PA, PB, PC, PD. Словацкая фирма «МАНЕ» (J. Kucera) представила серию резонансных инверторных источников питания для дуговой сварки.

Аннотации докладов изданы отдельной брошюрой, а доклады представлены на компакт-дисках с регистрацией в ISBN и EAN.

В рамках конференции были представлены экспозиции рекламных материалов различных организаций, фирм и журналов, а также проведены презентации продукции ряда фирм-изготовителей сварочного оборудования.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТРУБ В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА

И. В. ЧЕРНЫХ, д-р техн. наук (Урал. гос. техн. ун-т, г. Екатеринбург, РФ),
С. А. РАЧКОВ, инж. (ООО НПП «ЭЛТЕРМ-С», г. Екатеринбург, РФ)

Рассмотрена методика моделирования процесса индукционного нагрева труб большого диаметра перед их сваркой. Обоснован выбор программного пакета для моделирования и приведен пример моделирования. Описана картина теплового поля в зоне сварного шва и графики распределения температуры в стенке трубы. Показан пример реализации установки индукционного нагрева.

Ключевые слова: сварные трубы, большой диаметр, сварной шов, индукционный нагрев, тепловое поле, моделирование

В настоящее время при проведении сварочных работ на трубах большого диаметра широко используется индукционный нагрев зоны сварного шва. Установка для индукционного нагрева состоит из индуктора и источника питания током средней частоты (2400 Гц). При ее разработке было проведено математическое моделирование зоны нагрева для нахождения геометрических параметров индуктора, параметров источника питания установки для индукционного нагрева и определения распределения температуры в стенке трубы. Методы расчета подробно изложены в работах [1–3]. Результатами расчета являются картины теплового поля, графики распределения мощности тепловыделения в трубе и температуры, а также интегральные показатели такие, как потребляемая мощность, КПД, $\cos \varphi$ и др.

Расчет проводили в два этапа. На первом приняли допущение о том, что труба является сплошной (не имеет разрыва в месте будущего шва). Для расчета использовали программу Universal 2D. Программа основана на использовании численных методов (конечных разностей, конечных элементов, интегральных уравнений и их комбинаций) для совместного расчета электромагнитных и температурных полей в двухмерных областях. Этот этап позволил определить основные энергетические показатели установки и графики распределения температуры вдоль и поперек стенки трубы с учетом принятого допущения. Расчеты проводили для стальной трубы диаметром $D = 1420$ мм и толщиной стенки $h = 33,4$ мм. Установка имеет индуктор, состоящий из двух секций, каждая из которых имеет два витка. Расстояние между секциями составляет 160 мм, что вполне достаточно для установки наружного трубного центра. Расчет показал, что потре-

ляемая мощность установки $P = 50$ кВт, время нагрева до заданной температуры $t = 10$ мин, электрический КПД установки $\eta = 81,7\%$. Кривые

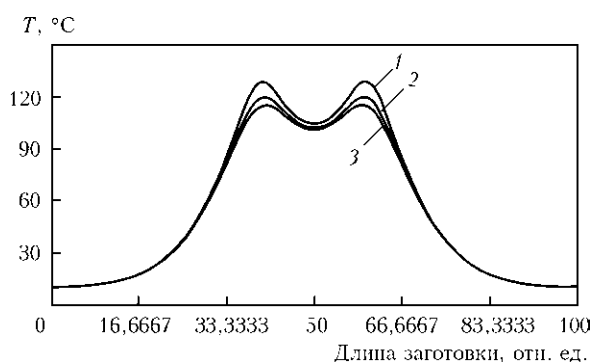


Рис. 1. Результаты расчета распределения температур вдоль стенки трубы на первом этапе: 1, 3 — соответственно температура наружной и внутренней поверхностей трубы; 2 — средняя температура

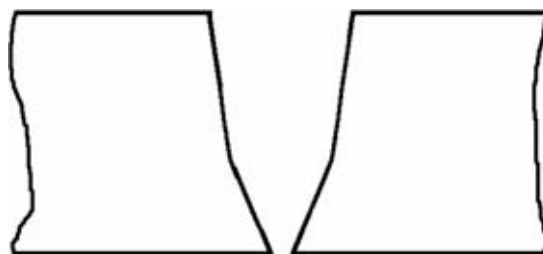


Рис. 2. Форма разделки торцов труб

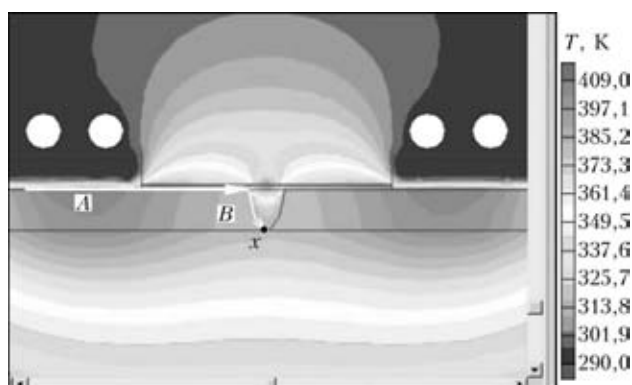


Рис. 3. Картина распределения теплового поля в зоне нагрева

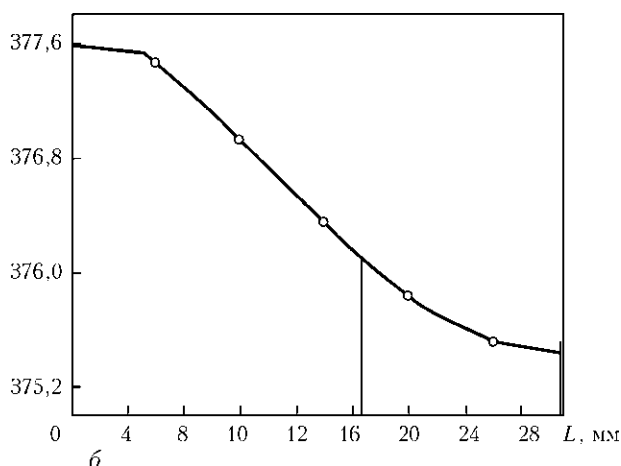
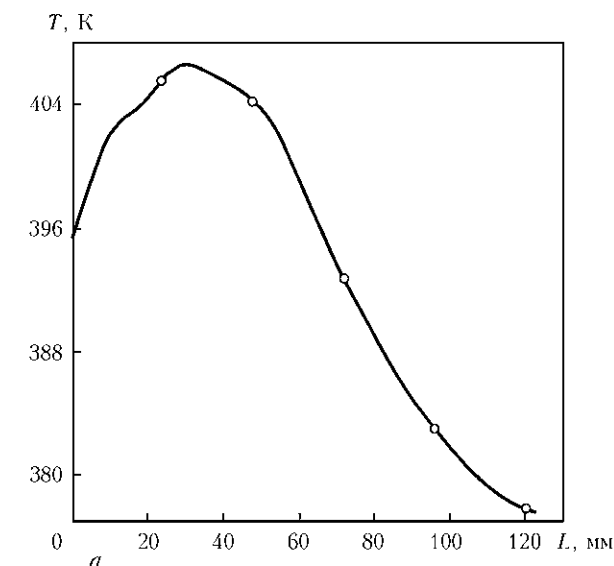


Рис. 4. Распределение температуры в конце интервала нагрева по контуру *A* (а) и *B* (б)

распределения температуры вдоль стенки трубы представлены на рис. 1. Ширина зоны нагрева трубы до температуры 100 °С и более равна 260 мм.

На втором этапе проводили уточнение расчетов с учетом формы разделки торцов труб (рис. 2), а также решали электромагнитные и тепловые задачи. В результате получены картина теплового поля, графики распределения температуры вдоль интересующих контуров трубы, а также графики изменения температуры во времени при нагреве и охлаждении трубы. Для расчета использовали программу ELCUT, реализующую метод конечных элементов [4]. На рис. 3 показана картина теплового поля в зоне нагрева, а также расположение контрольной точки *X* и контуров *A* и *B*. Из рисунка видно, что труба имеет максимальную температуру 130 °С в зонах расположения витков индуктора, а в зоне сварного шва температура составляет порядка 100 °С. На рис. 4 приведены графики распределения температуры вдоль контуров *A* и *B* в конце интервала нагрева. Видно, что температура на свариваемых поверхностях

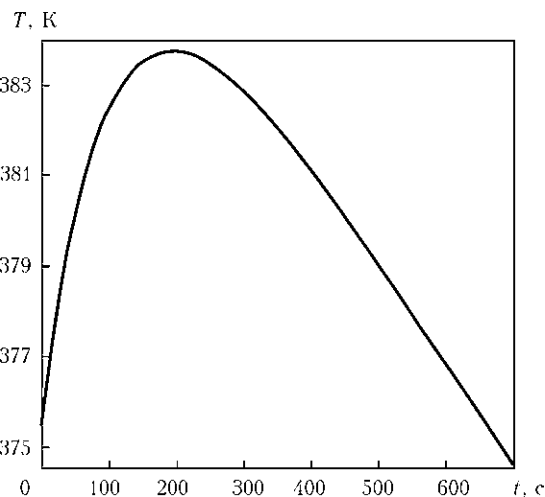


Рис. 5. Изменение температуры в контрольной точке *X* при охлаждении



Рис. 6. Общий вид установки индукционного нагрева «ЭЛ-ТЕРМ-С УИИТ-50-2,4»

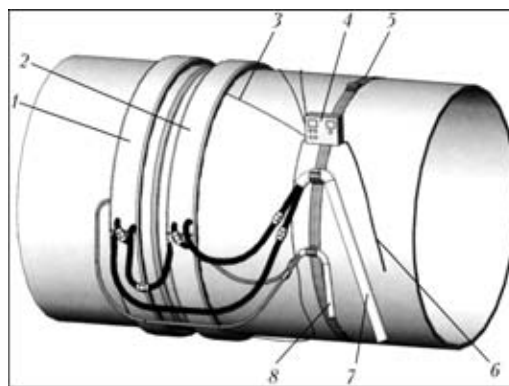


Рис. 7. Схема размещения мягкого гибкого индуктора на трубе: 1, 2 — соответственно 1-й и 2-й индуктор; 3 — подвод термопар (4 шт.); 4 — ПДУ; 5 — монтажный ремень из комплекта; 6 — кабель управления; 7 — электрический кабель; 8 — водяной шланг

равна 100 °С, а на поверхности трубы под индуктором не превышает допустимых значений.

Дополнительно на втором этапе рассчитывали режим естественного охлаждения трубы при от-



ключении индуктора от источника питания. Из рис. 5 следует, что поверхность в зоне сварного шва остается нагретой до температуры 100 °С еще около 10 мин.

По результатам расчетов были оптимизированы конструктивные решения и режимы работы установки для индукционного нагрева «ЭЛТЕРМ-С УИИТ-50-2,4». Общий вид установки представлен на рис. 6, размещение индуктора на нагреваемой трубе — на рис. 7. На основе моделирования спроектировано несколько видов индукторов.

Разработанные и серийно выпускаемые установки для индукционного нагрева на предприятии «ЭЛТЕРМ-С», оптимизированные по результатам расчетов, являются высокоэффективными технологическими установками индукционного нагрева при подогреве перед сваркой и сопутствующем подогреве.

Авторы предлагают использовать накопленный опыт расчетов электромагнитных и тепловых расчетов при разработке индукционных установок для нагрева различных объектов (труб, фитингов, валов и пр.)

1. *Плавильные индукционные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование* / В. И. Лузгин, С. Ф. Сарапулов, Ф. Н. Сарапулов и др. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. — 464 с.
2. *Система индукционного нагрева длинномерных трубных заготовок* / В. И. Лузгин, А. Ю. Петров, Ф. Н. Сарапулов, И. В. Черных // Сб. матер. междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева». — С.-Пб., 2005.
3. *Система управления индукционным нагревом длинномерных трубных заготовок* / В. И. Лузгин, А. Ю. Петров, Ф. Н. Сарапулов и др. // Сб. докл. VI Симп. «Электротехника 2010 г.». — М., 2001. — Т. 3.
4. *Черных И. В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева* // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2003. — № 2.

The paper deals with the procedure of simulation of the process of induction heating of large-diameter pipes before their welding. Selection of program package for simulation is substantiated, and an example of simulation is given. The thermal field pattern in the weld zone and graphs of temperature distribution in the pipe wall are described. An example of induction heating unit implementation is given.

Поступила в редакцию 19.05.2009

Металлообработка. Урал
UralMetalExpo 2010
27-29 апреля 2010
Екатеринбург, ВЦ КОСК «Россия»



7-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

Тематика выставки:

- металлорежущее оборудование
- кузнечно-прессовое оборудование
- литейное оборудование
- сварочное оборудование. Специальные методы в сварке
- оборудование, инструменты, материалы, технологии для обработки поверхностей и нанесения покрытий
- инструменты станочные: металлорежущие, абразивные, резьбонарезные и др.
- контрольно-измерительные машины, приборы и инструменты
- комплектующие узлы и изделия, в том числе системы ЧПУ, гидравлические и пневматические системы, электродвигатели. Подшипники. Технологическая оснастка. Материалы для металлообработки
- автоматизированные системы управления технологическими процессами и производством, промышленная автоматизация. Роботы, системы и компоненты, информационные технологии
- ретрофитинг и модернизация оборудования. Лизинг
- субконтракция
- инвестиционные и инновационные проекты, технологические и конструкторские разработки, профильное образование

www.uralexpotoool.ru



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И КЛЕЕМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ПРОДАВЛИВАНИЯ*

Ю. С. ВАСИЛЬЕВ, канд. техн. наук, **Л. С. ПАРШУТИНА**, инж., **А. Н. ЧУКАШКИН**, рабочий
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы процессы формирования механических соединений тонколистовых металлов с антикоррозионным покрытием методом продавливания при наличии между сопрягаемыми поверхностями клеевых композиций различной вязкости. Установлены предельные значения реологических характеристик клеев, влияющих на формирование клеємеханических соединений. Разработана высоконаполненная клеевая композиция холодного отверждения на силикон-полиуретановой основе, не препятствующая образованию клеємеханических соединений. Разработано и изготовлено прессовое оборудование на основе пневмопривода, обеспечивающее усилие сжатия до 20 кН.

Ключевые слова: механические соединения, клеємеханические соединения, металлические тонколистовые конструкции, формоизменяющие технологии, клеевые гибридные композиции, наполнители, полидисперсное наполнение

В транспортном машиностроении конкуренция между материалами определяется непрерывно растущими требованиями к снижению массы конструкций, повышению надежности и долговечности транспортных средств, комфорту и совместимости с окружающей средой. Доля алюминиевых сплавов, пластмасс и композиционных материалов в кузовном производстве транспортных конструкций постоянно возрастает. Тем не менее сталь, благодаря своему потенциалу технологического новаторства, высокой экономичности и совместимости с окружающей средой, остается перспективным конструкционным материалом, который будет преобладать в транспортном машиностроении и в будущем [1]. При использовании сталей повышенной и высокой прочности уменьшение толщины листа позволяет сохранить стоимостные характеристики транспортного средства, однако при этом значительно возрастают требования к надежной и долговечной защите конструкции от коррозии.

Известно, что оцинковка в силу присущего ей электрохимического механизма защиты металла является наиболее действенным способом антикоррозионной обработки тонколистовых сталей в кузовном производстве транспортных средств. Все большую популярность приобретают комбинированные системы, содержащие металлизированные и полимерные покрытия, которые отличаются

высокими показателями деформируемости, свариваемости, лакируемости и стойкости против старения. Разработка и внедрение новых материалов и покрытий требует освоения современных методов соединения элементов транспортных конструкций.

В последние годы в ряде отраслей промышленности расширяется использование клеевых соединений в элементах тонколистовых конструкций, которые не испытывают значительных нагрузок. Это объясняется тем, что клеевые соединения имеют низкие характеристики надежности при неравномерном отрыве и отдиरे. Кроме того, клеевые соединения имеют недостатки, связанные с изменением свойств клеев в результате старения, необходимостью создания контактного давления и фиксации деталей на время отверждения клеев. Поэтому клеевые соединения стремятся сочетать с соединениями, получаемыми другими способами, обеспечивающими дополнительные локальные связи между деталями.

Комбинированные клеесварные соединения, получаемые контактной точечной сваркой (КТС) деталей по слою клея, предварительно нанесенного на сопрягаемые поверхности, широко используются при производстве тонколистовых конструкций из низколегированных сталей [2]. При выполнении КТС металлических листов с покрытиями имеют место определенные сложности. Кроме того, в результате высокотемпературного воздействия КТС металлические и органические покрытия выгорают, что требует выполнения дополнительных операций по коррозионной защите.

Клеезаклепочные и клееболтовые соединения отличаются наиболее высокими прочностными характеристиками, особенно в условиях динамического нагружения. Однако наличие отверстий в соединяемых деталях не только ослабляет сече-

* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).

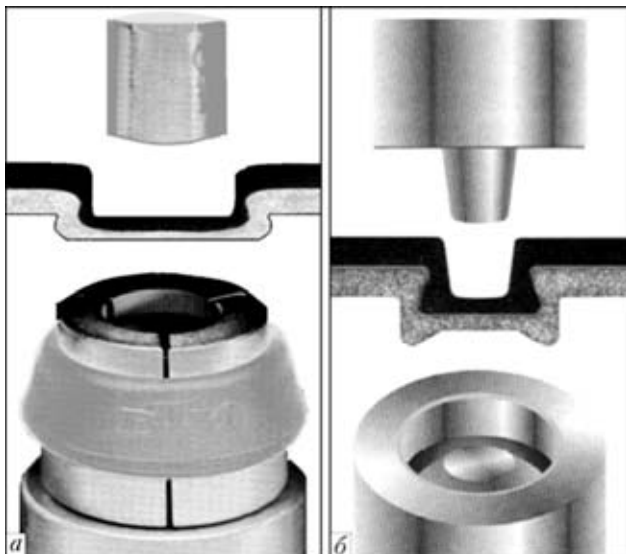


Рис. 1. Соединения, полученные методом продавливания: *а* — Clinch; *б* — TOX

ние, но и создает определенные технологические сложности в процессе формирования неразъемных соединений.

Использование технологии локальной пластической деформации путем продавливания пуансоном соединяемых листов металла в штамп-матрицу исключает многие проблемы формирования комбинированных соединений [3]. Запатентовано большое количество конструкторско-технологических решений по реализации формирования соединений типа «ласточкин хвост» (рис. 1). Следует отметить, что информация о таких способах соединения, как правило, неполная, приводятся лишь технологические схемы процессов изготовления соединений без раскрытия конструктивных принципов создания оборудования и расчета режимов силового формирования соединений.

Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по технологии формирования механических и клеємеханических соединений оцинкованных сталей способом продавливания для повышения ресурса эксплуатации тонколистовых

конструкций транспортного машиностроения. Были решены следующие задачи: исследованы процессы контактного взаимодействия при продавливании соединяемых листов металла в матрицу; установлены требования к реологическим и физико-механическим характеристикам клеев для получения качественных соединений; разработаны технология и экспериментальное оборудование для формирования механических и клеємеханических соединений оцинкованных листов металла.

Формирование соединений способом продавливания относится к разряду технологий обработки металлов давлением и состоит из ряда последовательно протекающих операций: фиксации листов металла прижимным элементом (рис. 2, *а*), продавливания пуансоном соединяемых листов до контакта с наковальной (вытяжка) (рис. 2, *б*), осадки соединяемых листов с уменьшением их толщины и одновременным увеличением площади поперечного сечения (рис. 2, *в*), снятия готового соединения (рис. 2, *г*) [4, 5].

Анализ напряженно-деформированного состояния в процессе вытяжки показал, что в основном пластическая деформация концентрируется лишь в части нахлестки соединяемых листов, находящейся на плоском торце матрицы и ее скругленной кромке. При увеличении радиуса закругления матрицы r_m уменьшается локализация пластической деформации в месте изгиба. Деформация листов на торцевой поверхности пуансона отличается тем, что металл постепенно огибает закругленную кромку пуансона в начальный момент вытяжки, когда усилие еще не достигло своего максимального значения. Если радиус закругления кромки пуансона мал по сравнению с его диаметром, то изгиб с пластическим деформированием не совпадает по времени с пиковой нагрузкой и не оказывает существенного влияния на последнюю.

Исследования процесса формирования соединений продавливанием проводили с использованием листов холоднокатаной низкоуглеродистой

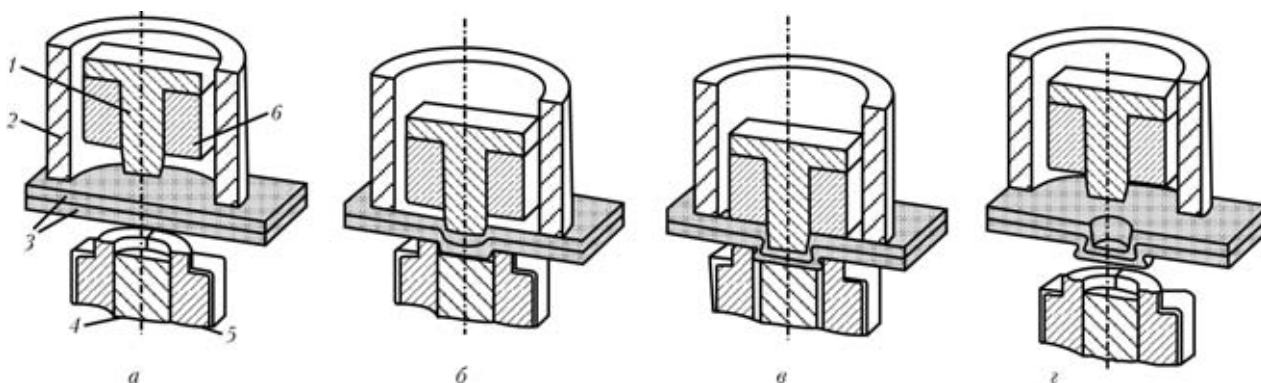


Рис. 2. Технологическая схема формирования соединения продавливанием с помощью раскрывающейся матрицы (Clinch-соединение) [5]: *а-г* — см. в тексте; 1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — соединяемые листы; 4 — наковалья; 5 — раскрывающаяся матрица; 6 — ограничитель

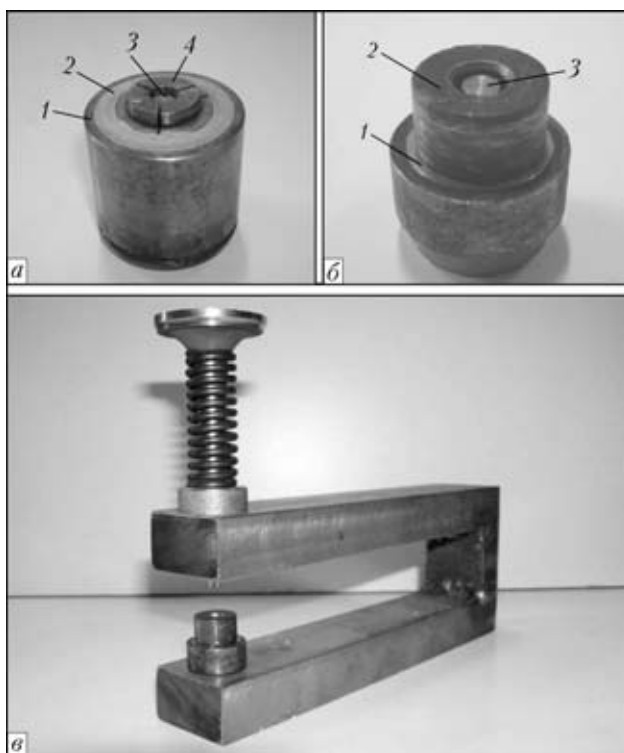


Рис. 3. Устройства для формирования соединений методом продавливания: а — раскрывающаяся Clinch-матрица (1 — формующая головка цангового типа; 2 — наковальня; 3 — эластичная муфта; 4 — кондуктор); б — сборно-разборная ТОХ-матрица (1 — формующая втулка; 2 — регулировочная прокладка; 3 — наковальня); в — внешний вид скобы

стали 08кп толщиной 0,55 и 1,00 мм, оцинкованной электролитическим способом с обеих сторон. Эта сталь относится к материалам глубокой вытяжки и широко применяется в штамповарных конструкциях транспортного машиностроения.

Разработаны жесткая ТОХ-матрица и раскрывающаяся Clinch-матрица, позволяющие формировать соединения из листов металла различной толщины за счет варьирования размеров внутреннего диаметра и высоты формующей втулки (рис. 3, а, б). Технологические исследования проводили при нагружении системы пуансон–матрица в скобе (рис. 3, в) на испытательной машине ZD-10 с регистрацией усилия сжатия в зависимости от перемещения пуансона.

Установлено, что для Clinch- и ТОХ-матрицы целесообразно использовать зазор z между пуансоном и стенкой матрицы разной величины. При зазоре, меньшем суммарной толщины листов металла ($z < t_0$), происходит утонение стенки «стакана» до заданного значения при относительно небольшом уменьшении толщины листов металла на торце пуансона. Этот прием использован при проектировании жесткой ТОХ-матрицы. Для снижения напряжений радиус закругления входной кромки матрицы увеличен до значений $r_m \sim 0,25 \dots 0,40 t_0$.

В технологии формирования Clinch-соединения этап вытяжки следует проводить без утонения

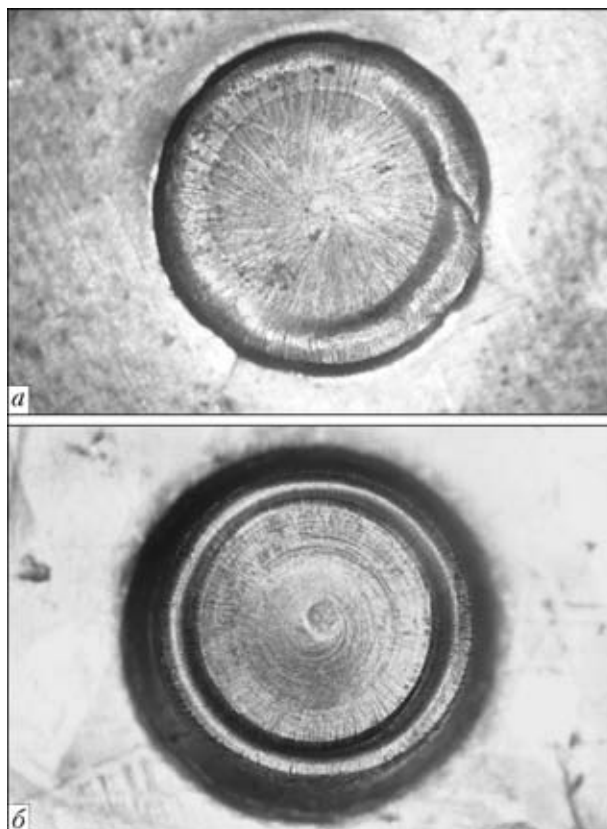


Рис. 4. Механический замок со стороны матрицы в Clinch- (а) и ТОХ-соединении (б)

стенки при зазоре $z > 1,1 t_0$, поскольку раскрытие Clinch-матрицы в процессе формоизменения нежелательно. При минимальном значении радиуса закругления матрицы $r_m \sim 0,05 \dots 0,10 t_0$ происходит значительное увеличение напряжений в опасном сечении. Однако при глубине вытяжки до $1,5 t_0$ напряжения растяжения от изгиба, хотя и превышают значения предела текучести металла, но перемещение листа по торцевой поверхности матрицы не позволяет ей раскрыться.

Образование «ласточки хвоста» имеет место в процессе осадки соединяемых листов между пуансоном и наковальной матрицы. Сближение рабочих поверхностей приводит к течению металла от центра к периферии, деформирование происходит скачками с образованием складок на границе раздела сталь 08кп–цинковое покрытие–наковальня матрицы. При этом наблюдается образование так называемых воротников, в которых возможно нарушение сплошности цинкового покрытия (рис. 4, а).

Формирование ТОХ-соединения осуществляется в результате течения металла между наковальной матрицы и пуансоном в замкнутый объем полости на периметре наковальни. Этот процесс соответствует холодной штамповке с принудительной вытяжкой металла. Образование «кнопочного» соединения происходит с более плотным взаимодействием листов металла, подверженных ориентационному утонению. Форми-

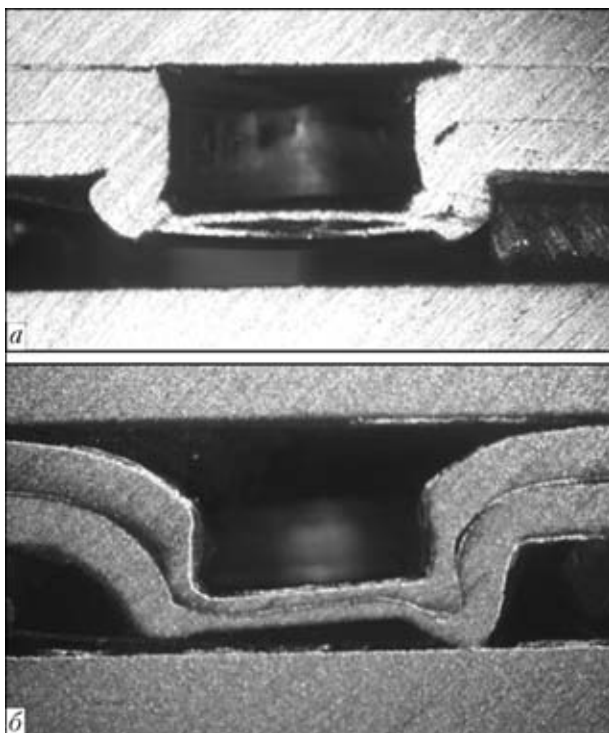


Рис. 5. Шлифы клеемеханических Clinch-соединения (клей ЭПУ-Н) (а) и ТОХ-соединения (клей ЭПУ-П) (б)

рование соединения в замкнутом объеме ограничивает поверхностную деформацию листа металла, что способствует сохранению сплошности цинкового покрытия (рис. 4, б).

Известно [6], что использование клеевых композиций с вязкостью до 50 Па·с существенного влияния на процесс формирования клеемеханических соединений, получаемых методом продавливания, не оказывает, однако усложняет полный технологический цикл их изготовления. Существует проблема дозированного нанесения жидких клеев на сопрягаемые поверхности, а выдавливание из полости нахлестки приводит к загрязнению изделия, оборудования и технологической оснастки. Регулирование вязкости клеевой композиции осуществляют введением различных наполнителей, которые, армируя клеевую прослойку, удерживают клей в зазоре нахлестки, способствуют сохранению равномерного по толщине клеевого слоя после его нанесения на криволинейные поверхности, повышают прочностные характеристики и трещиностойкость клеевой прослойки.

Исследование влияния клеевой прослойки на процесс формирования Clinch- и ТОХ-соединений проводили с использованием эпоксидно-полиуретановой клеевой композиции ЭПУ с различной степенью наполнения: ЭПУ-К — эффективная вязкость составляет около 80 Па·с; ЭПУ-Н — около 200 Па·с; ЭПУ-П — пастообразная.

Установлено, что композиция ЭПУ-К быстро выдавливается с контактной площадки и не препятствует получению качественных соединений, в то же время композиции ЭПУ-Н и ЭПУ-П ока-

зывают различное влияние на всех стадиях формообразования соединений в Clinch- и ТОХ-матрице. В Clinch-соединении, где формоизменение происходит без утонения соединяемых листов, обнаружено два варианта скопления клея ЭПУ-Н: в кольцевой зоне под прижимом и зоне пластического течения осадки за кромкой рабочей поверхности пуансона (рис. 5, а). В последнем случае имеет место растрескивание «кнопки», образующей заходы, что приводит к загрязнению раскрывающейся матрицы.

Отрицательное влияние клея ЭПУ-П на формирование ТОХ-соединения зарегистрировано уже на стадии прижима листов и приложения усилия на пуансон. В центре «кнопки» образуется зона всестороннего сжатия, которая препятствует движению пасты в кольцевую зону формирования вытяжки. Клей оказывается в замкнутом пространстве и образует «карман», разделяющий соединяемые листы. На стадии осадки клей из «кармана» вытесняется в область образования шейки и препятствует формированию «ласточки хвоста» (рис. 5, б). Использование клея ЭПУ-Н с вязкостью приблизительно 200 Па·с исключило образование «кармана» и способствовало получению качественного ТОХ-соединения.

В гибридных нахлесточных соединениях в результате несоосности приложения нагрузки происходит их деформация, что вызывает перераспределение напряжений в клеевом слое с концентрацией на краю нахлестки. При достижении предельных напряжений происходит разрушение клеевой прослойки и гибридное соединение работает как чисто сварное или заклепочное.

Испытания клеемеханических образцов нагружением на срез при растяжении показали, что прочность Clinch- и ТОХ-соединения с композициями ЭПУ-К и ЭПУ-Н практически одинакова. Первоначальное разрушение происходило по клеевой прослойке при нагрузках в 2 раза больших, чем у образцов без клея, т. е. основную нагрузку воспринимает клеевая прослойка, а заклепка выполняет функцию фиксатора на время полимеризации клея.

Эксплуатация автомобилей с клеесварными соединениями показала, что отвержденная эпоксидная клеевая прослойка склонна к поверхностному растрескиванию при динамическом воздействии и термоциклировании. Прораствание трещин приводит к их заполнению агрессивными средами и интенсификации протекания щелевой коррозии.

Возможности рецептурных методов регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных клеевых композиций ограничены узкими пределами варьирования входящих в систему компонентов (пластификаторов, растворителей, наполнителей и т. д.), содержание которых определяется технологическими требованиями формирования ка-



чественных клеємеханических соединений. Поэтому поиски новых нетрадиционных способов улучшения реологических и деформационных характеристик наполненных клеевых композиций по-прежнему актуальны.

Исследовали гибридную клеевую композицию (ГКК), полученную в результате совмещения каучука с полиуретаном, что оказалось перспективным с точки зрения более широкого варьирования деформационно-прочностных и реологических свойств. Каучуковым компонентом служил кремнийорганический эластомер, наличие в его цепи концевых функциональных групп (Si-OH) играет важную роль в механизме «холодного» отверждения, поскольку скорость реакции форполимера уретановой матрицы с концевыми изоцианатными группами и силикона сопоставима. Это позволило получить однокомпонентную систему в виде готовой клеевой композиции, упакованной в герметичном контейнере. Отверждение такого материала происходит в результате взаимодействия атмосферной влаги с гидролитически неустойчивыми группами в молекулах структурирующего агента и последующей реакции с блокированными концевыми группами силикона и форполимера.

Исследования физико-механических свойств экспериментальной ГКК показали высокую адгезионную способность к алюминиевым сплавам и оцинкованной стали, а также к замасленным поверхностям, имеющим место после штамповки (разрушение склеенных образцов на сдвиг при растяжении носило когезионный характер). В то же время высокое (до 400 %) относительное удлинение характерно для эластомерных герметиков, эффективно защищающих нахлесточное соединение от щелевой коррозии. Для использования ГКК в качестве конструкционного клея необходимо повысить модуль упругости и механическую прочность, т. е. степень его сопротивления внешним силовым воздействиям.

Определяющую роль в физических и в первую очередь механических свойствах отвержденной клеевой прослойки играет каркас из твердых частиц и волокон — их упаковка, ориентация и степень заполнения объема. Согласно теории полидисперсного наполнения [7], наибольший эффект упрочнения структуры клевого композита обеспечивается прерывистой гранулометрией дисперсных частиц. В этом случае мелкая фракция заполняет пустоты, неизбежно возникающие между более крупными частицами.

Установлено, что под влиянием твердой поверхности активного наполнителя происходит не только «укладка» молекул гибридной матрицы в кинетически выгодном положении, но и перераспределение межмолекулярных связей, катализирующих реакции полимеризации. Значительная роль при этом принадлежит водородным связям.

Поэтому негидрофобизированные кремнеземы, содержащие на поверхности ОН-группы, ускоряют реакции сшивки, а гидрофобизированные никакого влияния не оказывают.

В исследованиях по наполнению экспериментальной полимерной гибридной матрицы использовали твердые порошки различной химической природы и дисперсности (аэросил, каолин, алюминиевую пудру, ультрадисперсный порошок карбида кремния, высокодисперсный порошок железа, технический графит).

Установлено, что введение аэросила и каолина, на поверхности которых находятся активные группы, способные взаимодействовать с полиуретановой составляющей гибридной матрицы, придает клеевой композиции монолитность, повышает когезионную прочность и герметичность. В зависимости от концентрации этих наполнителей изменяются реологические свойства композиций.

Нами использован метод математического расчета плотности упаковки полифракционной сыпучей смеси с одновременным учетом характера взаимодействия гибридной полимерной матрицы с инертной неорганической поверхностью [8]. Это позволило решить следующие задачи: определить соотношение между различными фракциями инертных наполнителей в полифракционных смесях, что обеспечило оптимальную степень упаковки с наибольшей плотностью и модулем Юнга; установить предельно возможную дозировку наполнителей в полимерной матрице, не препятствующую формированию клеємеханических соединений, получаемых различными методами; обеспечить одновременное взаимодействие клеевой прослойки и клепки при растяжении на срез с адгезионно-когезионным характером разрушения.

Подобраны два состава ГКК, не влияющих на процесс формирования Clinch- и TOX-соедине-

F , кН

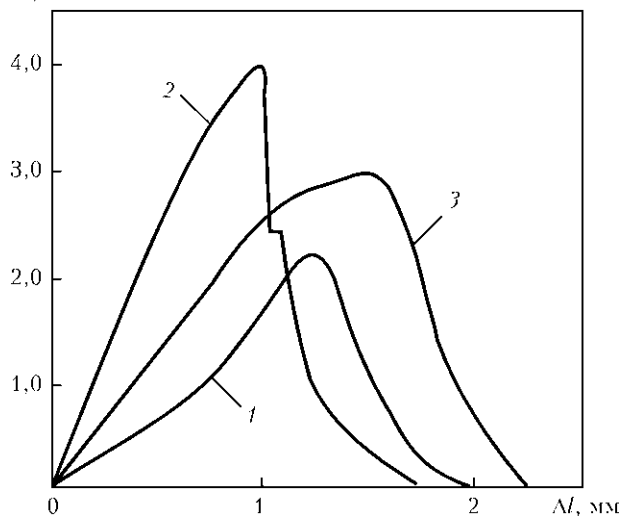


Рис. 6. Диаграмма усилие F и деформация Δl механического (3) и клеємеханического соединения с экспериментальной гибридной композицией ГКК-1 (1) и ГКК-2 (2)



Рис. 7. Внешний вид пневмопресса для формирования механических соединений

ния. Испытания односторонних клеомеханических соединений на сдвиг показали, что использование ГKK-1 повышает прочность Clinch- и TOX-соединения в 1,5 раза при одновременном разрушении клеевой прослойки и «кнопки». Использование ГKK-2 незначительно повышает прочность механического соединения. Разрушение образцов происходило последовательно — в начале имело место отслаивание клеевой прослойки с образованием тяжей, затем срез или выдергивание «кнопки» (рис. 6). Разрушение клеевого слоя носит когезионный характер, высокая адгезионная прочность свидетельствует о высоких герметизирую-

щих свойствах и стойкости против щелевой коррозии.

В результате выполненных исследований разработаны принципы проектирования формующей системы пуансон–матрица для Clinch- и TOX-соединений тонколистовой стали глубокой вытяжки и стационарное оборудование на базе С-рамы с пневматическим силовым приводом и регулированием сжатия в диапазоне 0...20 кН (рис. 7). Технология формирования механических и клеомеханических соединений, получаемых методом продавливания, рекомендована для изготовления узлов тонколистовых транспортных конструкций, эксплуатирующихся в коррозионно-активных средах.

1. Альсман М. Современные тонколистовые изделия с покрытием для автомобилестроения // Черн. металлы. — 2001. — № 6. — С. 49–53.
2. Шавырин В.Н., Рязанцев В.И. Клееварные конструкции. — М.: Машиностроение, 1981. — 168 с.
3. Hahn O., Budde L. Analyse und systematische Einteilung umformtechnischer Fügeverfahren ohne Hilfsfügeteil // Blech Rohre Profile. — 1990. — 37, № 1. — S. 29–32.
4. Сторожев М.В., Попов У.А. Теория обработки металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1977. — 423 с.
5. Hanh O., Peetz A. Improvement of the joint element properties through the combination of mechanical fasteners and adhesive bonding // Welding in the World. — 1999. — 43, № 3. — P. 38–46.
6. Hanh O., Wibbeke T.-M. Einsatz von warmearmen Hybridfügetechnologien zum Verbinden dünnwandiger Blechwerkstoffe // Schweissen und Schneiden. — 2004. — № 11. — S. 593–600.
7. Васильев Ю.С., Паришутин Л.С., Чукашкин А.Н. Разработка клееварных методов восстановления и усиления элементов промышленных и транспортных конструкций // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин. — К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2006. — С. 374–379.
8. Эффективные деформационно-прочностные характеристики полимерной композиции с дискретными включениями разных размеров / И.И. Анисимов, С.А. Бочкарева, В.И. Десятых и др. // Физ. мезомеханика. — 2006. — № 2. — С. 11–15.

Processes of formation of mechanical joints of sheet metals with anticorrosion coating by the method of punching in the presence of adhesive compositions of different viscosity between the mated surfaces were studied. Limit values of rheological characteristics of adhesives influencing formation of glue-mechanical joints were established. Highly-filled cold cure adhesive composition on silicon-polyurethane base, not preventing formation of glue-mechanical joints was developed. Press equipment based on a pneumatic actuator, providing up to 20 kN compressive force was designed and manufactured.

Поступила в редакцию 29.08.2009



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО, д-р техн. наук, **А. О. ЛУКЬЯНЕНКО**, инж.

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

Ю. О. ПОЛУКАРОВ, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Представлены результаты исследований зависимости концентрации вредных веществ, поступающих в воздух рабочей зоны при ручной дуговой сварке электродами с рутил-целлюлозным покрытием, от расстояния до сварочной дуги в различных условиях вентилирования (с общеобменной вентиляцией, местной и без вентиляции). Получены аналитические зависимости концентрации вредных веществ в различных точках рабочей зоны от интенсивности образования сварочных аэрозолей и мощности сварочной дуги.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, сварочные аэрозоли, марганец, вентиляция, содержание сварочных аэрозолей в воздухе, прогнозирование

Одним из основных вредных производственных факторов в сварочном производстве является загрязнение воздуха рабочей зоны токсичными веществами в виде сварочных аэрозолей (СА), образующихся при электродуговом процессе. Защита сварщиков и производственной среды от действия СА осуществляется посредством различных систем вентиляции, которые должны обеспечить содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не выше предельно допустимой концентрации (ПДК). Для выбора необходимой системы вентиляции и повышения ее эффективности на рабочих местах сварщиков необходимы экспериментальные данные о содержании вредных веществ в воздухе рабочей зоны при различных условиях вентилирования. Получение этих данных по общепринятым методикам [1, 2] является довольно длительной и трудоемкой задачей. Так, отбор одной пробы СА только в одной точке воздушного пространства рабочей зоны сварщика при применении конкретной марки сварочного материала продолжается практически в течение одной рабочей смены. Допустимая относительная погрешность получаемых данных в соответствии с требованиями [3] при этом составляет $\pm 25\%$, что позволяет обеспечить избирательное определение содержания вещества на уровне не выше 0,5 ПДК. Учитывая то, что в настоящее время в сварочном производстве применяется большое количество отечественных и зарубежных марок сварочных материалов, такие данные проще прогнозировать по показателю ин-

тенсивности образования СА, для определения которой требуется отобрать на протяжении нескольких минут всего 3...5 проб СА [1].

Цель данной работы — экспериментальное исследование зависимости концентрации СА в воздухе в пределах рабочей зоны при дуговой сварке покрытыми электродами низкоуглеродистых сталей от интенсивности образования СА и (или) мощности дуги, расстояния до места сварки (сварочной дуги) и вида системы вентиляции.

Опыты выполняли в лабораторных условиях на типичном рабочем месте для ручной дуговой сварки при использовании общеобменной и местной вентиляции, а также без нее. Пробы СА отбирали вокруг дуги в трех точках на разном расстоянии от нее: 55 см — зона дыхания сварщика, 100 и 150 см — рабочая зона. С целью сравнения эффективности общеобменной и местной вентиляции ее производительность выбрали одинаковой — 1500 м³/ч. В системе общеобменной вентиляции использовали типичный осевой вентилятор, а в качестве местной вентиляции — стол сварщика со встроенным вытяжным устройством типа наклонная панель равномерного всасывания (рис. 1). Пробы СА и газов отбирали в процессе наплавки электродами с рутил-целлюлозным покрытием марки АНО-36 диаметром 4 мм на пластины из стали СтЗсп. При этом использовали постоянный ток обратной полярности. Для установления зависимости интенсивности выделения СА от мощности дуги сварочный ток изменяли в пределах $I_{\text{св}} = 130...230$ А, напряжение на дуге — $U_{\text{д}} = 24...40$ В. Отбор проб СА в воздухе рабочей зоны, определение содержания марганца как ведущего токсичного компонента в составе СА, об-

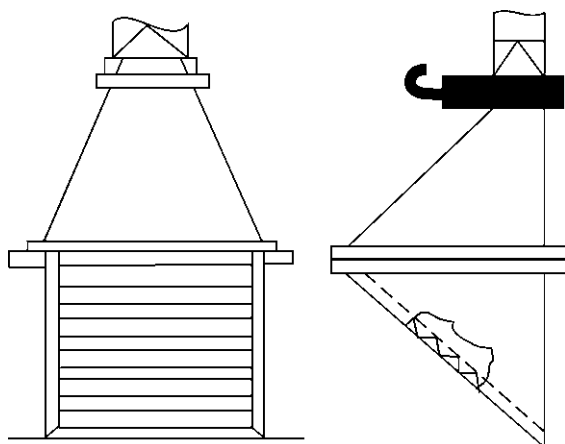


Рис. 1. Встроенное вытяжное устройство типа наклонная панель равномерного всасывания над рабочим столом сварщика

разрушающегося при сварке низкоуглеродистых сталей, и интенсивности образования СА выполняли по общепринятым методикам [1, 2]. Достоверность полученных экспериментальных данных проверяли в соответствии с принятыми методическими указаниями [3]. Аналитическую и статистическую обработку установленных математических зависимостей выполняли по разработанной в Национальном НИИ промышленной безопасности и охраны труда специальной программе с помощью заложенного в ней метода регрессионного анализа [4, 5].

Результаты исследований зависимостей концентрации СА в воздухе рабочей зоны от расстояния до сварочной дуги (рис. 2, а) показали, что она максимальная и снижается с увеличением расстояния до дуги при сварке без применения вентиляции; значительно ниже и увеличивается при наличии общеобменной вентиляции; минимальная и почти не изменяется при применении местной вентиляции. Указанное выше подтверждает тот факт, что наиболее эффективной является местная вентиляция, обеспечивающая также в данном случае снижение концентрации марганца ниже ПДК (не более 0,2 мг/м³) как в зоне дыхания

(на расстоянии 55 см от дуги), так и в других точках рабочей зоны (рис. 2, б). Это объясняется тем, что факел СА локализуется местным отсосом еще в зоне сварочной дуги и не распространяется в воздухе рабочей зоны.

При включении общеобменной вентиляции, всасывающее отверстие которой находится на определенном расстоянии от рабочего места сварщика, концентрация СА значительно выше, чем в предыдущем случае, и повышается еще больше с увеличением расстояния от места сварки. Это свидетельствует о том, что воздух, который загрязняется аэрозолем в зоне дуги, переносится по направлению места нахождения всасывающего отверстия системы общеобменной вентиляции. На незначительном (приблизительно до 70 см) расстоянии от дуги концентрация марганца в воздухе рабочей зоны ниже ПДК (рис. 2, б).

С целью прогнозирования содержания СА и, в частности, марганца как определяющего токсичного компонента, образующегося при сварке низкоуглеродистой стали электродами общего назначения, исследовали зависимость от интенсивности образования СА и содержания марганца на различном расстоянии от сварочной дуги и вида применяемой вентиляции (рис. 2). Для этого рассчитывали коэффициент пропорциональности (соотношения) для СА K_a и марганца K_{Mn} между концентрацией данных веществ во всех точках рабочей зоны, где отбирали пробы СА, и интенсивностью их выделения:

$$K_{a(Mn)} = C_{a(Mn)} / V_{a(Mn)}, \quad (1)$$

где $C_{a(Mn)}$ — концентрация в воздухе рабочей зоны соответственно СА и марганца, мг/м³; $V_{a(Mn)}$ — интенсивность выделения СА и марганца соответственно 0,807 и 0,036 г/мин.

Обработка экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, с помощью интерполяционной формулы Лагранжа [6] позволила получить следующую зависимость коэффициентов пропорции

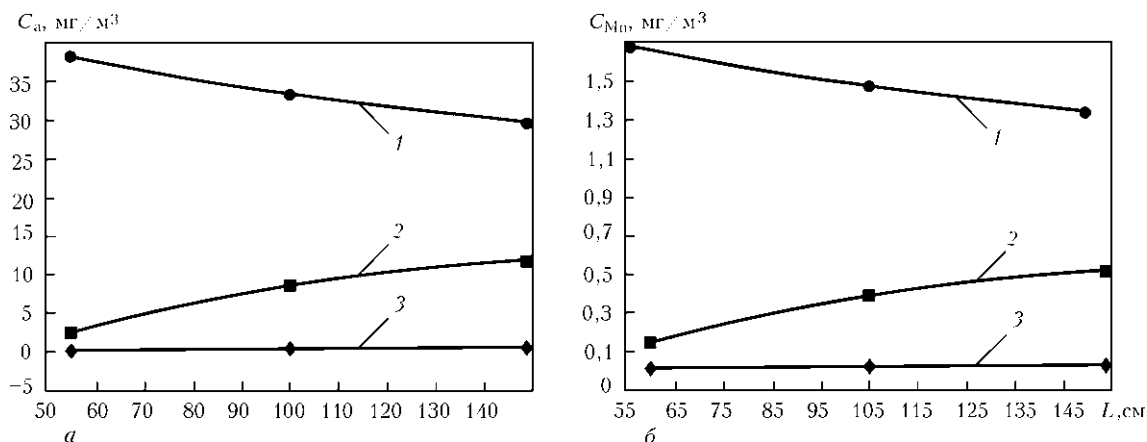


Рис. 2. Зависимость концентрации СА C_a (а) и марганца C_{Mn} (б) в воздухе рабочей зоны от расстояния до сварочной дуги L при дуговой сварке без вентиляции (1), с общеобменной (2) и местной (3) вентиляцией

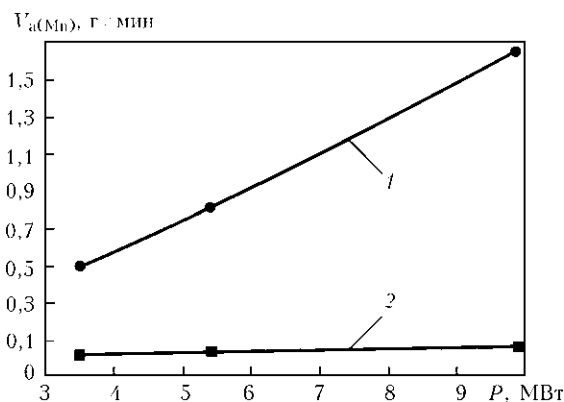


Рис. 3. Зависимость интенсивности выделения СА V_a (1) и V_{Mn} марганца (2) от мощности дуги P

ональности от расстояния L до сварочной дуги при сварке

без вентиляции

$$K_{a(Mn)} = 0,0039L^2 - 0,019L + 0,0563, \quad (2)$$

с общеобменной вентиляцией

$$K_{a(Mn)} = -0,0085L^2 + 0,0295L - 0,011, \quad (3)$$

с местной вентиляцией

$$K_{a(Mn)} = -0,0005L^2 + 0,0014L - 0,0003. \quad (4)$$

Относительная погрешность полученных математических моделей составляет не более 1,8 %.

Из формулы (1) находим значения C_a и C_{Mn}

$$C_{a(Mn)} = K_{a(Mn)} V_{a(Mn)}. \quad (5)$$

Подставив в формулу (5) зависимости (2)...(4), получим математические модели для прогнозирования концентрации СА и марганца в зависимости от интенсивности их выделения и расстояния до сварочной дуги при сварке

без вентиляции

$$C_{a(Mn)} = V_{a(Mn)}(0,0039L^2 - 0,019L + 0,056), \quad (6)$$

с общеобменной вентиляцией

$$C_{a(Mn)} = V_{a(Mn)}(-0,0085L^2 + 0,0295L - 0,011), \quad (7)$$

с местной вентиляцией

$$C_{a(Mn)} = V_{a(Mn)}(-0,0005L^2 + 0,0014L - 0,0003). \quad (8)$$

Результаты проверки расчетных данных о содержании марганца в воздухе рабочей зоны при сварке электродами АНО-36

Вид вентиляции	L , м	C_{Mn} , мг/м ³		Относительная погрешность, %
		расчетное	экспериментальное	
Без вентиляции	0,55	1,700	1,700	0
Общеобменная	1,00	0,360	0,380	5,3
Местная	1,50	0,024	0,023	4,3

Таким образом, по экспериментальным данным об интенсивности выделения СА или марганца, определение которых не представляет собой трудности [1, 2], можно легко и с высокой достоверностью рассчитать концентрацию этих веществ в различных точках рабочей зоны сварщика при наличии или отсутствии вентиляции. Если же получить эти данные не представляется возможным, то можно предложить другой менее точный метод, основанный на экспериментально установленной зависимости интенсивности выделения СА и марганца от мощности сварочной дуги (рис. 3). Аналитическая обработка этих данных методом регрессионного анализа позволила получить следующие зависимости:

$$V_a = -0,178 + 0,187I_{св} U_d, \quad (9)$$

$$V_{Mn} = 0,0014 + 0,0058I_{св} U_d, \quad (10)$$

где $I_{св}$ — сварочный ток, А; U_d — напряжение на дуге, В. Относительная погрешность зависимостей (9) и (10) соответственно составляет 2,1 и 3,7 %; коэффициент суммарной корреляции — 0,999 и 0,994.

Проверка точности расчетных данных по сравнению с экспериментальными показала, что их относительная погрешность не превышает 5,3 % (таблица).

Обобщение наших экспериментальных и литературных данных [7] свидетельствуют о том, что при сварке электродами с рутиловыми покрытиями интенсивность выделения СА не превышала примерно 0,4, а с целлюлозными — 1,0 г/мин. При этом содержание оксидов марганца в СА, образующихся при сварке электродами с рутиловыми покрытиями, составляло не более 10,2, а с целлюлозными — 5,5 %. Экспериментальная часть данной работы выполнена на примере широко применяемых в настоящее время электродов с рутил-целлюлозным покрытием. При этом интенсивность выделения СА на оптимальном режиме ($I_{св} = 180$ А, $U_d = 30$ В) составляла 0,81 г/мин (больше чем для рутиловых покрытий, но меньше чем для целлюлозных), содержание марганца — 4,45 % (не более чем в работе [7]). Учитывая, что относительная погрешность содержания СА в воздухе рабочей зоны в соответствии с требованиями [3] составляет ± 25 %, полученные математические модели можно применять для приблизительной оценки загрязнения воздуха рабочей зоны марганцем при сварке низкоуглеродистых сталей с использованием электродов различных марок с рутиловым и рутил-целлюлозным покрытиями.

Таким образом, с учетом того, что при ручной дуговой сварке электродами с рутил-целлюлозными покрытиями низкоуглеродистых сталей ос-



новным вредным компонентом в составе СА, определяющим условия труда, является марганец, для принятия решения о выборе вида вентиляции (местной или общеобменной) необходимо использовать данные о концентрации марганца в воздухе рабочей зоны, а для расчета производительности вентиляции — интенсивности его выделения.

Результаты выполненных исследований подтвердили, что местная вентиляция значительно эффективнее, чем общеобменная. Она позволяет снизить концентрацию марганца в зоне дыхания сварщика и рабочей зоне производственного помещения ниже ПДК (см. рис. 2).

Прогнозирование содержания СА и марганца в воздухе рабочей зоны с целью выбора вида вентиляции и ее оптимальных параметров можно осуществлять по формулам (6)–(8), сначала определив экспериментальным путем интенсивность их выделения [1, 2] или рассчитав ее в зависимости

от режима сварки (сварочного тока и напряжения дуги) по выражениям (9) и (10).

1. *Методические указания 1924–78.* Гигиеническая оценка сварочных материалов и способов сварки, наплавки и резки металлов. — М.: Минздрав СССР, 1980. — 15 с.
2. *Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы), № 4945–88.* — М.: Минздрав СССР, 1990. — 150 с.
3. *Методические указания 3936–85.* Контроль содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны. — М.: Минздрав СССР, 1985. — 18 с.
4. *Орловский П. Н.* Системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: Ин-т содержания и методов обучения. — 1996. — 358 с.
5. *Ферстер Е., Ренц Б.* Методы корреляционного и регрессионного анализа. — М.: Финансы и статистика, 1987. — 365 с.
6. *Мышкис А. Д.* Элементы теории математических моделей. — М.: КомКнига, 2007. — 191 с.
7. *Металлургия дуговой сварки.* Процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др.; Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1990. — 224 с.

Investigation results are presented on dependence of the concentration of harmful materials in the work zone air in manual rutile-cellulose electrode welding upon the distance to the welding arc under different ventilation conditions (general, local and without ventilation), as well as analytical dependencies of the concentration of harmful materials at different points of the work zone upon the intensity of formation of welding fumes and power of the welding arc.

Поступила в редакцию 23.04.2009

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО, РЕСУРСНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

10-я Юбилейная международная промышленная конференция и блиц-выставка

18–22 февраля 2010

п. Славское, Карпаты

Конференция включает обзорные доклады ученых и специалистов металлургической, горнодобывающей, газовой, нефте- и горноперерабатывающей промышленности, строительного, транспортного, инструментального и другого машиностроения, научно-исследовательских, проектных, конструкторских организаций, а также презентации ведущих фирм.

В рамках конференции состоятся семинары:

1. Оборудование. Инструменты, Оснастка. Перспективные металлические и неметаллические материалы. Технологии. Наноматериалы и нанотехнологии. Научный руководитель — Коваленко В. С., НТУУ «КПИ», г. Киев.
2. Современные технологии ремонтно-восстановительных работ в промышленности. Научный руководитель — Лобанов Л. М., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев.
3. Перспективы развития автомобильной отрасли. Строительные материалы. Научный руководитель — Богомолов В. В., Харьковский НАДУ (ХАДИ).
4. Теоретические и прикладные проблемы трибологии. Защита материалов от коррозии. Научные руководители — Похмурский В. И., Широков В. В., ФМИ НАН Украины, г. Львов.
5. Горнодобывающая промышленность: технология, оборудование, безопасность и экология. Научные руководители — Духовский А. Ю., директор НПП «Интрон-СЭТ», г. Донецк.

УИЦ «Наука. Техника. Технология»
Тел./факс: +38(044) 573 30 40, моб.: +38 067 708 93 95



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК*

Л. В. КРАВЧУК, Б. А. ЛЯШЕНКО, Г. В. ЦЫБАНЕВ, доктора техн. наук,
Р. И. КУРИАТ, К. П. БУЙСКИХ, Ю. С. НАЛИМОВ, кандидаты техн. наук
(Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины)

Рассмотрены тенденции развития ремонтных технологий в практике эксплуатации газотурбинных двигателей. Разработана методика количественной оценки влияния технологических ремонтных процессов их деталей на комплекс механических характеристик материала-основы в зоне ремонта. Эффективность технологии определяется изменением механических свойств.

Ключевые слова: энергетические установки, ремонтные технологии, детали газотурбинных двигателей, механические свойства

Современные тенденции развития газотурбостроения заключаются в одновременном создании системы обслуживания с разработкой новых двигателей [1]. Наиболее эффективным элементом этой системы является внедрение передовых технологий восстановительного ремонта для продления эксплуатации с организацией специализированных центров ремонта двигателей. В США ремонтом авиационной техники занимаются фирмы-производители двигателей, крупные независимые ремонтные компании, а также подразделения крупнейших авиакомпаний [2]. По прогнозам сумма продаж новых самолетов компании «Boeing» в ближайшие 20 лет составит 1,7 трлн дол. США, а доходы от обслуживания — 3,1 трлн дол. США. Причем половина этой суммы будет получена в результате ремонта. В 2000 г. доходы от ремонта составили 44,6 млрд дол. США, а к 2020 г. они возрастут до 110 млрд дол. США [2].

В настоящее время происходит расширение участка фирм-производителей газотурбинных двигателей (ГТД) в сфере сервисного обслуживания и ремонта двигателей. Фирма «Rolls-Royce» имеет 300 крупных заказчиков в 50 странах [3, 4], стимулирует организацию дочерних фирм, специализирующихся в области ремонта. Ежегодные контракты фирмы достигают 9 млрд дол. США.

Фирма GE разрабатывает новые ремонтные технологии [5], в том числе и для США [6], фирма «Alstom» — систему CLE, предусматривающую использование новых ремонтных технологий для увеличения межремонтных интервалов ГТУ [7].

Ведущие фирмы строят предприятия по ремонту энергетического оборудования в различных регионах мира [8]. Патентуется схема организации процесса ремонта промышленных ГТУ [9]. С 2000 г. фирма «Trans Canada Turbines» производит полное ремонтное обслуживание ГТУ. В ближайшие 10 лет сумма заказов на ремонт ГТУ типа RB 211 превысит 250 млн дол. США [10]. Все большее внимание уделяется разработке ремонтных технологий и подготовке ремонтного персонала [11] при прогнозировании экономических затрат на ремонт [12].

Ключевым вопросом ремонтных технологий остается оценка остаточного ресурса и его повышение, поэтому ряд работ посвящен созданию методик и математических моделей механики поврежденной среды для теоретического анализа процессов истощения ресурса материалов конструктивных элементов с учетом развивающихся в эксплуатационных условиях деградиационных процессов [13, 14]. Сопоставление результатов расчета на прочность со структурными изменениями металла, происходящими в процессе эксплуатации при высоких температурах, позволяет обнаруживать расчетным путем места наиболее вероятного накопления поврежденности [15].

Практика ремонта и восстановления деталей энергетического оборудования использует широкий спектр современных технологий. Для ремонта лопаток ГТУ фирма «MTU Aero Engines GmbH» запатентовала сочетание методов порошковой металлургии, сварки и механической обработки области шва [16], а также ремонтную технологию пайки припоями на основе никелевого сплава [17]. Приведены способы эффективного и рационального применения пайки для ремонта дефектных лопаток горячей ступени ГТУ и основные технологии, разработанные для этих целей [18, 19]. Разделанные дефектные места заполняют расплавленным порошковым материалом, состоящим из припоя и на-

* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



полнителя, путем напыления аргоновой микроплазмой [20]. Все более широкое распространение в практике находят методы лазерной сварки дефектов и лазерной наплавки для ремонта точечных дефектов в различных сочетаниях термической и финишной обработки [21–27].

Детали из жаропрочного никелевого сплава с высоким содержанием алюминия и титана трудно ремонтировать обычными способами сварки. Поэтому перспективным для ремонта несвариваемых сплавов является метод электроискрового легирования с использованием высокопрочного наполнителя. Отмечают [28], что механические свойства отремонтированного участка вполне удовлетворительны, но для внедрения технологии электроискрового легирования в промышленность требуются определенные усилия в будущем. Фирмы INI и «Mitsubishi» разработали новый метод электроискрового легирования — MSC (Micro Spark Coating) [29] для ремонта лопаток ГТД, который использует энергию высокочастотных микроэлектрических разрядов и может заменить в ряде случаев традиционные методы ремонта — сварочные, гальванические, газотермические. Фирма «Toshiba» для восстановления лопаток ГТД разработала метод HIP (Hot Iso-static Pressing) [30]. Увеличение ресурса детали, имеющей некоторое усталостное повреждение, достигают технологией ионного азотирования [31].

Находят применение новые интегрированные технологические процессы ремонта деталей ГТД, сочетающие различные операции. Эффективны процессы сварки и последующей локальной термической обработки электронным лучом [32]. Фирма «Sneema Moteurs SA» после сварки дефектного участка пера лопатки подвергает зону сварного шва холодной вальцовке. Этим в пера лопатки наводятся остаточные напряжения сжатия, которые компенсируют остаточные напряжения растяжения в сварном шве, чем достигается упрочнение восстановленной конструкции. Этот способ эффективен для ремонта моноблочных дисков с лопатками, где отдельные лопатки не могут быть сняты для замены или восстановления [33].

Большинство ремонтных технологий следует рассматривать как альтернативные. В связи с этим необходима разработка методик оценки и выбора технологий.

Эффективность ремонтных технологий прежде всего может быть оценена по изменению комплекса механических свойств зоны отремонтированного дефекта в сравнении со свойствами зоны, не подверженной ремонту [34].

Цель настоящей работы — создание методики количественной оценки влияния технологических ремонтных процессов на служебные характеристики материала-основы в зоне ремонта.

Методика исследований. На образцах из неповрежденного материала и образцах с отремонтированными дефектами — имитаторами реальных повреждений, изготовленных из моделей лопаток ГТД из сплава ЭК-9, проведен комплекс исследований влияния особенностей технологии ремонта на характеристики кратковременной и длительной статической прочности, а также многоциклового усталости. Использовали ремонтные технологии способов дуговой сварки, наплавки и микроплазменной порошковой наплавки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Образцы изготовлены электроэрозионным методом. После цикла наплавки образцы подвергали термообработке по принятой ремонтной технологии. На боковых поверхностях плоского образца для испытаний на растяжение выполняли двусторонние надрезы $10 \times 0,5$ мм как имитаторы повреждений.

Особенностью испытаний было то, что измеряли деформацию не всего образца, а только в области повреждения с помощью экстензометра с базой измерений 12 мм. В аналогичной области ее измеряли и на неповрежденном образце. Регистрировали диаграммы деформирования таких образцов при температурах 20 и 800 °С. Исследования проведены на испытательном комплексе «INSTRON». В автоматическом режиме обеспечены программное нагружение, управление термическим состоянием и обработка информации в численном и графическом виде.

Для испытаний на многоцикловую усталость изготовлены образцы из сплава ЭК-9 двух видов: цилиндрические гладкие для определения в исходном состоянии и с концентратором глубиной 1 мм и длиной по образующей образца 2 мм. Концентратор имитировал дефект, подлежащий ремонту. Консольно закрепленный образец устанавливали на электродинамический стенд. В процессе испытаний устанавливали размах колебаний свободного конца консольного образца, который соответствует необходимому уровню амплитуды напряжений. Размах контролировали оптическим микроскопом МБС-2, количество циклов и частоту нагружения — электронно-счетными частотомерами ЧЗ-34.

Оценка влияния ремонтной технологии на термонапряженное и деформированное состояние проведена расчетно-экспериментальным методом. Исследования проведены на клиновидных образцах, имитирующих кромку лопатки. Для ремонта поврежденной кромки применено снятие поврежденной зоны механическим способом и последующее нанесение ремонтной микроплазменной порошковой наплавки. Для оценки уровня термонапряженного состояния кромки клиновидного образца после ремонта в зависимости от технологических режимов испытания оценивали на газодинамическом стенде в соответствии со

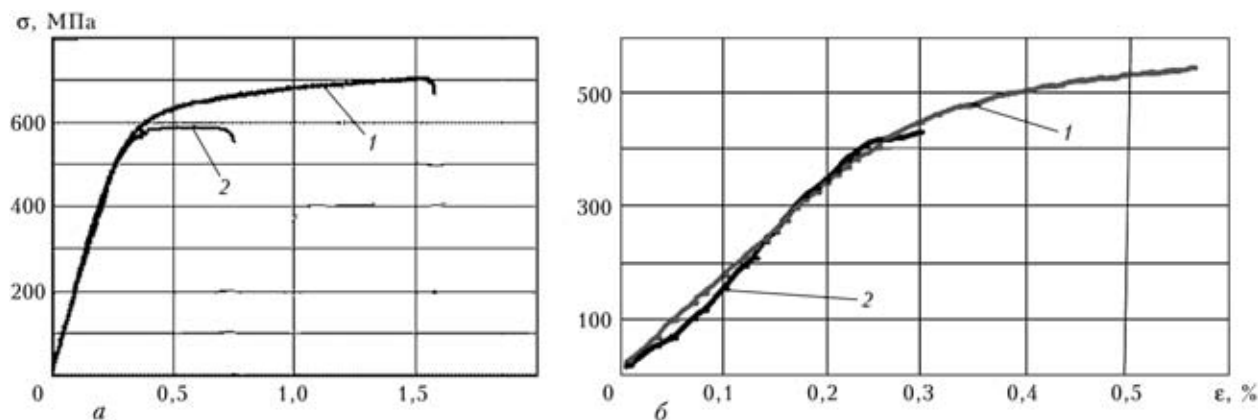


Рис. 1. Диаграммы кратковременного деформирования бездефектного (1) и образца с отремонтированным дефектом (2) при температуре 20 (а) и 800 °С (б)

стандартом [35]. Расчеты термического и напряженно-деформированного состояния (НДС) отремонтированных образцов проведены с использованием пакета прикладных программ «SPACE» [36]. В расчетах использовали характеристики сплавов ЭК-9 (основной металл) и ЭП-539 (металл наплавки). Рассмотрена стадия повреждения, когда на кромке возникают трещины термической усталости длиной до 0,5 мм и необходимо восстановление кромки на глубину до 0,7 мм, что соответствует радиусу закругления кромки. Основой для анализа кинетики теплового и НДС материала были результаты термометрирования образцов в стендовых условиях по фиксированным режимам термоциклирования. Использовали наиболее жесткий режим эксплуатации лопатки ГТД: 60 с нагрев и 60 с охлаждение в интервале температур 350...1100 °С.

Результаты и их обсуждение. *Кратковременная и длительная статическая прочность.* Анализ результатов исследований позволяет констатировать следующее.

Диаграммы деформирования, полученные на образцах без повреждений (рис. 1, кривая 1), лежат несколько ниже ($\approx 10\%$) от паспортных характеристик сплава ЭК-9. Это свидетельствует о влиянии процессов изготовления образцов моделей лопаток, которые обусловили определенные отклонения механических характеристик. Дополнительное влияние может оказывать технология электроэрозионной обработки образцов.

Анализ кривых деформирования рабочего участка образца в зоне отремонтированного дефекта

(рис. 1, а, кривая 2) показывает на 15%-е снижение предельных характеристик прочности и существенное (более 50 %) снижение ресурса пластичности. Однако разрушение образца при растяжении происходит вне зоны отремонтированного дефекта. Поэтому можно утверждать, что разработанная ремонтная технология обеспечивает восстановление прочности материала не ниже бездефектной области.

Результаты испытаний на длительную прочность, представленные на рис. 2, показывают, что характер разрушения бездефектных образцов и отремонтированных практически идентичны приведенным на рис. 1 результатам кратковременных статических испытаний. Как и при кратковременных испытаниях, ремонтная зона в отремонтированном образце не является слабым звеном.

Для прогнозирования работоспособности по критерию сопротивления длительному нагружению использовали метод базовых диаграмм (МБД), предложенный В. В. Кривенюком [37]. Для этого необходимы: информация о поведении материала-аналога в определенном диапазоне времени прогнозирования; результаты статических испытаний (рис. 1); ограниченная информация о поведении исследуемого материала при длительном нагружении на ограниченной базе испытаний (рис. 2). При наличии информации используются также другие данные о подобных материалах по химическому составу и свойствам.

Исходя из данных о характере изменения свойств с учетом реального разброса данных найдены коэффициенты уравнения базовых диаграмм в виде

$$\lg \sigma'_t = \lg \sigma_1 - (3,6 - \lg \sigma_1)(\lg t + 0,11g^2t)/12,$$

где σ'_t — текущее значение напряжения по базовой диаграмме, МПа; σ_1 — напряжение, приводящее к разрушению в течение 1 ч; t — время до разрушения, ч.

Механические свойства сплава ЭК-9

Температура, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	E , МПа
20	$\frac{704,2}{597,0}$	$\frac{637,3}{570,0}$	$\frac{1,3}{0,5}$	$\frac{180,00}{180,00}$
800	$\frac{630,8}{460,0}$	$\frac{536,0}{450,0}$	$\frac{0,6}{0,3}$	$\frac{153,19}{153,19}$

Примечание. В числителе приведены исходные значения, в знаменателе — после ремонта.

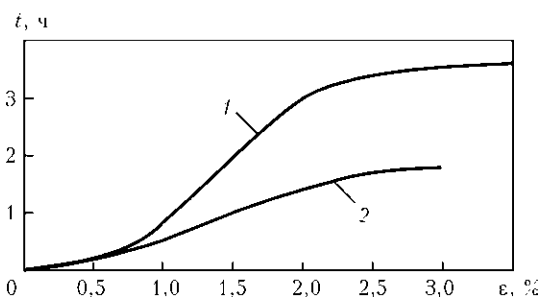


Рис. 2. Диаграммы ползучести бездефектных образцов (1) и образцов с отремонтированным дефектом (2) при температуре 800 °С

Особенности отдельных участков диаграмм длительной прочности конкретизируются с помощью экспериментальных характеристик. Принципиальным в использовании методики прогнозирования МБД является определение поправочных коэффициентов, которые учитывают кинетику изменений пластичности. Ориентировочные расчеты по методике МБД показывают снижение характеристик длительной прочности на значительных базах времени на уровне около 30 % исходных.

Многоцикловая усталость. Испытание исходных образцов провели при резонансной частоте 850...900 Гц по первой форме колебаний. Предел выносливости определяли на базе $2 \cdot 10^7$ циклов. При испытаниях фиксировали количество циклов нагружения. Критерием предельного состояния принято: начало снижения резонансной частоты (1); снижение резонансной частоты на 1 % (2). Первое из них принимали за долговечность, которая отвечает моменту зарождения усталостной трещины, после чего длится процесс развития трещины до момента снижения резонансной частоты на 1 %. Последнюю долговечность принимали как конечное разрушение образца. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

Анализ кривых свидетельствует о том, что процесс развития усталостных трещин по количеству циклов в 3...4 раза больше, чем до зарождения трещины. Особенностью усталостного разруше-

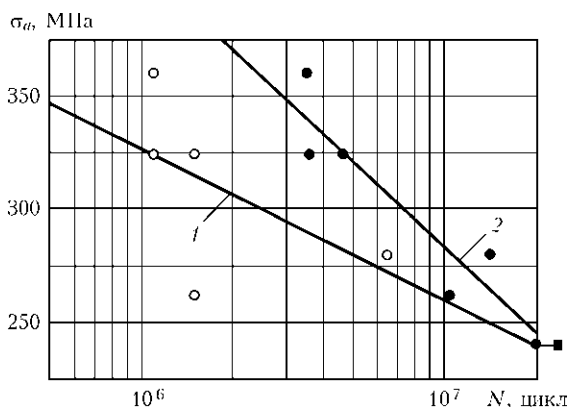


Рис. 3. Кривые усталости образцов из сплава ЭК-9 в исходном состоянии: 1 — начало снижения резонансной частоты; 2 — снижение резонансной частоты на 1 %

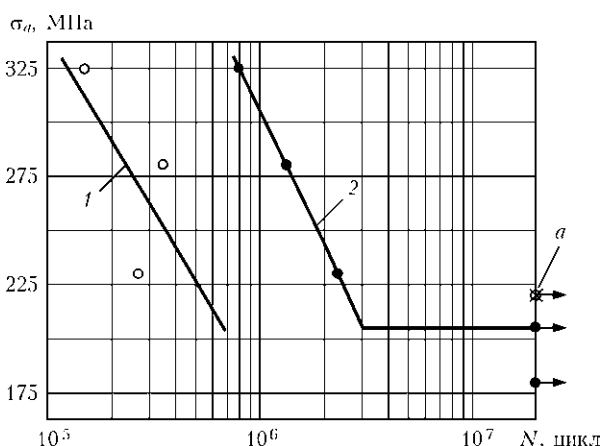


Рис. 4. Кривые усталости образцов из сплава ЭК-9 после ремонта: 1 — начало снижения резонансной частоты; 2 — начало снижения резонансной частоты на 1 % (a — образец, прошедший испытания ($N = 2 \cdot 10^7$ цикл) сначала при $\sigma_a = 205$, а затем при $\sigma_a = 220$ МПа)

ния является наличие на поверхности рабочей части образца нескольких трещин.

Образцы после ремонтной технологии были шлифованы. Резонансная частота составляла 720 Гц. Кривые усталости после ремонтной технологии приведены на рис. 4. Сравнение результатов испытаний показывает, что образцы после ремонта имеют характеристики усталости меньше, чем исходные ($\sigma_{-1} = 240$ МПа — исходные, $\sigma_{-1}^{\text{рем}} = 205$ МПа — образцы после ремонта). Кроме того, если кривая усталости исходных образцов имеет вид наклонной прямой до базы $2 \cdot 10^7$ циклов, то кривая для отремонтированных образцов имеет более крутой наклон и физический предел усталости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов с абсциссой излома кривой на уровне $3 \cdot 10^6$ циклов. Усталостные трещины в образцах после ремонта возникали не в зоне сварного шва, а в металле ЗТВ.

Полученные результаты трактовали с позиций предельного истощения пластичности в соответствии с моделью, предложенной в работах [38, 39].

Термонапряженное состояние материалов в зоне ремонта. Основной целью работ по данному направлению была оценка влияния различия свойств основного и наплавленного металлов на уровень остаточных технологических напряжений и кинетики их изменения в условиях переменных температурных изменений.

Преимущественное внимание уделено двум реализуемым на практике вариантам. В первой модельной задаче принято допущение, что ремонтная технология обеспечивает отсутствие остаточных напряжений при температуре 20 °С, т. е. при этой температуре отсутствуют начальные напряжения в клине. Во второй модельной задаче исходили из предположения, что ремонтную наплавку наносили при температуре 1200 °С и при этой температуре и однородном тепловом состо-

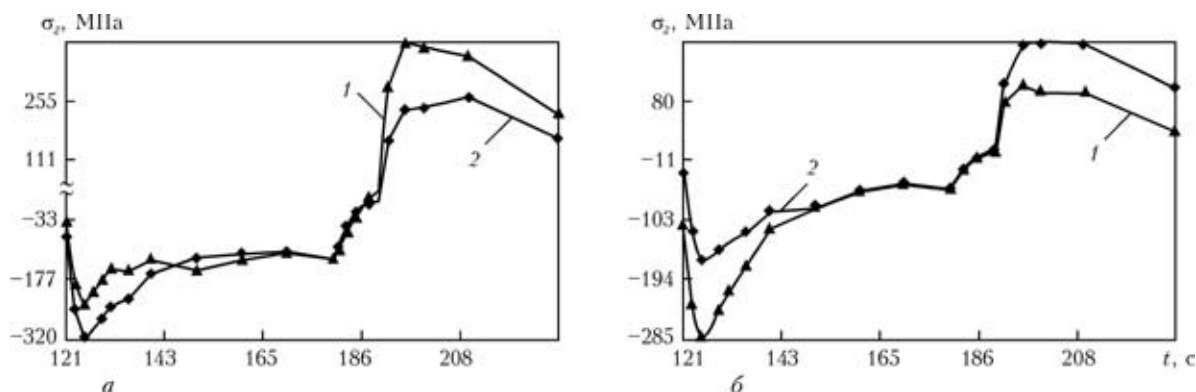


Рис. 5. Изменение напряжений σ_z в точке контакта материала наплавки (1) и основного металла (2) в цикле тепловой нагрузки по условию 1 (а) и 2 (б)

янии отсутствуют начальные напряжения. Обобщенные результаты такого анализа представлены на рис. 5.

Сравнив термонапряженные состояния клиновидного образца в цикле тепловой нагрузки двух вариантов исходного состояния материалов в зоне наплавки, можно отметить следующее. Более высокие напряжения как сжимающие, так и растягивающие, возникают в случае варианта 1. Однако если сжимающие напряжения в двух вариантах близки по абсолютным значениями, то растягивающие, являющиеся особенно опасными для возникновения и развития трещин термической усталости, для случая 2, который более адекватно отображает реальную картину, значительно меньше. Эти напряжения составляют для варианта 1 — 400 (на кромке), 380 (металл наплавки) и 245 (основной металл), а для варианта 2 — соответственно 145, 110 и 171 МПа.

В заключении следует отметить, что в практике эксплуатации энергетических установок, в том числе АГТД, наметилась тенденция, когда объемы ремонтных и восстановительных работ начинают превышать объемы продажи новой техники. Эти «ножницы» со временем будут увеличиваться.

Практика ремонтных и восстановительных работ использует широкий спектр современных технологий. Большой эффект по обеспечению необходимого уровня свойств достигается при использовании многооперационных интегрированных технологий. Их эффективность определяется уровнем снижения комплекса механических свойств восстанавливаемых деталей.

Выводы

1. Предложена методика количественной оценки влияния технологических ремонтных процессов на служебные характеристики материала-основы в зоне ремонта. Методика использует лабораторные, стендовые и численные методы, определяющие характеристики кратковременной и длительной статической прочности, многоциклового усталости,

а также оценку термонапряженного состояния ремонтной зоны.

2. Необходимы дальнейшие исследования по многофакторному эксперименту для определения оптимальных технологических режимов ремонтных технологий. Комплекс критериев оптимизации должен включать экономические показатели. Оценка и прогноз ресурса восстанавливаемых деталей проводится расчетными методами на основе экспериментальных лабораторных испытаний.

3. Необходима разработка нормативных документов, регламентирующих внедрение на ремонтных предприятиях методик определения комплекса механических свойств в зависимости от технологических режимов.

1. Марчуков Е. Новые возможности эксплуатации двигателей // Авиационная. — 1997. — № 5/6. — С. 53–55.
2. Shifrin C. Taking wind // Airline Bus. — 2001. — 17, N 10. — P. 61, 63–64.
3. Phillips E.H. Rolls-Royce bullish on MRO opportunities // Aviat. Week and Space Technol. — 1999. — 150, N 13. — P. 78–80.
4. Velocci A.L. Engine makers target greater MRO share // Ibid. — 1999. — 151, N 13. — P. 27–28.
5. Repair technology breeds success // Mod. Power Syst. — 1997. — 17, N 11. — P. 69, 71.
6. Kandebo S.W. USAF GE develop F110 engine plan // Aviat. Week and Space Technol. — 1994. — 141, N 24. — P. 22–23.
7. Longer engine life with upgrade kits // Gas Turbine World. — 1999. — 29, N 2. — P. 46, 48.
8. Jeffs E. ESCO wood set up repair shop in Thailand // Turbomach. Int. — 1999. — 40, N 1. — P. 32–34.
9. Pat. 5575145 USA; F02C 7/00. Gas turbine repair. — Оpubл. 19.11.96.
10. RB211 gas turbine repair and overhaul // Gas Turbine World. — 2000. — 30, N 3. — P. 30.
11. Pyle A.S., Rudisil D.A. Efficient turbomachinery turnaround // Chem. Eng. (USA). — 1997. — 104, N 5. — P. 132–141.
12. Прогнозирование экономических затрат на техническое обслуживание и ремонт авиационного комплекса / А.А. Авакян, А.В. Блинов, Н.Н. Новиков и др. // Метрология. — 2001. — № 8. — С. 3–14.
13. Математическое моделирование процессов истощения ресурса элементов конструкций на базе механики поврежденной среды / В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов и др. // 9-й Всерос. съезд по теор. и прикл. мех., Нижн. Новгород, 22–28 авг. 2006: Аннотации докладов. — Т. 3. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. — С. 104.



14. Chandra Murthy R. A., Palani G. S., Iyer Nagesh R. Remaining life prediction of cracked stiffened palens under constant and variable amplitude loading // *Int. J. Fatigue*. — 2007. — **29**, N 6. — P. 1125–1139.
15. Оценка остаточного ресурса с учетом микроповрежденности / И. А. Данюшевский, Е. Б. Куприй, М. Р. Малкин и др. // *Теплоэнергетика*. — 2008. — № 2. — С. 17–20.
16. Заявка 102005019077 Германия, В22F 5/04. Процесс изготовления и (или) ремонта лопаток газотурбинного двигателя. — Оpubл. 26.10.2006.
17. Заявка 10356562 Германия, В23K 35/28. Припой, способ его применения и способ обработки, в частности, ремонта деталей, в особенности лопаток газовых турбин. — Оpubл. 30.06.2005.
18. Корниенко А. Н., Жадкевич А. М. Состояние и проблемы внедрения пайки для ремонта лопаток газотурбинных двигателей // *Загот. пр-ва в машиностр.* — 2000. — № 10. — С. 9–12.
19. Zhadkevich A.M. Brazing of defects of aircraft and ship turbine blades — challenging technology of extension of their life // *Advances in Electrometallurgy*. — 2005. — N 1. — P. 33–39.
20. Пат. 2310551 Россия, В23P 6/00, C23C 14/40. Способ ремонта поверхностных дефектов деталей машин. — Оpubл. 20.11.2007.
21. Юркевич С.Н., Фомихина И.В. Лазерная наплавка локальных поверхностных дефектов деталей из стали 30ХГСН2А // *Инструм. и технол.* — 2004. — № 19/20. — С. 122–126.
22. Попов В.Н., Попова М.В., Волошин Д.Е. Исследование эффективности применения лазерной техники при восстановлении изношенных деталей в ремонтном производстве // *Тр. Брат. гос. техн. ун-та*. — 2007. — № 2. — С. 238–242.
23. Заявка 10337866 Германия, C23C 24/10. Способ изготовления и (или) ремонта деталей газовых турбин. — Оpubл. 24.03.2005.
24. Юркевич С.Н., Томашевич А.В., Юркевич А.С. Восстановление деталей авиатехники методом лазерной наплавки // *Ремонт, восстановление, модернизация*. — 2006. — № 3. — С. 31–33.
25. Заявка 102004002551 Германия, В23K 26/34. Способ и устройство для ремонта деталей конструкции. — Оpubл. 18.08.2005.
26. Юркевич С.Н. Ремонт без расхромливания точечных и локальных дефектов на деталях авиатехники из высокопрочных сталей 30ХГСН2А и 30ХГСА с хромовым покрытием // *Металлообработка*. — 2005. — № 3. — С. 39–41.
27. Blackshire J.L., Dosser L., Hix Ken. Laser processing of micro-cracks for structural life extension // *Proc. SPIE*. — 2004. — 5392. — P. 168–178.
28. Xie Yu-jiang, Wang Mao-cai. Unweldable superalloy component repair using electro-spark deposition with high strength filler material // *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 2005. — 15, Spec. Issue 3. — P. 359–364.
29. Разработка технологии нанесения покрытий и плакирования методом MSC с использованием энергии электрических разрядов / Н. Ochiai, М. Watanabe, М. Arai et al. // *Ishikawajima — Harima Eng. Rev.* — 2005. — **45**, N 2. — P. 72–79.
30. Study on the HIP technology for the life extension of gas turbine buckets / D. Saito, Y. Yoshika, K. Ishibashi et al. // *Schiff und Hafen*. — 2004. — **56**, N 4. — S. 42.
31. A repair process for fatigue damage using plasma nitriding / A. Alsaran, I. Kaymaz, A. Celik et al. // *Surface and Coat. Technol.* — 2004. — **186**, N 3. — P. 333–338.
32. Шаронова Н.И. Технология восстановления роторных и корпусных конструкций газотурбинных двигателей электронно-лучевой обработкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук МАТИ. — М.: Рос. гос. технол. ун-т, 2006. — 23 с.
33. Заявка 2871399 Франция, В23P 6/04, В23P 15/02. Способ восстановления поврежденного пера лопатки авиационного ТРД. — Оpubл. 16.12.2005.
34. Технологические процессы ремонта лопаточного аппарата ГТД с разными видами повреждений / К.А. Ющенко, Л.В. Кравчук, Б.А. Ляшенко и др. // *Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 9-й Международ. науч.-техн. конф.*, 25–29 мая 2009, Ялта. — Киев: АТМ Украины, 2009. — С. 246–248.
35. ДСТУ 2367–94. Єдина система захисту від корозії та старіння. Метали, сплави, покриття жаростійкі. Метод випробувань на високотемпературну корозію та термовтому в потоці продуктів горіння палива.
36. Программное обеспечение «Трёхмерное конечно-элементное моделирование теплового и термонапряженного состояния элементов в машиностроительных конструкциях (SPACE)» // Система сертификации УкрСЕПРО.
37. Кривенюк В.В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 248 с.
38. Цыбанев Г.В., Цыбанев М.В. Модель предельного упрочнения материала как критерия зарождения трещины при многоцикловом нагружении // *Динаміка, міцність і ресурс машин та конструкцій: Тез. доп. міжнарод. наук.-техн. конф.* — Т. 2. — К.: Ін-т проблем міцності НАН України, 2005. — С. 361–362.
39. Цыбанев Г.В., Новиков А.И. Применение модели предельного упрочнения для оценки усталостной долговечности материалов при переменных режимах циклического нагружения // *Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства: Материалы международ. науч.-техн. конф.* — Севастополь: Укр. мор. ин-т, 2008. — С. 149–160.

Tendencies in development of repair technologies in service of gas turbine engines are considered. A procedure is developed for quantitative assessment of the influence of part repair technologies on the set of mechanical characteristics of base material in the repair zone. The effectiveness of the technology is determined by the change of mechanical properties.

Поступила в редакцию 10.09.2009

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ ОБРАЗОВАНИЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ТРЕЩИН ПРИ РЕМОНТЕ БАНДАЖЕЙ ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКОЙ

С. М. КОЗУЛИН, инж., И. И. ЛЫЧКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
М. Г. КОЗУЛИН, канд. техн. наук (Тольят. гос. ун-т, РФ)

Приведены результаты изучения причин появления кристаллизационных трещин в центральных частях слоев многослойного электрошлакового шва. Разработан прием повышения сопротивляемости таких швов образованию кристаллизационных трещин применительно к ремонту разрушившихся бандажей вращающихся цементных печей на месте их эксплуатации.

Ключевые слова: многослойная электрошлаковая сварка, вращающиеся печи, бандажи, углеродистые стали, кристаллизационные трещины, ремонт, зона слабины

Наиболее ответственными деталями вращающихся обжиговых печей являются опорные бандажи сплошного прямоугольного сечения, которые надеваются на корпус печи с определенным радиальным зазором, и бандажи сплошного фигурного сечения, ввариваемые в корпус печи [1]. Бандажи изготавливают из среднеуглеродистых сталей типа 35Л, 30ГСЛ и 34Л-ЭШ. Размеры поперечных сечений свариваемых стыков бандажей составляют $(355...500) \times (900...1350)$ мм, наружный диаметр — до 8450 мм.

Сквозные поперечные трещины, нередко образующиеся в бандажах вращающихся печей при эксплуатации, приводят к вынужденной и длительной остановке всего агрегата для замены его новым бандажом или ремонту вышедшего из строя бандажа [2].

В большинстве случаев заварку трещин выполняют не снимая бандаж с корпуса печи. Для осуществления такого способа ремонта бандаж поворотом корпуса печи устанавливают таким образом, чтобы аварийное место располагалось строго в верхнем положении. Для ремонта сквозных трещин разделку производят путем сверления отверстий диаметром 50 мм с шагом равным $0,8...0,9$ диаметра, а сварку выполняют неплавящимся мунштуком с подачей одной сварочной проволоки диаметром 5 мм [3]. Однако из-за высокой жесткости закрепления кромок при заварке отверстий глубиной более 100 мм в швах образуются кристаллизационные трещины (рис. 1). Кроме того, заварка сквозных трещин усложняется требованиями ограничения остаточных деформаций,

искажающих исходные геометрические размеры бандажа.

Сравнительный анализ эффективности применения существующих способов исправления подобных дефектов сваркой плавлением показал, что наиболее перспективным технологическим процессом для ремонта разрушившихся бандажей непосредственно на месте их эксплуатации (на печи) является многослойная электрошлаковая сварка (МЭШС) [2, 3]. Однако ее применение ограничено рядом фактором, одним из которых является низкая стойкость слоев сварного шва возникновению кристаллизационных трещин, образующихся в центральной части слоев шва.

Для изучения причин появления этих дефектов и разработки технологических приемов повышения сопротивляемости слоев многослойного сварного шва образованию кристаллизационных трещин проведен ряд экспериментов. Исследования выполняли по методике, включающей всестороннее изучение опыта применения МЭШС, анализ полученных результатов, выработку новых приемов сварки и практическую их реализацию при выполнении МЭШС образцов.



Рис. 1. Поперечный макрошлиф образца из стали 35Л размером $500 \times 300 \times 500$ мм с горячими трещинами, образовавшимися после ЭШС отверстий диаметром 50 мм и глубиной 500 мм

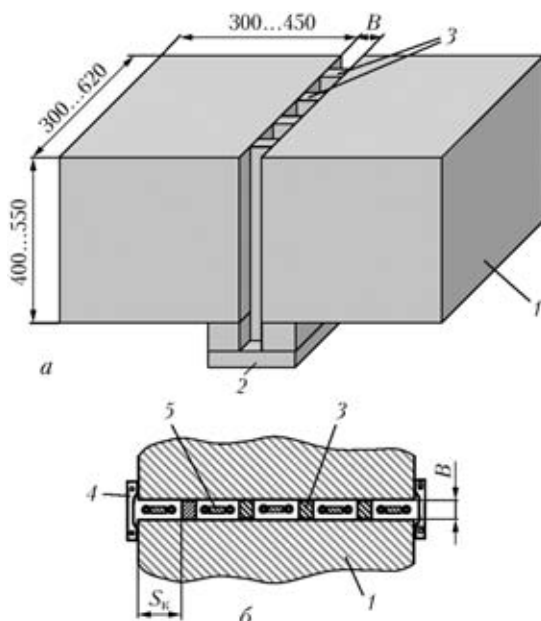


Рис. 2. Схема сборки (а) и МЭШС (б) опытных образцов с продольной установкой плавящихся мундштуков: 1 — свариваемые детали; 2 — входной карман; 3 — формирующие пластины-проставки; 4 — водоохлаждаемая накладка; 5 — плавящийся мундштук; В — ширина сварочного зазора; S_k — толщина металла колодца

Размеры и материал образцов выбирали аналогичными образцам-свидетелям, применяемым при изготовлении бандажей вращающихся печей (рис. 2). Использовали сварочные аппараты типа А-645 и А-1304 с источником питания ТШС-3000-3, электродные проволоки марок Св-08ГА и Св-10Г2 диаметром 3 мм, а также флюс АН-8М. В процессе сварки основные параметры режимов записывали с помощью информационно-регистрирующей системы ИСУ-150 [4]. Сваренные образцы разрезали на темплеты, из которых изготавливали поперечные и продольные макрошлифы, отпечатки снимали по Бауману.

С учетом особенностей электрошлаковой сварки (ЭШС), больших по толщине и габаритам свариваемых изделий применить известные методы количественной оценки сопротивляемости сварного шва образованию кристаллизационных трещин оказалось невозможным [5–7]. Поэтому для получения качественной оценки стойкости металла шва против образования горячих трещин исследовали так называемые жесткие пробы [8]. Согласно этой методике сваривают образцы, близкие по габаритам и своей массе к производственным изделиям (натурные образцы). Для увеличения жесткости в сварочный зазор устанавливали фиксирующие дистанционные прокладки (рис. 2). Критерием оценки стойкости металла швов против образования горячих трещин приняли удельную погонную энергию сварки $E_{св}$, обеспечивающую гарантированное сплавление при минимально необходимой глубине провара без образования горячих трещин.

С целью обеспечения достаточного запаса стойкости металла шва образованию кристаллизационных трещин предварительный подогрев натурных образцов (жестких проб) перед сваркой намеренно не выполняли.

При МЭШС вертикальными швами жесткость закрепления кромок вызвана установкой поперечных металлических перемычек, образующих разделку (рис. 2). Жесткость соединения возрастает по мере наложения слоев (увеличение препятствия свободной усадке кристаллизующегося металла). Поскольку снижение скорости деформации растяжения металла шва за счет уменьшения скорости сварки успехом не увенчалось из-за потери устойчивости электрошлакового процесса [5, 9], пошли по пути изменения условий образования многослойного сварного шва.

Согласно выбранной методике были заварены образцы (рис. 2) из сталей 30Л и 34ЛЭШ. Отверстия, образовавшиеся при установке пластин из металлопроката, заваривали последовательно двухэлектродным плавящимся мундштуком на удельной погонной энергии $E_{св} = 110...170$ кДж/см².

Изучение поперечных макрошлифов сварных соединений выполненных образцов показало, что после заварки отверстий прямоугольной формы линии (зоны) сплавления имеют эллипсовидную форму. Кристаллиты растут от кромок основного металла в направлении центра, где, встречаясь друг с другом, образуют область шва с наименьшей пластичностью (плоскость слабины) [5, 10]. Плоскость слабины располагается вдоль большой оси эллипса, т. е. параллельно свариваемым кромкам. Известно [11], что развитие горячей трещины преимущественно происходит в направлении, перпендикулярном действию наибольшей компоненты деформации (рис. 3, а, 4, а). Учитывая высокую жесткость свариваемых элементов и то, что в высокотемпературной области металла шва в основном развиваются поперечные деформации, при таком расположении зоны слабины создаются наиболее благоприятные условия для образования горячих трещин. Это также подтвердили проведенные эксперименты.

На основании результатов проведенных экспериментов сделано предположение о возможности уменьшения отрицательного влияния зоны наименьшей пластичности на технологическую прочность путем расположения плоскости слабины параллельно вектору максимальных сил растяжения, возникающих при кристаллизации металла шва (рис. 3, б). Для его проверки разделку кромок формировали с помощью пластин-проставок, после установки которых между свариваемыми кромками образовались прямоугольные отверстия. При этом большую сторону отверстия (колодца) располагали не параллельно, а перпендикулярно свариваемым кромкам (рис. 4).

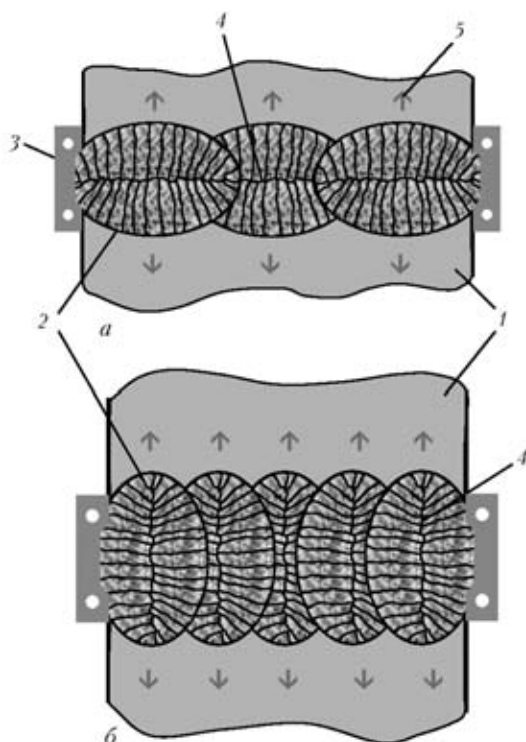


Рис. 3. Схемы расположения зон (плоскостей) слабины в металле слоев многослойного шва при выполнении ЭШС плавящимся мундштуком с установкой плавящихся мундштуков вдоль оси разделки кромок (а) и поперек (б): 1 — свариваемая кромка; 2 — форма слоя сварного шва в поперечном сечении; 3 — формирующая накладка; 4 — зона слабины (плоскость); 5 — вектор усадочных сил

ЭШС отверстий осуществляли плавящимися двухэлектродными мундштуками, установленными поперек сварочного зазора согласно схеме, приведенной на рис. 4, б, на удельной энергии в указанных выше пределах. Результаты исследований макрошлифов и отпечатков по Бауману поперечных и продольных сечений швов, выполненных по предложенной схеме, показали, что горячих трещин в слоях шва не обнаружено.

Таким образом, установлено, что путем изменения направления плоскости слабины отдельных слоев по отношению к вектору растягивающих усилий многослойного шва можно добиться повышения его сопротивляемости образованию кристаллизационных трещин.

При ремонте сквозных трещин в бандажах вращающихся обжиговых печей форму разделки кромок и шаг завариваемых слоев необходимо определять в зависимости от конфигурации и размеров дефектов.

1. ОСТ 22-170-87. Бандажи вращающихся печей. Технические условия. — М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1987. — 27 с.

The paper gives the results of studying the causes for solidification crack initiation in the central parts of the layers of a multilayered electroslag weld. A technique of improvement of the solidification cracking resistance of such welds was developed for the case of repair of damaged bands of rotary kiln furnaces in their operation site.

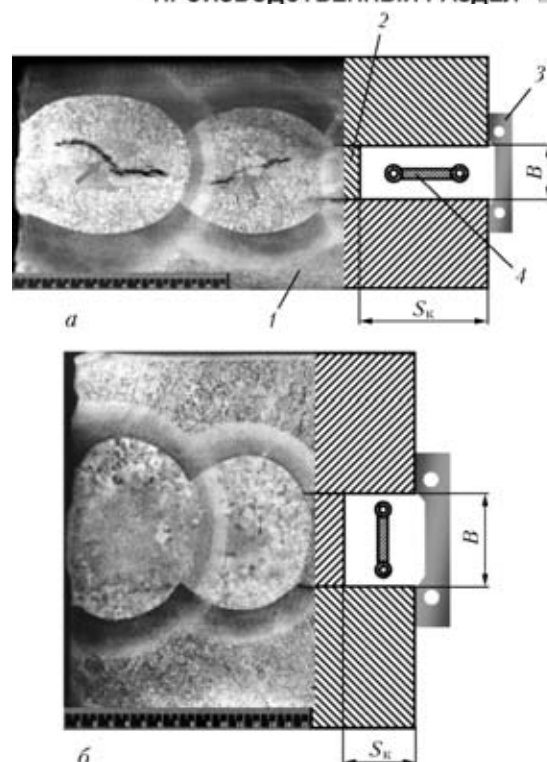


Рис. 4. Поперечные макрошлифы многослойных электрошлаковых швов, выполненных с продольной (а) и поперечной (б) установкой плавящихся мундштуков в зазоре: 1 — свариваемые заготовки; 2 — формирующая пластина-проставка; 3 — формирующее водоохлаждаемое устройство; 4 — плавящийся мундштук

2. Козулин С. М., Лычко И. И., Козулин М. Г. Методы восстановления бандажей вращающихся печей (Обзор) // Автомат. сварка. — 2007. — № 10. — С. 40–47.
3. Козулин М. Г., Фильченков Д. И. Восстановление бандажа вращающейся печи с применением электрошлаковой сварки // Там же. — 1977. — № 3. — С. 64–65.
4. Звездин С. М., Бондаренко О. П., Поповский В. Ю. Информационно-измерительная система для контроля параметров процессов сварки и наплавки // Там же. — 1985. — № 12. — С. 54–56.
5. Электрошлаковая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Машгиз, 1959. — 410 с.
6. А. с. 421910 СССР, МКИ В 23 К 25(00). Способ исследования сварного соединения / В. М. Семенов, А. П. Ерегин, А. С. Гельман и др. — Оpubл. 19.12.74. — Бюл. № 12.
7. А. с. 998062 СССР, МКИ В 23 К 25(00). Способ испытания сварного соединения на стойкость против образования горячих трещин / Б. Ф. Якушин, Л. Ф. Башев. — Оpubл. 23.02.83. Бюл. № 7.
8. Суцук-Слюсаренко И. И., Лычко И. И., Семенов В. М. Основные и сварочные материалы для электрошлаковой сварки. — Киев: Наук. думка, 1981. — 112 с.
9. Суцук-Слюсаренко И. И., Лычко И. И. Техника выполнения электрошлаковой сварки. — Киев: Наук. думка, 1974. — 95 с.
10. Словарь-справочник по сварке / Под ред. К. К. Хренова. — Киев: Наук. думка, 1974. — 195 с.
11. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке: В 2 т. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 695 с.

Поступила в редакцию 21.07.2009



ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ*

О. Г. КАСАТКИН, д-р техн. наук, А. К. ЦАРЮК, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ, кандидаты техн. наук,
А. Р. ГАВРИК, С. И. МОРАВЕЦКИЙ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Проанализированы основные факторы, способствующие коррозионному растрескиванию сварных соединений трубопроводов из разнородных сталей. Предложены сварочные материалы и технология сварки, позволяющие повысить сопротивляемость сварных соединений локальным коррозионным повреждениям.

Ключевые слова: дуговая сварка, трубопроводы, аустенитная и углеродистая стали, разнородные сварные соединения, структура сварных соединений, хрупкие прослойки

В трубопроводах второго контура энергоблоков АЭС коррозионному разрушению в большей степени всего подвержены сварные соединения труб из разнородных сталей (аустенитной и низколегированной) [1]. При ремонте трубопровода обычно не применяют монтажную сварку. На место удаленного дефектного участка вваривают изготовленную на специализированном производстве сварную вставку, которая также имеет ограниченный ресурс работы.

Проведенные ранее исследования показали, что коррозионное растрескивание и разрушение указанных соединений вызывается неоднородностью металла сварных соединений, наличием хрупких и ослабленных прослоек, напряженным состоянием и водородным охрупчиванием металла.

Основными факторами, оказывающими влияние на ресурс сварных соединений разнородных сталей, являются их химическая и структурная неоднородность в местах соединения аустенитных и перлитных сталей из-за смешивания этих металлов в сварочной ванне и диффузии различных элементов, особенно углерода.

В указанных участках сварного соединения возможно образование легированного мартенсита с достаточно высоким содержанием углерода. Он характеризуется высокой твердостью, а также низкой пластичностью.

Остаточные напряжения в однородных и разнородных сварных соединениях после проведения термической обработки существенно отличаются. При охлаждении в процессе отпуска разнородных сварных соединений новые остаточные

напряжения возникают вследствие различного теплового расширения сталей.

Напряжения растяжения возникают в аустенитной части сварного соединения. При сварке стыков труб из разнородных сталей напряжения на внутренней поверхности аустенитной трубы являются растягивающими, а в трубе из перлитной стали — сжимающими. При оценке напряженного состояния соединения необходимо учитывать структурные напряжения. В мартенситных прослойках они могут быть во много раз выше остаточных.

Важным фактором, оказывающим влияние на работоспособность разнородных сварных соединений, является водород. Сочетание трех факторов (диффузионно-подвижного водорода, мартенситных структур и напряженного состояния) может привести к замедленному разрушению сварного соединения [2]. При этом образуются локальные дефекты и микротрещины по границам бывших аустенитных зерен. Развитие процесса замедленного разрушения может привести к быстрому межкристаллическому коррозионному растрескиванию сварного соединения.

Повышения ресурса разнородных сварных соединений можно достичь в результате разработки различных технологических мероприятий, обеспечивающих минимальное проплавление основного металла и предотвращение образования хрупких и обезуглероженных прослоек.

Анализ существующих отечественных и зарубежных высоколегированных сварочных материалов показал, что они не позволяют полностью избежать образования химической и структурной неоднородности в разнородных сварных соединениях, а также формирования мартенситных и обезуглероженных прослоек.

Для предотвращения образования мартенситных прослоек необходимо исключить возможность смешивания при сварке перлитного и аустенитного металлов. С этой целью можно облицовывать кромку перлитной стали технически чис-

* Статья подготовлена по результатам целевой выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).

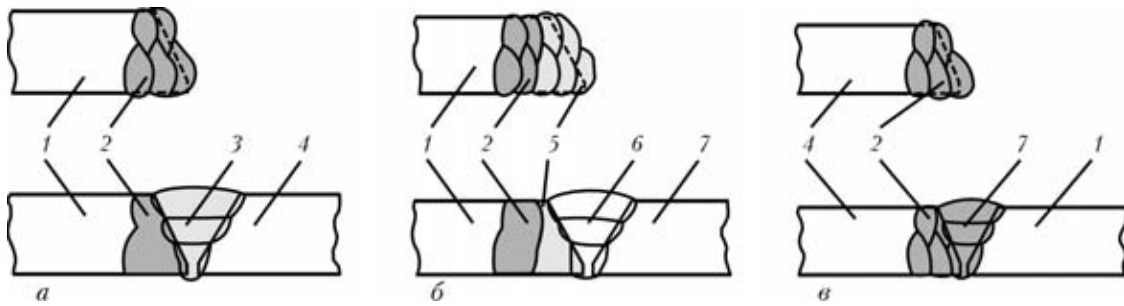


Рис. 1. Схемы первого (а), второго (б) и третьего (в) технологических вариантов сварных соединений разнородных сталей: 1 — основной металл (сталь 20); 2 — наплавка армко-железа; 3 — шов, сваренный с применением присадочного металла Св-10Х16Н25АМ6; 4 — основной металл (сталь 08Х18Н10Т); 5 — наплавка присадочного металла Св-10Х16Н25АМ6; 6 — шов, сваренный с применением присадочного металла Св-04Х19Н11М3; 7 — шов, сваренный с применением армко-железа в качестве присадочного металла

тым железом (армко-железом) с низким содержанием углерода. При наплавке доля основного металла должна быть небольшой. В этом случае удается избежать образования легированного металла с содержанием углерода более 0,05 %. В железе с малым содержанием углерода не образуется твердый мартенсит с высокой плотностью дислокаций.

Универсальным способом уменьшения диффузионного перемещения углерода является введение никеля в металл шва или облицовка кромок этим металлом. Необходимая концентрация никеля в шве должна увеличиваться по мере повышения рабочей температуры сварного соединения.

В работе оценены следующие технологические варианты сварки разнородных сталей с использованием прослойки из технически чистого железа:

предварительная аргонодуговая наплавка двух слоев из армко-железа на кромку стали 20 (рис. 1, а). После механической обработки кромок выпол-

няли сварку с аустенитной сталью с использованием проволоки Св-10Х16Н25АМ6;

аргонодуговая наплавка на кромку стали 20 слоя армко-железа, затем двух слоев с присадкой проволоки Св-10Х16Н25АМ6. После механической обработки кромок производили сварку соединения с присадкой проволоки Св-04Х19Н11М3 (рис. 1, б);

аргонодуговая наплавка на кромку стали 08Х18Н10Т слоя армко-железа. После механической обработки наплавленной кромок выполняли аргонодуговую сварку соединения с присадкой технического железа (рис. 1, в).

Полученные по разным технологическим вариантам сварные соединения сталей 20 и 08Х18Н10Т разрезали на поперечные темплеты для проведения механических и металлографических исследований.

Полученные в результате исследований показатели прочности, угла загиба и ударной вязкости

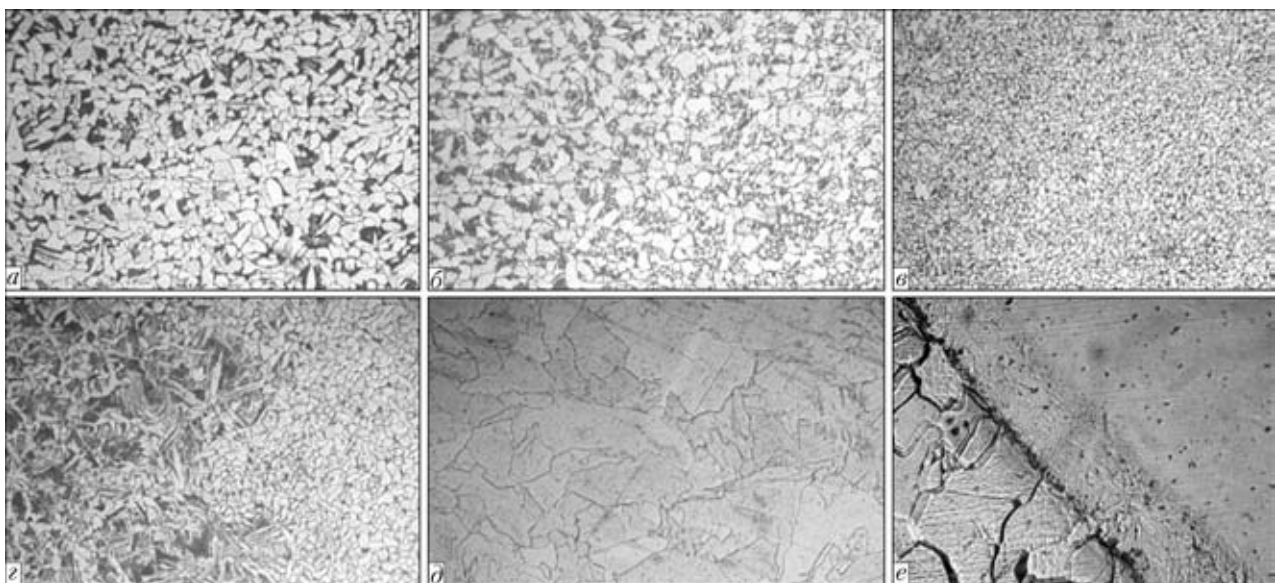


Рис. 2. Микроструктуры (а–д, $\times 200$; е, $\times 1000$) различных зон в металле сварных соединений разнородных сталей: а — сталь 20; б — сталь 20, участок неполной перекристаллизации; в — сталь 20, участок нормализации; з — зона сплавления стали 20 с армко-железом; д — наплавка армко-железа; е — зона сплавления наплавки с аустенитным швом

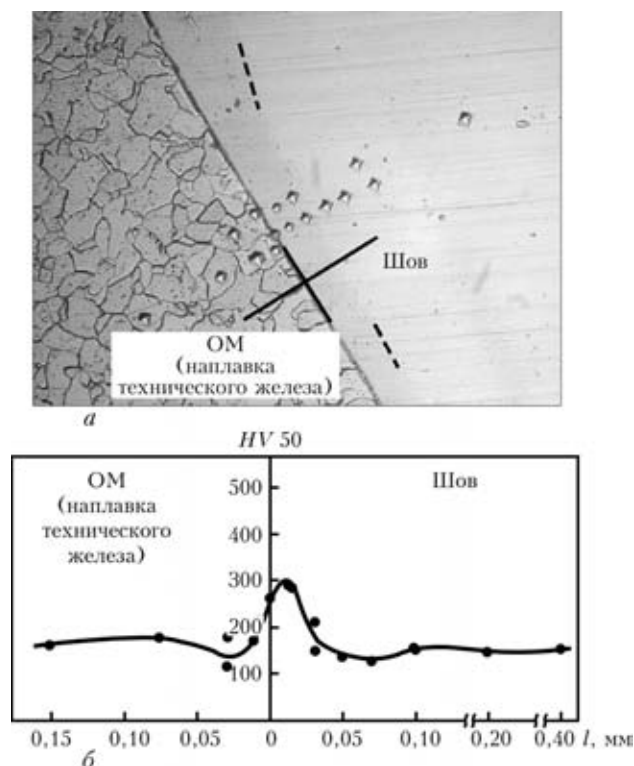


Рис. 3. Микроструктура (а, $\times 250$) и изменение микротвердости (б) на участке сплавления наплавленного на сталь 20 слоя технического железа и металла шва, выполненного проволокой Св-10Х16Н25АМ6

удовлетворяли требованиям, предъявляемым к сварным соединениям сталей 20 и 08Х18Н10Т.

На рис. 2 приведены микроструктуры металла характерных зон сварного соединения разнородных сталей:

участок полной перекристаллизации или нормализации (рис. 2, а), в котором после фазовой перекристаллизации металл приобрел мелкозернистую структуру;

участок перегрева, на котором рядом с наплавкой слоя армко-железа (рис. 2, б) в стали 20 образовалась грубая структура из крупных участков феррита и перлита (видманштеттова структура). Наплавка армко-железа вблизи стали 20 имеет мелкозернистую структуру, а из-за перемешивания с основным металлом в ней присутствовали отдельные перлитные участки;

металл наплавки технического железа (рис. 2, в) имеет чисто ферритную структуру с относительно крупным зерном;

участок сплавления слоя армко-железа с аустенитным металлом шва (рис. 2, г), на котором видны крупные зерна феррита и слой неперемешавшегося с металлом шва расплава армко-железа.

В зависимости от условий перемешивания металла в сварочной ванне переход от армко-железа может быть резким или иметь слой с мелкодисперсной структурой. Это металл, который сформировался в результате неполного расплавления

фрагментов зерен технического железа и отсутствия перемешивания такого расплавленного металла с аустенитным металлом шва (или наплавки).

По-видимому, в этом случае на формирование таких прослоек оказывает влияние более высокая температура плавления технического железа (около 1530 °С по сравнению примерно с 1380 °С у аустенитного металла) и узкий интервал температур кристаллизации, способствующий его быстрому затвердеванию при колебаниях температуры в процессе сварки, а также затруднению перемешивания с аустенитным расплавом.

Металл соединения на участке перехода от слоя технического железа к слою наплавленного металла типа Св-10Х16Н25АМ6 имеет аналогичную микроструктуру (рис. 3).

Из результатов измерений видно, что в аустенитном металле шва или наплавки на участке переменного состава у основы (технического железа) из-за различного долевого участия расплавленного нелегированного и наплавляемого высоколегированного металлов образуются микроучастки с повышенной твердостью, значительно более низкой, чем у мартенсита. Из-за неоднородного перемешивания расплавов железа и аустенитного металла, кроме участков с повышенной твердостью, формируются микроучастки с твердостью аустенита.

Полученные результаты показали следующее: при наплавке переходного нелегированного безуглеродистого слоя железа и последующей сварки аустенитным швом обнаружены миграция углерода и образование карбидных прослоек, характерных для зоны сплавления стали 20 с аустенитным металлом шва;

миграция углерода и формирование обезуглероженной прослойки в стали 20 не происходит на участке ее сплавления с подслоем из технического железа;

на участках сплавления технического железо-аустенитный металл наплавленного шва из-за долевого легирования расплава железа легирующими элементами и углеродом из аустенитной проволоки формируются микроучастки с переменной твердостью.

Исследования технологического варианта с наплавкой на кромку стали 08Х18Н10Т слоя армко-железа и последующей аргодуговой сваркой соединения с присадкой армко-железа показали, что на участке сплавления первого слоя наплавки армко-железа на аустенитную сталь не образовывались зоны с высокой твердостью металла, характерные для закалочных структур. На этом участке сварного соединения не обнаружено перераспределения углерода и образования карбидных прослоек.

Результаты исследований плоских образцов показали, что граница сплавления аустенитной и низ-

коуглеродистой сталей является более однородной, если производить наплавку низкоуглеродистой стали на аустенитную и заполнять шов ферритным металлом. Однако заполнение шва низкоуглеродистым легированным металлом приводит к снижению прочности сварного соединения.

В дальнейшем для заполнения шва в качестве присадочного материала использовали армко-железо, легированное небольшим количеством упрочняющих элементов. В целом показатели механических свойств разнородных сварных соединений, выполненных по предлагаемой технологии, полностью соответствуют требованиям, регламентируемым ПНАЭ Г-7-010–89 для оборудования АЭС.

Выводы

1. В ходе предварительных коррозионных испытаний сварных соединений разнородных сталей 20 и 08X18H10T установлено, что их сварные соединения в нейтральной среде хлористого натрия (рН 6,5...7,0) представляют собой сложный много-

электродный элемент с разностью потенциалов между основными металлами в сварном соединении до 0,5 В, что обуславливает интенсивное разрушение металла в зоне сплавления.

2. В процессе испытаний сварных соединений при нагружении до $0,90\sigma_T$ в кипящем растворе смеси азотнокислого кальция и нитрита аммония в образцах, сваренных как по штатной технологии, так и при наплавке технического железа на кромки стали 08X18H10T, имеет место коррозионное растрескивание. В аналогичных условиях испытаний образцов с наплавкой кромок углеродистой стали армко-железом коррозионное растрескивание не зафиксировано.

3. Разработанную технологию сварки трубопроводов второго контура из разнородных сталей предполагается аттестовать на Хмельницкой АЭС.

1. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей // Сварка и свариваемые материалы. — М.: Металлургия, 1991. — Т. 1. — С. 422–442.
2. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.

The main factors promoting corrosion cracking of welded joints of pipelines from dissimilar steels are analyzed. Welding consumables and technologies allowing improvement of welded joint resistance to local corrosion damages are proposed.

Поступила в редакцию 10.09.2009

УДК 621.791.763.1

ВЛИЯНИЕ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА ШВА НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, В. М. КИСЛИЦЫН, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментов по качественной оценке влияния термомеханической обработки на прочность сварного точечного соединения. Показана целесообразность использования ударного приложения усилия сжатия при температуре вблизи точки рекристаллизации свариваемого металла.

Ключевые слова: точечная контактная сварка, сварное соединение, термомеханическая обработка, ударное приложение усилия сжатия, измельчение кристаллической структуры, механическая прочность

Как известно, наиболее распространенной причиной снижения прочности сварного соединения является возникновение в зоне сварного шва напряжений растяжения, вызываемых усадкой металла в процессе охлаждения.

Для снижения уровня остаточных механических напряжений используют термическую, термомеханическую [1, 2] и ударно-механическую виды обработки зоны сварного шва, которую про-

водят после завершения операции сварки. Например, выполнение упрочнения способом «высокочастотной механической проковки» [3, 4], «проковкой пневмомолотом» [5] или «дробеструйной обработкой» [6] позволяет увеличить в несколько раз циклическую долговечность сварной конструкции за счет перераспределения в зоне шва остаточных механических напряжений. Указанные способы упрочнения характеризуются многократным ударным приложением усилия сжатия, осуществляемым со скоростью около сотни метров в секунду.

Термин «проковка» характеризует процесс сварки со значительно меньшей скоростью приложения усилия сжатия (не более десятка метров



в секунду) и однократностью воздействия, что вызвано инерционностью узла пневмопривода перемещения электрода как на этапе сварки, так и на этапе проковки.

В связи с этим возникла необходимость отказать от термина из области контактной сварки «проковка» и использовать термин из смежной области техники — «ударная обработка металла» [3–6], который характеризует высокоскоростную и многократную обработку металла непосредственно в процессе сварки на этапе охлаждения сварной точки.

К недостаткам термической обработки сварных соединений относится необходимость длительного (в течение нескольких часов) нагрева по определенному циклу или всего сварного изделия в печах, или не менее длительного локального нагрева зоны сварного шва.

Однако в некоторых случаях оказалось возможным заменить дорогостоящую и энергоемкую термообработку всего изделия дополнительным оплавлением сварных швов с помощью дугового нагрева в аргоне. Эта технология разработана в ИЭС им. Е. О. Патона. Результаты проведенных исследований показали, что аргонодуговое оплавление сварных швов позволяет восстановить ударную вязкость металла сварного шва, повысить предел выносливости сварного соединения, что, как объясняют авторы работы [7], связано со структурными изменениями металла сварного шва.

Снижение уровня остаточных напряжений растяжения в сварных соединениях можно достичь также за счет использования специальных присадочных материалов, характеризующихся низкой температурой межфазных переходов в металле сварного шва [8].

Формирование напряжений сжатия в сварных соединениях происходит непосредственно в процессе сварки, например, при точечной контактной сварке с циклом проковки, предусматривающей воздействие дополнительного и более высокого усилия сжатия металла на этапе охлаждения обрабатываемой сварной точки. Данный вариант обработки нашел применение при сварке металлов, склонных к образованию трещин и пор, в целях снижения остаточных напряжений и повышения усталостной прочности сварных соединений [9, 10]. Однако этот вариант обработки характеризуется незначительным уровнем создаваемых в металле сварной точки напряжений сжатия из-за невысокой скорости приложения усилия проковки, инерционности механизма сжатия; к тому же он исключает возможность варьирования моментом приложения импульса проковки относительно температуры нагрева металла сварной точки.

К ударно-механическим видам обработки сварных соединений относятся проковка пневматическим виброинструментом, дробеструйная и ультразву-

ковая. В технической литературе имеется информация об увеличении циклической долговечности сварных соединений в несколько раз после проведения операции проковки металла пневмомолотом или обработки его дробью. Ультразвуковая обработка также позволяет достичь увеличения механической прочности, например, при обработке сварных соединений стали 20ХГСА и некоторых сплавов алюминия [11, 12].

Из-за технологических недостатков, свойственных указанным способам обработки, в настоящее время широкое распространение получила высокочастотная механическая проковка. Проведенные исследования [3, 4] показали, что использование такого вида обработки даже без предварительного нагрева металла позволяет достичь более благоприятного перераспределения остаточных напряжений в поверхностных слоях металла и сформировать достаточно высокий уровень напряжений сжатия, особенно в зоне перехода металла шва к основному металлу.

Исходя из приведенного выше можно предположить, что совместное воздействие термической обработки и механической проковки может оказаться эффективным средством повышения как механической прочности, так и предела выносливости сварных соединений. Воздействие ударной обработки при повышенной температуре, несомненно, должно увеличить глубину поверхностного слоя металла, подвергаемого пластической деформации, а следовательно, и размеры зоны перераспределения остаточных (после сварки) механических напряжений.

Таким образом, возникают следующие вопросы, требующие экспериментальной проверки возможности повышения механической прочности сварного соединения, а именно, определение оптимального диапазона температуры, при которой целесообразно ударное воздействие усилия сжатия, оптимального соотношения энергии термического и механического воздействия, оптимальной скорости приложения усилия сжатия.

Решение этих вопросов представляет теоретический и практический интерес не только для совершенствования способов сварки металлов и соединения новых конструкционных материалов, но и при проведении ремонтно-профилактических работ сварных конструкций. При этом необходимо оценить также эффективность применения для этой цели различных видов нагрева — электроконтактного, дугового, газопламенного.

В настоящей работе предпринята попытка с качественной стороны оценить перспективы ударной обработки металла сварного шва при контактной сварке тонколистовой стали.

С целью технологической проверки ожидаемого положительного влияния ударного приложения усилия сжатия на механическую прочность за счет измельчения кристаллической структуры

металла сварной точки нами проведены исследования по следующей методике. В качестве образцов использовали пластины из стали Ст3 размером 100×30×1 мм. Выбор стали Ст3 толщиной 1 мм был обоснован повсеместно принятой в настоящее время практикой применения (ради удешевления продукции за счет снижения срока службы изделия с десятков лет до десятка месяцев) низколегированной тонколистовой стали с ненормируемым содержанием примесей для массово выпускаемой продукции (например, изделий для автомобилестроения, электротехнической аппаратуры, бытовой техники).

В состав лабораторной установки точечной контактной сварки для проведения данного эксперимента входили блок регулирования количества импульсов сварочного тока (от 1 до 8 полупериодов) и блок установки момента выдачи импульса напряжения на соленоид узла ударного приложения усилия сжатия, регулируемого в пределах от 1 до 12 полупериодов.

Образцы после механической и химической очистки от загрязнений подвергали контактной сварке на двух режимах: с применением устройства для создания ударного приложения усилия сжатия и без термомеханической обработки. Для сравнительной оценки прочности сварных соединений, полученных на указанных выше режимах, сваренные пластины разрезали на полоски с шагом 5 мм, которые попарно соединяли между собой точечной контактной сваркой, как показано на рис. 1.

Таким образом, при проведении испытаний на разрыв одновременно подвергались разрывной нагрузке три сварные точки, полученные на одном режиме источника питания, но отличающиеся воздействием или отсутствием ударного приложения усилия сжатия при температуре вблизи точки рекристаллизации металла.

При этом для оценки влияния проковки на прочность сварного соединения вместо измерения разрушающего усилия оказалось достаточным зафиксировать разрушение одной из сварных точек, имеющей минимальную прочность, т. е. наиболее слабое звено в соединениях четырех полосок, сваренных в трех точках.

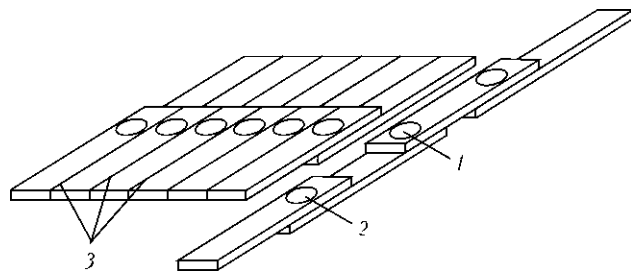


Рис. 1. Схема подготовки образцов к испытаниям на разрыв: 1, 2 — сварные точки соответственно с проковкой и без нее; 3 — линии разреза

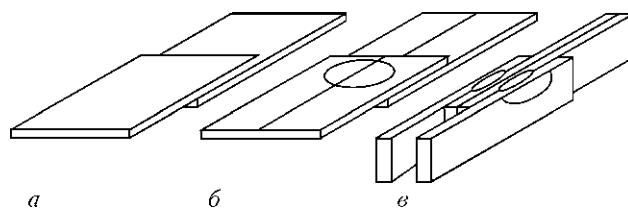


Рис. 2. Схема подготовки сварных образцов к изготовлению микрошлифов: а — перед сваркой; б — после сварки с линией разреза вдоль сварной точки; в — для изготовления микрошлифа

Такая подготовка образцов сварных соединений позволяет исключить ряд негативных факторов: возможное влияние на прочность металла флуктуаций его исходных свойств; различия в толщине и химическом составе оксидных пленок на соединяемых поверхностях; случайные отклонения режима сварки и температуры, при которой осуществляется ударное приложение усилия сжатия.

Предложенная сравнительная оценка прочности сварных соединений может рассматриваться как методика качественной оценки эффективности воздействия режимов нагрева и последующего термомеханического воздействия. Несмотря на ограниченный объем информации о прочности соединения, получаемой при использовании предложенной методики испытаний, ее преимуществом является возможность оценки результатов конкретной технологической пробы за минимальное время, что особенно ценно при наладочных работах.

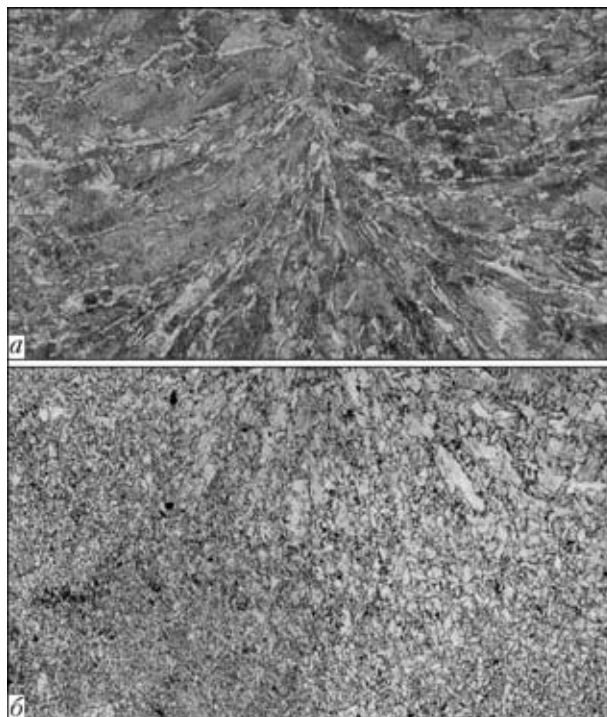


Рис. 3. Микроструктуры (×100) металла сварной точки до термомеханического воздействия (а) и металла зеркальной половины этой же сварной точки после термомеханического воздействия (б)



Результаты проведенных испытаний образцов на разрыв показали, что более 97 % сварных соединений разрушаются по сварным точкам, не подвергнутым ударному приложению усилия сжатия.

Для оценки влияния ударной проковки на изменение структуры металла сварной точки точечной сваркой изготовлены образцы (рис. 2, а), которые разрезали вдоль полосок и через сварную точку (рис. 2, б). Одну из половинок сварной точки повторно нагревали до температуры $(600 + 50)^\circ\text{C}$ (вблизи точки рекристаллизации стали) и подвергали ударному усилию сжатия, начиная с момента фиксации заданной температуры термомпарой. Затем две половинки сварной точки были соединены для изготовления микрошлифа, как показано на рис. 2, в.

Поскольку время охлаждения металла сварной точки выбранных нами образцов составляет около 0,5 с, сварная точка может быть подвергнута одному или нескольким десяткам ударов даже при частоте следования импульсов 50 Гц.

Как видно из рис. 3, микроструктуры зеркальных половинок одной сварной точки существенно отличаются как размером кристаллитов, так и однородностью структуры металла вблизи сварочной точки. На микроструктурах соединений, подвергнутых проковке, видно существенное измельчение наиболее крупных кристаллитов, выросших в центральной зоне сварной точки.

Кроме того, в металле сварной точки наблюдается снижение содержания инородных включений и пористости, т. е. уменьшается различие между структурой металла сварной точки, околошовной зоны и основного металла.

Таким образом, проведенные технологические исследования влияния ударной термомеханической обработки, осуществляемой непосредственно во время сварки, показали возможность существенного повышения механической прочности сварных соединений.

Исходя из существующей взаимосвязи между параметрами кристаллической решетки металла и его эксплуатационными свойствами, можно предположить, что ударная обработка сварного шва при температуре вблизи точки рекристаллизации позволит повысить предел выносливости сварных соединений.

1. *Основы материаловедения: Учеб. для вузов* / Под ред. И. И. Сидорина. — М.: Машиностроение, 1976. — 436 с.
2. *Гуляев А. П. Металловедение*. — М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1951. — 484 с.
3. *Кныш В. В., Соловей С. А., Кузьменко А. З.* Накопление усталостных повреждений в тавровых сварных соединениях стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной проковкой состояниях // *Автомат. сварка*. — 2008. — № 10. — С. 12–18.
4. *Кныш В. В., Кузьменко А. З., Соловей С. А.* Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами // Там же. — 2009. — № 1. — С. 38–43.
5. *Branko C., Infante V., Bartista R.* Fatigue behavior of the weld joints with cracks repaired by hammer peening // *Fatigue & Fract. of Eng. Materials and Struct.* — 2004. — 27. — P. 785–798.
6. *Improving the fatigue crack resistance of wespallloy by shot peening* / A. Turnbull, E. R. Los Rios, R. Tait et al. // *Ibid.* — 1998. — 21. — P. 1513–1524.
7. *Аснис А. Е.* Аргонодуговая обработка — резерв повышения прочности сварных соединений // Аргонодуговая обработка сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 5–9.
8. *Мазель Ю. А.* Мартенситная сварочная проволока на основе 10 % Cr и 10 % Ni с низкой температурой $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода // *Welding Intern.* — 2003. — 17(5). — P. 386–389.
9. *Моравский В. Э., Ворона Д. С.* Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. — Киев: Наук. думка, 1985. — 272 с.
10. *Моравский В. Э.* Сварка аккумулятивной энергией. — Киев: Гостехиздат, 1963. — 298 с.
11. *Снижение остаточных сварочных напряжений ультразвуковой обработкой* / И. Г. Полоцкий, А. Я. Недосека, Г. И. Прокопенко и др. // *Автомат. сварка*. — 1974. — № 4. — С. 74–75.
12. *Холопов Ю. В.* Обработка сварных соединений металлов ультразвуком с целью снятия остаточных напряжений // *Свароч. пр-во*. — 1973. — № 12. — С. 20–21.

The paper gives the results of experiments on qualitative assessment of the influence of thermomechanical treatment on the strength of spot welded joint. Rationality of shock application of the compressive force at the temperature close to the recrystallization point of the metal being welded is shown.

Поступила в редакцию 16.07.2009



УДК 621.791.75.01

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАПАЗДЫВАНИЙ В АСУ ФОРМИРОВАНИЕМ СВАРНОГО ШВА

В. В. ДОЛИНЕНКО, канд. техн. наук, **В. А. КОЛЯДА**, **Т. Г. СКУБА**, инженеры, **Е. В. ШАПОВАЛОВ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена методика определения транспортных запаздываний в контуре обратной связи автоматической системы управления процессом формирования усиления шва при сварке МАГ. Исследован механизм возникновения двух различных транспортных запаздываний — формирования высоты и ширины усиления шва, которые обнаруживаются при измерениях их геометрических параметров с помощью лазерно-телевизионного сенсора. Для получения оценок транспортных запаздываний предложено использовать регрессионные формулы, составленные на основе результатов вычислительных экспериментов. В качестве объекта вычислительных экспериментов использована математическая модель сварочной ванны, полученная для условий нагрева изделия подвижным нормально-круговым источником тепла.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварные соединения, форма шва, АСУ, транспортное запаздывание, лазерно-телевизионный сенсор

Задача замкнутого управления формированием сварного шва при дуговой сварке давно привлекает внимание специалистов в области автоматизации сварочных процессов. Одной из основных проблем при решении данной задачи является реализация обратной связи по параметрам, определяющим форму сварного шва. В работе [1] для замкнутого управления процессом формирования сварного шва предлагается использовать наблюдение за сварочной ванной с помощью специального сенсора, функционирование которого основано на методе двухцветной пирометрии. Такой подход позволяет получать только косвенные оценки параметров сварного шва, которые могут существенно отличаться от действительных значений. Большой интерес представляет способ, предложенный в работе [2], где для реализации обратной связи предложено использовать непосредственное измерение геометрических параметров усиления сварного шва с помощью лазерно-телевизионного сенсора (ЛТС). К недостаткам известных схем замкнутого управления формированием сварного шва можно отнести то, что не учитывается наличие нескольких транспортных запаздываний между ЛТС и участками сварочной ванны. Поэтому при изменении параметров режима сварки устойчивость управления может ухудшаться.

В данной работе предлагается методика оценки транспортных запаздываний для систем автоматической системы управления (АСУ) сваркой МАГ, обратная связь в которых обеспечивается с помощью ЛТС [3].

Из теории сварочных процессов известно, что ширина и высота валика соответствует фронту затвердевания ванны в ее средней и хвостовой части [4]. На рис. 1 представлена схема образования двух транспортных запаздываний в АСУ при использовании ЛТС (отдельно для измерений высоты g и ширины e усиления шва). Штриховой линией обозначен контур воображаемой сварочной ванны в момент времени, когда проекция оси электрода находилась в точке O . Форма сварочной ванны соответствует направлению сварки слева направо. Точкой A обозначена крайняя точка фронта затвердевания хвостовой части сварочной ванны. Ее координата по оси абсцисс определяет начало формирования высоты усиления шва. Точками B и B' обозначены точки фронта затвердевания сварочной ванны в средней части. Их координаты по оси абсцисс определяют начало формирования ширины усиления шва. Расстояние между электродом (осью сварочной горелки) и световым следом ЛТС L_{TV} определяет базовую величину транспортного запаздывания при измерении параметров валика. Расстояние между точкой A (B) и точкой O вдоль оси абсцисс составляет L_g (L_e). Таким образом, величины отрезков тран-

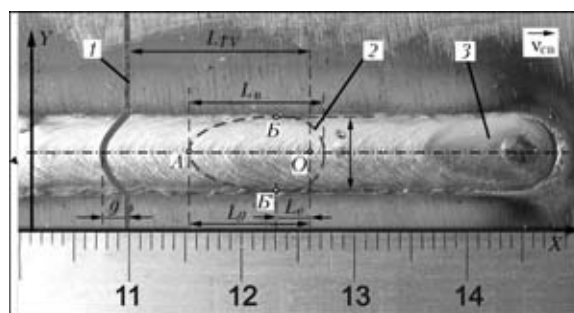


Рис. 1. Схема возникновения транспортных запаздываний между сварочной ванной и ЛТС при сварке МАГ: 1 — световой след ЛТС; 2 — воображаемый контур сварочной ванны; 3 — поверхность затвердевшей сварочной ванны



спортных запаздываний наблюдения ширины ΔL_e и высоты ΔL_g валика шва рассчитываются следующим образом: $\Delta L_e = (L_{TV} - L_e)$, $\Delta L_g = (L_{TV} - L_g)$. Отсюда формулы расчета временных параметров транспортных запаздываний записываются в следующем виде:

$$\tau_g = \frac{L_{TV} - L_g}{v_{CB}}, \quad \tau_e = \frac{L_{TV} - L_e}{v_{CB}}, \quad (1)$$

где τ_e , τ_g — временные параметры транспортных запаздываний измерений соответственно ширины и высоты валика, с; v_{CB} — скорость сварки, см/с.

Из рисунка видно, что для определения значения транспортных запаздываний между сварочной ванной и световым следом ЛТС необходимо знать координаты точек A , B и B' относительно текущей координаты проекции оси электрода O . Однако для симметричной формы валика абсциссы точек B и B' равны, поэтому расчет требуется выполнить только для точек A и B .

Для решения данной задачи синтезирована математическая модель, позволяющая рассчитывать геометрические параметры сварочной ванны на основе теплопереноса в свариваемых изделиях. Уравнение, описывающее процесс распространения тепла в полубесконечном теле при нагреве его подвижным нормально-круговым источником [5], имеет вид

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{c\gamma(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{v_{CB}x}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{\sqrt{t''}(t_0 + t'')} \times \exp\left[-\frac{z^2}{4at''} - \frac{r^2}{4a(t_0 + t'')} - \frac{v_{CB}^2}{2a}(t_0 + t'')\right], \quad (2)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$, см²; x, y, z — координаты текущей расчетной точки температурного поля, см; $a = \lambda/c\gamma$ — коэффициент температуропроводности, Дж/м²; $c\gamma$ — объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); $q = 0,24\eta U_d I_{CB}$ — эффективная тепловая мощность, Дж/м; U_d , I_{CB} — средние значения напряжения и тока сварки; $t_0 = 1/(4ak_t)$ — длительность распространения фиктивного источника, с; k_t — коэффициент тепловой сосредоточенности дуги, см⁻²; t — промежуток времени действия непрерывного подвижного источника тепла, с; $t'' = t - t'$, с; t' — вспомогательный момент времени, в который источником было введено тепло на начальном участке его движения, с.

Численное решение выполняли с шагом дискретизации 0,01 см. К недостаткам такого решения можно отнести то, что не учитываются процессы массопереноса в сварочную ванну.

Для уточнения значений основных энергетических параметров тепловой модели были прове-

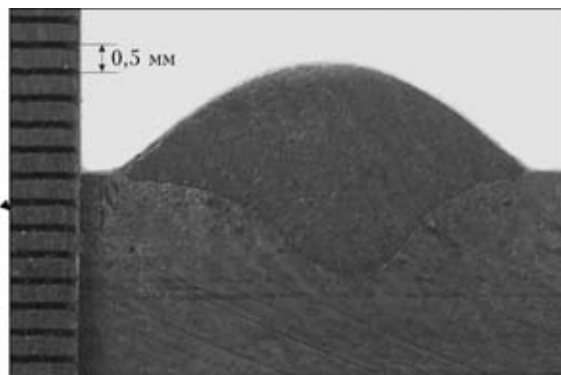


Рис. 2. Макрошлиф сварного шва ($U_d = 19$ В, $I_{CB} = 160$ А, $v_{CB} = 0,75$ см/с)

дены сварочные эксперименты. Сварку проводили на обратной полярности в защитном газе (85 % Ar + 15 % CO₂) в нижнем положении. Сваривали пластины углеродистой стали толщиной 0,8 см (сварка без зазора) электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 0,12 см. Номинальные параметры режима сварки: $I_{CB} = 160$ А, $U_d = 19$ В, $v_{CB} = 7,5$ см/с. На рис. 2 показан макрошлиф валика шва, который использовали для проверки адекватности тепловой модели. По результатам сварочных экспериментов уточнены значения параметров тепловой модели: эффективного КПД сварки $\eta = 0,75$ и коэффициента сосредоточенности теплового воздействия дуги $k_t = 8,3$ см⁻². Другие параметры тепловой модели имеют следующие значения: $a = 0,0718$ Дж/м², $c\gamma = 0,975$ Дж/(м³·К).

Вычислительный эксперимент выполнен в соответствии с полным факторным планом экспериментов второго порядка [6]. Рассмотрены следующие переменные: $U_{CB} = 17...21$ В, $I_{CB} = 145...175$ А и $v_{CB} = 0,5...1,0$ см/с. Выполнен расчет таких параметров сварочной ванны, как

Матрица вычислительного эксперимента и результаты расчета

№ п/п	x_1	x_2	x_3	U_d , В	I_{CB} , А	v_{CB} , см/с	L_g , см	L_e , см
1	0	0	0	19,0	160	0,75	1,08	0,59
2	-1	-1	-1	17,8	151	0,60	0,95	0,48
3	-1	-1	1	17,8	151	0,90	1,04	0,57
4	-1	1	-1	17,8	169	0,60	1,02	0,47
5	-1	1	1	17,8	169	0,90	1,11	0,68
6	1	-1	-1	20,2	151	0,60	1,04	0,51
7	1	-1	1	20,2	151	0,90	1,13	0,59
8	1	1	-1	20,2	169	0,60	1,13	0,48
9	1	1	1	20,2	169	0,90	1,22	0,68
10	-1,68	0	0	17,0	160	0,75	0,99	0,59
11	0	-1,68	0	19,0	145	0,75	1,01	0,60
12	0	0	-1,68	19,0	160	0,50	0,99	0,50
13	1,68	0	0	21,0	160	0,75	1,16	0,51
14	0	1,68	0	19,0	175	0,75	1,16	0,63
15	0	0	1,68	19,0	160	1,00	1,14	0,65



ширина e сварочной ванны, глубина максимального проплавления h , длина сварочной ванны L_B , расстояния L_e и L_g . Получены следующие диапазоны варьирования параметров: $h = 0,15...0,25$ см, $e = 0,7...0,91$ см, $L_B = 0,98...1,22$ см, что соответствует сварочному эксперименту. Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице. Нормализованные факторы x_1 , x_2 и x_3 соответствуют факторным переменным U_d , $I_{св}$ и $v_{св}$.

Получены следующие регрессионные формулы:

$$L_g = -0,69 + 0,041U_d + 0,0048I_{св} + 0,3v_{св} \text{ (см)}, \quad (3)$$

$$L_e = 0,08 + 0,004U_d + 0,0016I_{св} + 0,4v_{св} \text{ (см)}. \quad (4)$$

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации для регрессионной модели (3), (4) не превышает 5 %.

В соответствии с предложенной методикой на основании априорной информации о величине L_{TV} и диапазонах изменений сварочных переменных $I_{св}$, U_d и $v_{св}$ рассчитывают диапазоны изменений расстояний L_e и L_g , а затем по формуле (1) вычисляют минимальные и максимальные оценки транспортных запаздываний τ_e и τ_g .

Рассмотрим в качестве примера практический случай с $L_{TV} = 7,5$ см. Сравним максимальные изменения транспортных запаздываний для постоянной и изменяющейся скорости сварки при варьировании режима сварки в диапазоне: $U_d = 17...21$ В и $I_{св} = 145...175$ А. В первом случае для $v_{св} = 0,75$ см/с расчет дает диапазон изменений

$\tau_e = 9,0...9,1$ с (относительное изменение составляет 1 %) и $\tau_g = 8,4...8,8$ с (5 %). Во втором случае для диапазона варьирования $v_{св} = 0,5...1,0$ см/с изменения транспортных запаздываний следующие: $\tau_e = 6,7...13,8$ с (относительное изменение 78 %) и $\tau_g = 6,2...13,3$ с (83 %). Таким образом, во втором случае модель объекта управления представляет собой нестационарную динамическую систему, для которой потребуются более сложные алгоритмы управления.

Предложенная методика расчета транспортных запаздываний в АСУ формированием усиления шва с обратной связью позволяет корректно выбрать временные параметры и тип автоматического регулятора.

1. Zhang H., Pan J., Lao B. The real-time measurement of welding temperature field and closed-loop control of isotherm width // Sci. in China Press. — 1999. — 21, N 2, Apr. — P. 129–135.
2. Doumanidis C., Kwak Y.-M. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning // Intern. J. of Pressure Vessels and Piping. — 2002. — 79. — P. 251–262.
3. Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А. Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 60–62.
4. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
5. Рыкалин Н. Н., Углов А. А. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
6. Джонсон И., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента / Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. — 520 с.

Method is suggested for determination of transportation lags in feedback circuit of the automatic system for control of the weld reinforcement formation process in MAG welding. The mechanism of emergence of two different transportation lags, i.e. formation of height and width of the bead, which are revealed by measurements of geometric parameters of the weld bead using the laser-TV sensor, has been investigated. To estimate the transportation lags, it is suggested to use the regression formulae derived on the basis of computational experimental results. A mathematical model of the weld pool developed for conditions of heating a workpiece with the movable normal heat source has been used as an object of the computational experiments.

Поступила в редакцию 14.07.2009

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
А. В. Яровицын (ИЭС им. Е. О. Патона) защитил 10 декабря 2009 г. кандидатскую диссертацию на тему «Микроплазменная порошковая наплавка жаропрочных никелевых сплавов с содержанием γ' -фазы 45...65 %».

Диссертация посвящена исследованию энергетических, тепловых и технологических особенностей микроплазменной порошковой наплавки с целью разработки промышленной технологии

для ремонта лопаток жаропрочных никелевых сплавов.

Обоснованы требования к сварочному источнику тепла для микроплазменной порошковой наплавки. Показано, что сочетание низких удельных тепловложений 100...650 Вт, низкой плотности тепловой энергии в эквивалентном пятне нагрева 150...1500 Вт/см² и малых скоростей перемещения микроплазменной дуги обеспечивает медленное охлаждение основного металла в температурных интервалах хрупкости со скоростями до 3...10 °С/с. В этом случае темп нарастания деформаций не превышает критических значений,



и возникновение горячих трещин в наиболее опасной зоне основного металла маловероятно. Исследована стабильность горения микроплазменной дуги при силе тока 2...35 А с порционным вводом в столб дуги порошка в зависимости от степени сжатия дуги соплами плазмотрона. Установлено, что дестабилизация горения микроплазменной дуги на токах менее 22...25 А обусловлена воздействием на дугу дозирующими импульсами транспортирующего газа, движущимися в проточной газопорошковой системе со скоростью до 60 м/с. Для условий стабильного горения микроплазменной дуги экспериментально установлено соотношение скорости перемещения дозирующего импульса транспортирующего газа 5...15 м/с и удельного расхода вводимого плазмообразующего газа 2...4 м/с.

На основании экспериментальных данных калориметрирования установлено, что на токах 5...35 А эффективными способами управления плотностью тепловой энергии в пятне нагрева микроплазменной дуги являются: эффективная тепловая мощность дуги 100...600 Вт; сжатие дуги за счет изменения диаметров каналов сопел плазмотрона и вида защитного газа (Аг или смесь 90 % Аг + 10 % Н₂); сосредоточенный ввод порошка. При микроплазменной порошковой наплавке плотность тепловой энергии в эквивалентном пятне нагрева составляет 100...250 Вт/см², что в 3...8 раз меньше по сравнению с дугой для малоамперного TIG-процесса. Такие тепловые характеристики микроплазменной дуги обеспечивают более плавное охлаждение металла и в сочетании со скоростями ее перемещения около 1 м/ч эффективно ограничивают темп нарастания деформаций.

Установлено, что при микроплазменной порошковой наплавке жаропрочных никелевых сплавов содержание кислорода в наплавленном металле изменяется в пределах 0,0068...0,022 %, содержание азота — 0,0026...0,008 %. Экспериментально доказана необходимость и эффективность ограничения содержания кислорода в наплавленном металле жаропрочных никелевых сплавов до 0,006...0,009 % за счет обеспечения следующих параметров процесса: расстояние от плазмотрона до изделия в пределах 2,5...5,0 мм; применение порошков с низким содержанием кислорода, применение в качестве защитного газа смеси 90 % Аг + 10 % Н₂.

Установлена принципиальная возможность микроплазменной порошковой наплавки: на токах 5...35 А на узкую подложку; на токах 17...35 А — на широкую подложку.

Разработана технология ремонта торцов бандажных полок рабочих лопаток из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ авиационного дви-

гателя Д18Т, базирующаяся на применении однослойной наплавки при силе тока 8...20 А с присадочным порошком из сплава ЖС32. Показана принципиальная возможность ремонта микроплазменной порошковой наплавкой поликристаллических лопаток с применением как идентичных по химическому составу с основным металлом присадочных материалов для сплава ЖС6У-ВИ, так и менее жаропрочных присадочных материалов с заданным уровнем свойств для сплавов ЖС6К-ВИ и ЧС70-ВИ.



О. В. Махненко (ИЭС им. Е. О. Патона) защитил 17 декабря 2009 г. докторскую диссертацию на тему «Прогнозирование деформаций при сварке и термической правке конструкций на основе методов термопластичности и функций усадки».

Диссертация посвящена созданию общего подхода прогнозирования деформаций при сварке (наплавке, тепловой правке) крупногабаритных конструкций на основе комбинированного применения методов термопластичности и функций усадки, а также разработке соответствующих расчетных алгоритмов реализации комбинированного подхода.

Предложены расчетные способы определения параметров функции усадки для характерных случаев сварочного нагрева на основе геометрической типизации объекта.

Разработаны расчетные алгоритмы для балочных конструкций и проведено исследование кинетики общих деформаций сварных балок при лазерной сварке в многоопорном закреплении, что позволило решить проблему позиционирования лазерного источника нагрева в процессе сварки с учетом сварочных деформаций. Отличительной особенностью разработанной математической модели является учет статической неопределимости, связанной с местами промежуточного закрепления балки в процессе выполнения сварки, возможность прогнозирования усилий для удержания балки на опорах во время сварки, а также для обеспечения предварительного выгиба либо механической правки после сварки.

Разработаны расчетные алгоритмы для прогнозирования сварочных деформаций трубных решеток теплообменников в процессе сварки большого количества теплообменных трубок, и на основе проведенных расчетных исследований получены новые практические результаты. Определен тип сварного соединения трубной решетки с трубками из пяти рассмотренных, который обеспечивает наименьшие деформации трубной решетки. Установлено, что применение аустенитной



стали для трубок и присадки по сравнению с вариантом ферритной стали позволяет получить более низкие остаточные общие деформации трубной решетки. Определено, что для конструкций с двумя трубными досками и короткими прямыми трубками приварка в определенной последовательности одновременно двух концов трубок может существенно снизить деформации трубных решеток, особенно при ограниченных толщинах последних. Сделана оценка риска потери устойчивости при осевом сжатии трубок, привариваемых в первую очередь.

Разработаны расчетные алгоритмы для прогнозирования общих деформаций, связанных с многопроходной наплавкой износостойким сплавом пластин большого размера. Установлено, что наиболее благоприятным с точки зрения снижения деформаций является вариант наплавки вдоль длинной кромки заготовки на минимальных по тепловложению режимах, обеспечивающих необходимую микроструктуру в металле ЗТВ. Выявлен существенный эффект снижения деформаций (примерно в 3 раза) при применении закрепления в зоне наплавки, т. е. прижатия этого участка к плите с последующим освобождением после остывания.

Разработаны расчетные алгоритмы для моделирования процесса тепловой правки тонкостенных конструкций с деформациями бухтиноватости с помощью различных по форме пятен нагрева. На основе разработанных алгоритмов проведено исследование возможности повышения эффективности процесса тепловой правки. Установлено, что за счет оптимизации параметров нагрева можно существенно повысить эффективность правки, что связано со значительной экономией энерго- и трудозатрат. Впервые выявлены основные закономерности процесса тепловой правки тонкостенных конструкций с деформациями бухтиноватости, обусловленные геометрическими параметрами бухтины, параметрами и расположением пятен нагрева. Установлено, что процесс тепловой правки деформаций бухтиноватости имеет целый ряд объективных факторов, ограничивающих эффективность этой технологической операции, особенно при больших толщинах листа обшивки.

На основе разработанных расчетных алгоритмов создано управляющее программное обеспечение для автоматизации процесса термической правки тонкостенных конструкций с деформациями бухтиноватости, которое нашло применение в автоматизированных комплексах оборудования для лабораторных испытаний и испытаний в условиях производства сварных судостроительных панелей.

Разработаны расчетные алгоритмы и методика определения оптимальных параметров тепловой правки деформаций искривления оси цилиндрической обечайки, которые позволяют оперативно получать решение по выбору параметров теплового воздействия в режиме реального времени. Экспериментальная апробация тепловой правки общих деформаций искривления длинной оси цилиндрической обечайки и длинных шнековых валов показала высокую эффективность разработанной методики.



В. Ю. Скульский (ИЭС им. Е. О. Патона) защитил 23 декабря 2009 г. докторскую диссертацию на тему «Свариваемость теплоустойчивых хромистых сталей для котлоагрегатов высоких параметров».

Диссертация посвящена исследованию закономерностей формирования структуры, свойств сварных соединений хромистых теплоустойчивых сталей, природы образования холодных и отпускных трещин в сварных соединениях таких сталей и созданию научно обоснованных подходов к технологии получения качественных соединений сварных трубных систем котлоагрегатов нового поколения со сверхкритическими параметрами пара для энергоблоков тепловых электростанций.

Расширены представления о влиянии легирующих элементов на особенности высокотемпературного $\delta \rightarrow \gamma$ -превращения и фазовый состав мартенситных хромистых сталей. Показано, что исключение образования δ -феррита и получение однофазной мартенситной структуры сложнолегированных хромистых сталей (как условия обеспечения их высоких технологических свойств и длительной прочности) достигается при содержании хрома на уровне 8,15...9,75 %, чем обоснована целесообразность применения в котлостроении сталей с 9 % Cr с системой легирования 0,1C–9Cr–MoVNbNiN (типа 10X9МФБ). Изучены особенности фазовых превращений и формирования структуры сварных соединений 9%-х хромистых сталей в условиях, характерных для дуговой сварки. Установлено, что увеличение содержания хрома в теплоустойчивых сталях (от 2,5 до 12 %) ведет к повышению стабильности аустенита при переохлаждении, снижению температуры мартенситного превращения (от ~450 до ~280...230 °C) и возрастанию степени их закалки. Стали с 9 % Cr склонны к образованию мартенсита (с твердостью ~450 HV) в широком диапазоне скоростей охлаждения, что делает их трудносвариваемыми и склонными к образованию холодных трещин.



Установлены условия возможного образования δ -феррита при сварке сталей с 9 % С. Показано, что гетерофазное строение металла швов и зоны сплавления может возникать при сварке с повышенной погонной энергией в результате развития неоднородного распределения элементов-ферритизаторов (Cr, Mo, V, Nb) и углерода (при ликвации и высокотемпературной диффузии). К образованию δ -феррита приводит снижение содержания углерода в швах (например, при его выгорании при сварке TIG), а также усиление диффузии углерода из основного металла в сторону шва с более высоким содержанием хрома, что характерно для сварки соединений хромистой и аустенитной сталей аустенитным хромоникелевым швом. Последнее явление исключается при использовании никелевых сварочных материалов. Принципиальным подходом к технологии сварки соединений мартенситных сталей с 9 % С является использование режимов с пониженной погонной энергией. Изучены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния и образования холодных трещин в сварных соединениях закаливающихся сталей. Экспериментально показано, что основным фактором, предопределяющим склонность мартенситного металла к образованию холодных трещин, является степень упрочнения при закалке. Сварочные (усадочные) напряжения вместе с напряжениями от внешнего нагружения являются дополнительным фактором, инициирующим процесс разрушения. С помощью разработанной методики исследованы термокинетические особенности замедленного разрушения сварных соединений. Установлено, что у сварных соединений мартенситных сталей склонность к образованию холодных трещин проявляется при температуре ниже $\sim 140^\circ\text{C}$; при $80\dots 100^\circ\text{C}$ соединения имеют минимальную трещиностойкость, что определяется максимальной скоростью процесса разрушения. На основании результатов дилатометрических исследований образцов закаленных сталей (10/40Х9МФБ, 25Х2НМФА, 38ХНЗМФА) и определения энергии активации развития деформации в период испытаний трещиностойкости показано, что выявленные различия в сопротивлении образованию холодных трещин при разных температурах могут быть связаны с различной кинетикой развития низкотемпературного распада (отпуска) мартенсита. Возникающая при этом микроструктурная неоднородность определяет характер распределения упругопластических деформаций в объеме закаленного при сварке металла и вероятность формирования микроучастков с высокими локальными напряжениями, плотностью дислокаций и концентрацией водорода, в которых

зарождается и развивается разрушение. При низкой скорости распада (в интервале $80\dots 100^\circ\text{C}$) создаются условия для локальных деформаций в зоне границ зерен и быстрого разрушения. Экспериментально и теоретически доказано, что высокая скорость распространения распада мартенсита в объеме металла при повышенных температурах, а также выход из сварного соединения диффузионного водорода являются условиями возрастания сопротивления замедленному разрушению. Показано, что наличие в исходной жесткой мартенситной структуре более податливых для деформирования микроструктурных составляющих (δ -феррита) ведет к снижению трещиностойкости. Углублены представления о механизме отпускной хрупкости и установлены факторы, определяющие возможность образования трещин в условиях высокотемпературной релаксации напряжений в сварных соединениях 9%-х хромистых сталей. Выявлен эффект дисперсионного твердения в интервале $\sim 400\dots 550^\circ\text{C}$, причиной которого может быть выделение хромистого карбида M_7C_3 . Установлено, что при наличии в структуре δ -феррита при отпуске в интервале твердения могут образовываться трещины. Условием высокой стойкости против образования трещин при отпуске является обеспечение однородной мартенситной структуры. На основании изучения кинетики релаксации напряжений в процессе высокотемпературных испытаний установлено, что для более полного снятия уровня внутренних напряжений отпуск сварных соединений следует проводить при температурах $\sim 750\dots 760^\circ\text{C}$. Определен уровень легирования металла шва С, Мn, Ni для обеспечения его однофазной мартенситной структуры и получения требуемых механических свойств после отпуска сварных соединений. Экспериментально и теоретически обоснованы рекомендации к режимам ручной и автоматической сварки под флюсом. Определены условия достижения высокой стойкости сварных соединений против замедленного разрушения посредством теплового воздействия на структурный и водородный факторы (ограничение скорости охлаждения металла в ЗТВ $w_{6/5} \leq 8\dots 10^\circ\text{C}/\text{с}$, термический отдых при температурах $160\dots 200^\circ\text{C}$) и обеспечения их требуемых механических свойств при термической обработке (высокий отпуск при $T \approx 750\dots 760^\circ\text{C}$ в течение не менее 2 ч). Созданы новые сварочные электроды АНЛ-8, разработана техническая документация на принципиальные технологии сварки типовых соединений труб. Проведена опытно-промышленная проверка технологии сварки.



ПО СТРАНИЦАМ «WELDING AND CUTTING», 2009, № 2

R. Bolot, J.-L. Seichepine, Ch. Coddet et al.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ AlSi ПОЛИЭФИРНЫХ ИСТИРАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Истираемые заглушки используются в аэрокосмической области с целью контроля утечек между лопатками ротора двигателя и его статическими частями. Для того чтобы получить сочетание необходимых свойств, заглушки создавали с использованием термически напыленных покрытий, которые, как правило, получали с применением двух- или трехфазных порошковых смесей. В работе использован метод конечных элементов и конечных разностей, основанных на двухмерных структурах, взятых из микрофотоснимков. Изучена и измерена теплопроводность термически напыленных AlSi полиэфирных истираемых покрытий, полученных из порошков Metco 601 NS и Durabrade 1605. Полученные значения сравнивали с экспериментальными.

Для расчета эффективной теплопроводности изготавливаемых двухфазных покрытий использовали два численных кода, основанных на методе конечных элементов и конечных разностей. Эти два кода испытаны для микроструктур поперечного сечения одного покрытия. Несмотря на то что была

замечена разница относительно прогнозируемой эффективности теплопроводности, обеспечиваемой двумя кодами, результаты хорошо сочетались с экспериментальными данными. В частности, соотношение между эффективной теплопроводностью покрытия и теплопроводностью AlSi было выше 200, следовательно, обеспечивается эффективная теплопроводность примерно $0,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Этот результат очень отличается от покрытий YPSZ или пористого оксида алюминия (исследованных ранее), для которых это соотношение более низкое. В соответствии с расчетными данными первым критерием при рассмотрении микрофотоснимков является не самое большое возможное расширение (как для пористого TBC, например), а способность охватить достаточно большую область, что дает хорошее представление о связанности AlSi фазы. Представленные результаты относятся к порошку Durabrade 1605, однако для порошка Metco 601 NS они аналогичны.

C. Selcuk, S. Bond, P. Woollin et al.

СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ (Обзор)

Способы порошковой металлургии (ПМ) обладают высокой производительностью и идеально подходят для создания деталей с формой, близкой к готовой детали, особенно сложной геометрии, используя материалы, которые максимизируют использование материала и, следовательно, минимизируют или исключают вторичную обработку такую, как механическая обработка. Последняя характерна для деталей, полученных с помощью обработки жидкого металла (например, при литье), и приводит к дополнительному этапу производства со значительными затратами и созданием отходов. Тем не менее, несмотря на такое очевидное преимущество способов ПМ, соединение материалов, синтезированных из порошков, связано с трудностями, которые касаются их природных характеристик таких, как пористость, загрязнение и включение, на уровнях, склонных влиять на свойства сварного соединения. В данной статье представлен обзор современного уровня развития сварных компонентов ПМ. Сделана попытка идентифицировать получившие предпочтение способы соединения и обозначить явные технологические проблемы при соединении изделий ПМ.

Сегодня имеется большой диапазон порошковых материалов и они доступны для широкой номенклатуры сплавов, но не существует универсального способа их соединения. Тем не менее имеется определенное количество сварочных характеристик для изделий из ПМ, которые отличаются от тех, которые имеют отношение к кованным или литым эквивалентам (либо в последовательности производственного маршрута либо в типичном применении изделия ПМ). Например, если изделия ПМ используются для разных высокоточных применений, желательно выполнять сварку с помощью процесса, который обеспечивает минимальную деформацию. В данном случае дается предпочтение способам с низким количеством подводимого тепла таким, как лазерная и электронно-лучевая сварка, но любой способ с низким количеством подводимого тепла также неизбежно приведет к быстрому охлаждению и, следовательно, высокой твердости в стальных деталях, особенно, с более высоким содержанием углерода. Не ясно могут ли спеченные детали быть сварены электронным лучом в вакууме, однако, принимается во внимание природная пористость, в которой могут задерживаться газы и примеси, которые могут быть выплавлены в



шов. Снижение вакуума при электронно-лучевой сварке, для которой требуется вакуум приблизительно 10^{-3} мбар, может быть подходящим для использования при сварке спеченных деталей ПМ, так как предотвращает трудности в получении соответствующего вакуума, но этот способ находится еще в состоянии разработки.

Как и при сварке металлических материалов, недопустимым при сварке деталей из ПМ является образование дефектов. Любая пористость в изделии ПМ склонна заключать в себе загрязняющие вещества и газы, что может привести к образованию пор в металле шва и вызвать отдельные моменты, повышающие чувствительность к проявлению горячего и холодного растрескивания. Например, серные и фосфорные загрязняющие вещества провоцируют образование усадочных трещин, тогда как влага и углеродные загрязняющие вещества приводят к водородному растрескиванию.

Для того чтобы минимизировать такие проблемы, очевидно необходимо поддерживать чистоту поверхности. Для этого желательно избегать обработки паром, а перед сваркой необходимо выполнить обезжиривание поверхности. Если загрязнение существует, целесообразно использование прищадочного металла, являющегося более приемлемым к загрязнению, чем основной металл, например, никелевого сплава, в случае с которым предпочтительно использовать способы дуговой сварки. Одним из возможных преимуществ взаимосвязанной пористости может быть тот факт, что во-

дород способен диффундировать через открытые пористые структуры при сварке стальных изделий ПМ, что может сделать их более стойкими к водородному растрескиванию.

Если пористость в основном металле значительная, то это может привести к отрыву металла, прилегающего ко шву просто из-за развития пластической деформации за рамками возможностей изделия ПМ, возможно обостренной фактором геометрического влияния на соединение. В таком случае желательно использование низкого количества подводимого тепла для сокращения количества деформированного материала, а сварка трением может быть целесообразной, поскольку сжатие, имеющее место, склонно закрывать поры. На самом деле для изделия ПМ, как правило, используют сварку трением, благодаря силе сжатия и тому факту, что она удаляет первоначальный слой, который может быть загрязнен, с поверхности соединения.

Очевидным является то, что характеристики порошковой частицы, влияющие на спекание изделия ПМ, и, следовательно, его окончательную пористость, не получили достаточного внимания с точки зрения исследования поведения при сварке. Для того чтобы получить хороший контроль пористости и минимизировать ее негативное влияние при сварке, необходимо уделить внимание влиянию характеристик порошковой частицы, таким, как форма частицы, размер и площадь поверхности, плотность и пористость прессованного порошка для улучшения свариваемости.

H. Koivuluoto, S. M. Kotilainen, P. Vuoristo.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ХОЛОДНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ ПРИ ВЫСОКОМ И НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ (Обзор)

Холодное напыление — это новый процесс термического напыления, который позволяет изготавливать металлические и композитные покрытия с низкой пористостью и низким содержанием кислорода. Такие покрытия являются очень привлекательными для применения в случаях, например, защиты от коррозии и электропроводности. В работе представлены характеристики структуры и механических свойств покрытий ХНВД (холодное напыление при высоком давлении) и ХННД (холодное напыление при низком давлении). Покрытия Та, Ni и Cu при ХНВД демонстрируют однородную плотную структуру; тогда, как покрытия $Ni_{20}Cr$ ХНВД и $Cu+Al_2O_3$ ХННД включают сквозную пористость, согласно испытаниям на коррозию. Более того, LALPCS (выполняемые с помощью лазера) продемонстрировали значительное улучшение плотности покрытия $Cu+Al_2O_3$.

Как правило, покрытия ХНВД имеют плотную структуру (пористость отсутствует или уровень пористости низкий). В данной работе была четко показана высокая плотность Та, Cu и Ni покрытий ХНВД. Это открывает большие преимущества для покрытий, полученных холодным напылением. При соударении вследствие деформационного упрочнения частицы ХНВД сильно деформируются. У процесса ХНВД скорость частиц выше, чем у процесса ХННД из-за более высокого давления и температуры. Это улучшает свойства покрытий, указывая на высокую твердость, благодаря деформационному упрочнению, и на подходящее соединение из-за деформации частиц. Очевидно, что плоская форма частиц появляется в результате деформации частиц. Более того, граница раздела между покрытием и подложкой является самой слабой точкой при испытании на растяжение, отображая разрушение адгезионного типа и приемлемые связи между частицами.

В процессе ХННД, как правило, используют смеси металллокерамического порошка. Существует три основные

функции использования твердой фазы: активирующая, очищающая и проковочная. Частицы порошка также пластично деформируются при соударении, однако, необходимо отметить различные типы порошков (например, Cu дендритные частицы против сферических). Согласно РЭМ анализу и другим исследованиям, количество алюминия уменьшается по сравнению с исходным начальным порошком, а напыленное покрытие характеризуется активирующим и упрочняющим металлическую матрицу действием алюминия. Твердость покрытий ХННД также более высокая, но ниже, чем у покрытий ХНВД. При соударении в ХНВД происходит больше деформационного упрочнения и пластической деформации, что влияет на увеличение твердости. $Cu+Al_2O_3$ покрытие ХННД было визуально плотным, но сплошная пористость наблюдалась при измерениях потенциала открытия пор. Следовательно, для того чтобы исключить пористость и улучшить плотность был протестирован выполняемый с помощью лазера процесс ХННД. Получены перспективные результаты в отношении улучшения плотности $Cu+Al_2O_3$ покрытий LALPCS, которые демонстрируют плотную структуру покрытия при измерении потенциала открытия пор. Улучшение было значительным.

Таким образом, холодное напыление демонстрирует потенциал при создании плотных и без пустот металлических и композитных покрытий. Плотность и герметичность имеют важную роль в отношении коррозионной защиты покрытий. На данный момент достигается однородная плотность Та, Cu и Ni покрытий ХНВД, что является последствием оптимизации порошка, параметров напыления и их сочетания. Следующим шагом будет улучшение связи между частицами и границей раздела покрытие-подложка. Кроме того, покрытия ХННЗ требуют улучшения плотности, а для этого использование лазера является единственной возможностью. Оптимизация и разработка будут продолжаться в будущем.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СЕМИНАР DELOORO STELLITE в ЗАПОРОЖЬЕ

В Запорожье состоялся технологический семинар, организованный специалистами Делоро Стеллит (Германия) и ОАО «Мотор Сич» (Украина), на тему «Особенности применения оборудования и материалов Делоро Стеллит в авиакосмической промышленности и турбиностроении». В работе семинара приняли участие специалисты Делоро Стеллит, ОАО «Мотор Сич» и 46 специалистов, представлявших авиаремонтные и машиностроительные предприятия Украины, России и Беларуси.

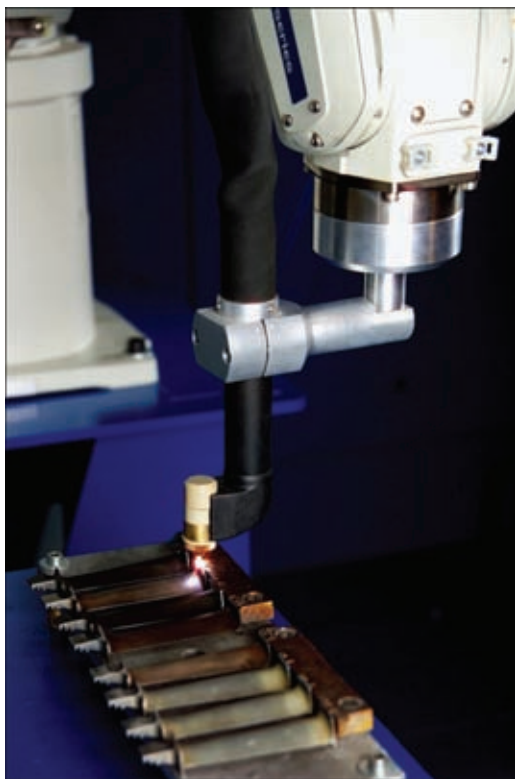
23 ноября в конференц-зале гостиницы «Дион» семинар открыла менеджер Делоро Стеллит в СНГ Е. М. Дубинина презентацией группы фирм Делоро Стеллит. Было отмечено, что фирма является ведущей компанией с мировым именем, столетней историей и большим опытом в области производства изделий из сплавов на основе кобальта, никеля, железа: присадочных материалов для наплавки и напыления в виде прутков, электродов, порошковой проволоки и порошка; литых деталей и полученных порошковой металлургией по чертежам заказчиков, а также оборудования для плазменно-порошковой

наплавки (РТА) и сверхзвукового напыления (Jet Kote). В состав группы фирм Делоро Стеллит входят 14 заводов в Германии, Италии, Франции, Англии, Индии, США, Китае, Канаде и России. Головной офис расположен в г. Кобленц (Германия).

Деятельность Делоро Стеллит направлена на защиту поверхностей особо нагруженных металлических деталей от воздействия комплексного износа. Сплавы фирмы хорошо работают в сложных условиях воздействия сразу нескольких изнашивающих факторов, например, высокой температуры и ударных нагрузок; коррозии, абразивного износа, кавитации и пр.

Ремонтные и упрочняющие технологии Делоро Стеллит завоевали прочные позиции в различных отраслях от аэрокосмической, энергетической, автомобильной, атомной, нефтегазовой, химической до медицины и других.

Авиация, космонавтика и турбиностроение являются особыми отраслями, где обычно сконцентрированы последние достижения в материаловедении, применении высоких технологий и современного



Микроплазменная роботизированная наплавка лопаток на «Мотор Сич»



Микроплазменная роботизированная наплавка лабиринтного диска на «Мотор Сич»



Наплавка лабиринтного диска



Наплавленные валики на лабиринтном диске

оборудования. Являясь мировым лидером в вопросах увеличения износостойкости, Делоро Стеллит уделяет особое внимание тем отраслям, где защита от износа, продолжительность службы и безотказность работы оборудования тесно связаны друг с другом.

Делоро Стеллит предлагает широкий диапазон износо-, жаро- и коррозионностойких сплавов. Фирма имеет в своем арсенале более чем 500 сплавов, которые разработаны для решения конкретных технических задач. Свойства таких сплавов определяются наличием в их составе твердой фазы карбидов, интерметаллидов, боридов и др. и находятся в металлической вязкой матрице.

Наиболее распространенными и чаще всего применяемыми являются сплавы на основе кобальта серии Stellite®, относящиеся к группе Co—Cr—W—C. Эти сплавы сохраняют очень высокую абразивную и коррозионную стойкость в области повышенных температур, имеют превосходную сопротивляемость кавитации и эрозии и высокую сопротивляемость задиру.

Сплавы на основе никеля серии Deloro® типа Ni—Cr—B—Si обеспечивают хорошую коррозионную стойкость и сопротивляемость абразивному износу, сохраняют твердость при высоких температурах, что в отдельных случаях позволяет использовать их вместо Stellite®. Эти сплавы широко используются

для наплавки промышленных клапанов и элементов запорной арматуры.

Tribaloy®, Stellite®, Deloro®, Nistelle®, Stelcar®, Jet Kote®, Delchrome® запатентованы и являются зарегистрированными торговыми марками Делоро Стеллит. Сплавы серии Tribaloy® интерметаллидного типа на кобальтовой основе содержат твердую фазу Лавеса, распределенную в более мягкой матрице эвтектоидного или типа твердого раствора. Эти сплавы широко применяются в случаях, когда сухое трение металла о металл сочетается с высокой температурой, коррозией и абразивным износом. Область применения постоянно расширяется (автомобильная, аэрокосмическая, судостроение и др.).

Nistelle® — сплавы на основе никеля, разработаны для защиты поверхностей от агрессивных химических сред. Они также имеют высокую стойкость к термическим и механическим ударам.

Сплавы типа Stelcar® представляют собой смесь частиц карбидов с самофлюсующимся никелевым или кобальтовым порошком. Ввиду особенностей композиции эти материалы выпускаются только в виде композиционных порошков для напыления и наплавки.

Порошки Jet Kote® применяются для сверхзвукового газотермического напыления и изготавливаются в различных комбинациях смесей агломерированных и сфероидизированных порошков,

Выбор сплава	Сплав	Износ		
		Механический	Коррозионный	При высокой температуре
+ Низкая сопротивляемость	Стеллит	+++	+++	++++
	Делоро	+++	+	+
++ Удовлетворительная сопротивляемость	Трибалой	+++	+++	++++
+++ Хорошая сопротивляемость	Найстел	+	++++	+
	Делхром	+++	+	+



например: WC-Co, Cr₃C₂-NiCr или из сплавов Stellite® и Deloro®.

Сплавы Delchrome® — сплавы на основе железа. Разработаны для наплавки деталей, работающих на абразивный износ при невысоких температурах. В сравнении с кобальтовыми и никелевыми сплавами их коррозионная стойкость сравнительно низкая.

В таблице представлены обобщенные сведения по выбору того или иного материала Deloro Stellite в зависимости от условий эксплуатации.

Накопленный Делоро Стеллит опыт позволяет решать проблемы клиентов путем подбора необходимого сплава или разработки нового для конкретных условий эксплуатации по требованию заказчика. При этом может быть предложено изготовление деталей методом точного литья, либо предложен сварочный материал (электрод, проволока, прутки, порошок), необходимое оборудование и технология ремонта.

Материалы Делоро Стеллит применяются в технологиях ремонта и упрочнения деталей с использованием следующих способов:

- аргонодуговой/ацетиленокислородной наплавки прутками,
- ручной дуговой наплавки покрытыми электродами,
- дуговой механизированной наплавки (МИГ/МАГ) порошковой проволокой в среде защитного газа, наплавки под флюсом,
- плазменно-порошковой наплавки,
- лазерной наплавки,
- газопламенного напыления с последующим сплавлением,
- газопламенной наплавки порошком,
- плазменного напыления,
- сверхзвукового газопламенного напыления (HVOF, Jet Kote).

Наиболее эффективные технологии ремонта и упрочнения базируются на использовании плазменной порошковой наплавки — ППН (РТА) и сверхзвукового напыления (Jet Kote).

Оборудование для наплавки и напыления, разработанное Делоро Стеллит, имеет блочное строение, что позволяет осуществлять необходимую компоновку для решения всевозможных практических задач и требований заказчика. Например: роботизированная установка для ОАО «Мотор Сич» для ППН имеет следующие технические возможности и характеристики:

- ширина наплавляемого валика 1,2–5,0 мм,
- минимальная толщина детали 0,8 мм,
- стабильный размер наплавленного валика,
- автоматическое позиционирование плазмотрона,

- программное управление всеми параметрами наплавки,

- две рабочие позиции для наплавки,
- напряжение сети 3×400 В,
- ток сварки 3,0–190 А,
- ток дежурной дуги 3,0–30 А,
- транспортирующий газ 0,5–5 л/мин,
- защитный газ 1,5–15 л/мин,
- плазменный газ 0,2–5 л/мин.

Установки для сверхзвукового напыления (Jet Kote) обеспечивают процесс с минимальным нагревом изделия (холодное упрочнение).

Использование агломерированных и сфероидизированных порошков Делоро Стеллит с малым количеством сателлитов позволяет достичь высокую плотность покрытия с пористостью всего 1...2 % и следующими характеристиками процесса:

- скорость струи газовой плазмы — 1500–2000 м/с,
- температура плазмы — 2700–3000 °С,
- скорость полета частиц порошка — 900–1200 м/с,
- производительность напыления — 2–6 кг/ч,
- расходы газов — 100–150 л/мин (природный газ); 220–330 л/мин (кислород); 25–40 л/мин (азот, аргон).

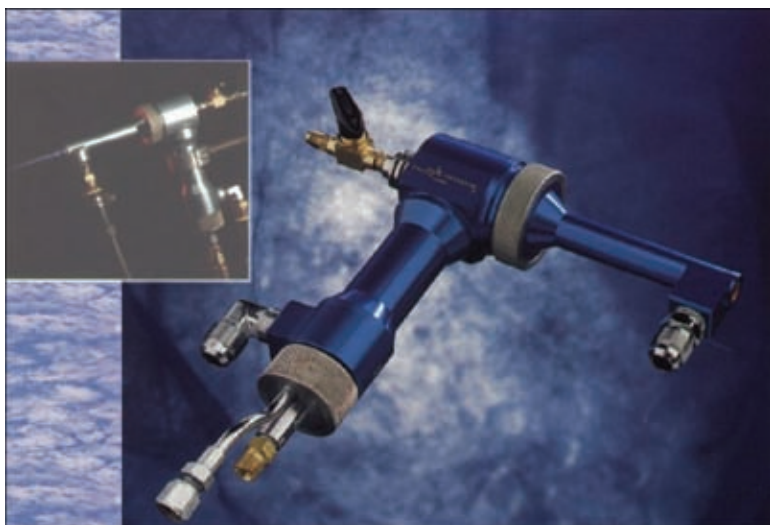
Установка для сверхзвукового напыления (HVOF) последней разработки эксплуатируется на совместном предприятии Делоро Стеллит и российских партнеров — ДС «УРАЛ», Пермь, Россия. Установка роботизированная с возможностью напыления деталей длиной до 10 м и массой до 4 т.

Продукция Делоро Стеллит постоянно совершенствуется. Создаются все новые и новые марки сплавов, расширяющих технологические возможности восстановления деталей. Об этом на семинаре рассказал руководитель экспорта в страны Европы и Юго-Восточной Азии д-р А. Павленко.

Фирмой предложен новый процесс — высокотемпературная изостатическая опрессовка, включающая нагрев отлитой детали из материала Делоро



Установка Jet Kote для сверхзвукового напыления



Пистолет для сверхзвукового напыления

Стеллит почти до температуры плавления и выдержку под сверхвысоким давлением в нейтральной среде. Такая обработка устраняет литейные микронефекты, уплотняет материал, придавая ему новые качества.

Разработана 700-я серия сплава Стеллит, в которой используется легирование молибденом вместо вольфрама. В результате достигается более высокая износостойкость, коррозионная стойкость без снижения горячей твердости.

Семинар был продолжен 24 ноября на Запорожском заводе ОАО «Мотор Сич», основанном в 1907 г. и являющимся сегодня одним из крупнейших в мире заводов по выпуску авиационных двигателей. Двигатели «Мотор Сич» эксплуатируются более чем в 100 странах мира, каждый десятый самолет и каждый четвертый вертолет в мире оснащен двигателями производства «Мотор Сич». Продукция завода сертифицирована Berau Veritas ISO 9001-2000.

В 2007 г., после четырех лет совместного научно-технического сотрудничества специалистов предприятия ОАО «Мотор Сич» и Делоро Стеллит, были созданы установки с конкретными характеристиками для решения вопросов ремонта и упрочнения осеботорнокх и малых деталей в авиакосмическом и энергетическом комплексах. В том же году установки были поставлены заказчику и на заводе был организован участок восстановления лопаток и дисков газотурбинных двигателей.

Ранее на заводе ремонт лопаток осуществляли с помощью ручной аргонодуговой наплавки прутками. По словам главного сварщика ОАО «Мотор Сич» И. А. Петрика, ручную аргонодуговую наплавку одного диска проводили за одну неделю с

достаточно низким качеством, до 20 % наплавленных изделий отбраковывали (трещины и т. д.). Перевод технологии ремонта с ручной аргонодуговой на плазменно-порошковую позволил повысить качество и производительность ремонта. Установки окупили себя за два года. В настоящее время при ППН используются отечественные порошки ЖС-32 и ЖС-6 производства УкрНИИСПецСталь (г. Запорожье) и порошки ВЗК и Stellite®, производства Делоро Стеллит. Опыт использования указанных порошков показал их высокое качество. И. А. Петрик отметил следующие преимущества ППН: низкий процент перемешивания основного металла с наплавочным сплавом, малые температурные деформации изделия, уменьшение

объемов механической обработки после наплавки, снижение потерь присадочного порошка, высокую повторяемость процесса наплавки, легкую автоматизацию. Отмечены и некоторые недостатки: сложность использования некоторых видов порошка в одной рабочей смене, так как приходится перезагружать порошковый питатель, что увеличивает время простоя оборудования, наплавка хорошо осуществляется на кромках и хуже на плоскостях, наплавку лучше проводить в вертикальном положении.

Е. М. Дубинина, отвечая на вопросы участников семинара, в частности, сообщила, что установки ППН Делоро Стеллит могут оснащаться двумя накопителями для различных порошков, что в значительной степени ускоряет замену порошков; угол наклона плазмотрона от вертикали может изменяться до 45° и более, при технической необходимости возможно выполнение наплавки в потолочном положении.

В октябре 2009 г. в Москве открыт склад Делоро Стеллит для прямых продаж клиентам в странах СНГ. В Украине продажи товаров Делоро Стеллит осуществляются компанией ООО «ГРИК» (г. Киев), работающей представителем Делоро Стеллит в Украине уже 10 лет.

В заключение участники семинара отметили, что передовые технологии Делоро Стеллит могут решать проблемы изготовления и ремонта деталей авиа- и турбиностроения с хорошими техническими и технологическими показателями и подтвердили целесообразность применения оборудования Делоро Стеллит на предприятиях авиационного и энергетического комплексов Украины, России и Беларуси.

Deloro Stellite Holding GmbH, Zur Bergpflege 53, 56070, Koblenz, Germany

tel.: +49 261 8088 10, fax: 261 8088 23, e-mail: info@deloro.de, www.stellite.com

Продажи в СНГ: факс/тел.: +38062 257 75 60, моб: +38050 471 90 22, e-mail: dubinina@mail.ru

Продажи в России: моб.: +7912 580 83 44, e-mail: ChernyaevaT@yandex.ru

ЧЕТВЕРТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР «НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ЖИВЫХ МЯГКИХ ТКАНЕЙ»

23 ноября 2009 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ был проведен четвертый семинар с международным участием «Новые направления исследований в области высокочастотной электросварки живых мягких тканей», в работе которого приняло участие более 60 человек (врачи хирургического профиля, врачи ветеринарной медицины и специалисты в области медицинской техники) из Украины, России, Беларуси и США. Организаторами семинара выступили ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ и Международная ассоциация «Сварка».

Открывая семинар академик Б. Е. Патон, отметил, что его задачей является обмен общей информацией о достигнутых результатах в области высокочастотной электросварки живых мягких тканей и совместное преодоление узких мест при использовании этой технологии. Задачами на ближайшее время являются создание более качественного сертифицированного оборудования и инструментария, организация обучения хирургов, продолжение научных исследований и применение технологии в новых областях хирургии.

За почти девять лет применения технологии высокочастотной электрической сварки живых мягких тканей в практической хирургии в Украине проведено более 50 тыс. операций в 80 клиниках, разработано около 100 новых хирургических методик.

Технология высокочастотной электрической сварки живых мягких тканей защищена патентами Украины, России, США, Австралии, Европейского Союза, Канады, Китая и Японии. Получены разрешения на клиническое применение в Украине, России, США и в странах Европейского Союза. Нашей мечтой и задачей на ближайшее время является оснащение каждого хирургического отделения в Украине оборудованием для сварки живых мягких тканей; с учетом того, что в Украине 9 тыс. хирургов и около 27 тыс. коек в хирургических отделениях, ежегодно необходимо выпускать до 1000 аппаратов ЕК-300М1 с различными комплектами биполярных сварочных инструментов. Это означает, что необходимо переходить от мелкосерийного к крупносерийному производству оборудования и инструментария.



Рабочий момент семинара



Дискуссия во время проведения семинара: стоят *слева направо* проф. М. Е. Нечитайло (Национальный институт хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова) и акад. Г. В. Бондарь (Донецкий обл. противоопухолевый центр)

Отметим некоторые из выступлений. В докладе д-р техн. наук Г. С. Маринский (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) остановился на ретроспективном анализе оборудования и биполярного сварочного инструментария для сварки живых мягких тканей, выпускаемого ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ и Международной ассоциацией «Сварка». Доклад канд. техн. наук О. Н. Ивановой (Международная ассоциация «Сварка») и Д. Д. Кункина (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) был посвящен разработке устройства для регистрации электрических параметров при сварке живых тканей с целью анализа их влияния на качество сварного соединения и выбор алгоритма управления этим процессом. В докладе д-ра мед. наук С. Е. Подпряткова (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ/КГКБ № 1, г. Киев), в частности, отмечено, что прочность электросварного соединения обеспечивается сваркой мышечных волокон между собой и созданием новых соединений коллагеновых волокон. Осуществление электросварки различных живых мягких тканей требует определенного сочетания величины (и формы) электрического тока, степени нагрева тканей и давления на ткани. В докладе чл.-кор. АМНУ М. П. Захараша (Национальный медицинский университет им. О. О. Богомольца, г. Киев) были освещены вопросы использования электросварочной технологии при выполнении операций у больных с механической желтухой. В докладе Е. Ю. Актан (Национальный университет им. Тараса Шевченко, г. Киев) были освещены вопросы применения биофизических эффектов при электросварке живых мягких тканей и перспективы их использования в хирургической практике и дана классификация структурных изменений в биологических тканях в зависимости от температуры (40...45 °C — гибель клеток, 60...80 °C — денатурация белков за исключением коллагеновых, 80...100 °C — денатурация коллагена, выше 100 °C — обезвоживание и коагуляция ткани). Показано, что исследование структурных изменений в коллагеновой компоненте в процессе сварки дает возможность оценить эффективность метода электросварки по сравнению с лазерной сваркой. Акад. АМН А. Ф.

Возианов (Институт урологии АМН Украины, г. Киев) остановился на перспективах применения электросварочной технологии в урологии. Акад. АМН Г. В. Бондарь (ККЛПУ «Донецкий областной противоопухолевый центр») отметил, что в медицине менять технологию очень трудно, но технология электрической сварки живых мягких тканей обеспечивает существенное сокращение времени проведения операций, уменьшение потерь крови, отсутствие как лигатур, так и послеоперационных осложнений, высокую степень регенерации ткани и др., что в свою очередь стимулирует хирурга к быстрому освоению технологии.

В Донецком областном противоопухолевом центре 25 операционных и в 12 из них установлены аппараты ЕК-300М1 и технология используется почти при всех операциях, за исключением операций на легких. Среди недостатков технологии Г. В. Бондарь отметил отсутствие широкой гаммы биполярных сварочных инструментов как по назначению, так и по типоразмеру. Акад. АМН Ю. А. Зозуля (Институт нейрохирургии АМН Украины, г. Киев) рассказал о перспективах применения электросварочной технологии в нейрохирургии: для остановки паренхиматозного кровотечения из мозговой ткани; для герметизации системы мозга после удаления опухолей; для герметизации оболочек мозга.

Два доклада В. А. Науменко (Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В. П. Филатова АМН, г. Одесса) были посвящены применению технологии высокочастотной электросварки при лечении глазных болезней, в частности, при ретинопексии (отслоение сетчатки) и при энуклеации глаза. Доказано, что применение высокочастотной электросварки при энуклеации глаза позволяет избежать кровотечения при пересечении мышц и сосудисто-нервного пучка и добиться необходимой фиксации мышц к теноновой капсуле и стойкого соединения краев конъюнктивы между собой без применения шовного материала. В восьми случаях ретинопексии хориоретинальная спайка, полученная методом электросварки, препятствовала распространению отслоения сетчатой оболочки за пределы экспериментального поля. В одном случае отмечался отрыв сетчатой оболочки по границе хориоретинального очага (хориоретинальная спайка, полученная с помощью лазерной коагуляции, оказалась несостоятельной на всех глазах).

В заключение акад. Б. Е. Патон отметил, что задач в технологии электрической сварки живых мягких тканей решено уже много и технология уже заняла достаточно прочные позиции в хирургии, но впереди еще много задач. Это организация крупносерийного производства, выпуск конкурентоспособных источников питания и инструментария, сертификация производства европейского уровня, обеспечение гарантийного и сервисного обслуживания, организация обучения хирургов и т. д.

А. Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук

СЕМИНАР-ФОРУМ ПИИ ООО «БИНЦЕЛЬ УКРАИНА»

17 декабря 2009 г. в Киеве в ППИ ООО «Бинцель Украина ГмбХ», входящем в ABICOR BINZEL-групп (Германия), прошел форум партнеров компании, организованный ее генеральным директором Ю. А. Дидусом и менеджерами. В семинаре приняли участие свыше 20 специалистов, представляющих дочерние торгующие предприятия ППИ «Бинцель Украина», а также эксклюзивные партнеры (дистрибьютеры) из ряда городов и регионов Украины.

Программа форума включала обсуждение результатов сотрудничества за текущий год, анализ как поквартального сбыта продукции в 2009 г., тенденции его развития на 2010 г., так и различных факторов, влияющих на этот процесс, а также презентацию новых продуктов торговой марки ABICOR BINZEL, которые в сентябре 2009 г. были представлены на выставке «Schweißen und Schneiden 2009» в г. Эссене (Германия).

Объем продаж продукции «ABICOR BINZEL» в Украине постоянно возрастал, причем высокими темпами, вплоть до 2007 г. Практически удваивался объем продаж из года в год. Эта тенденция нарушилась в период экономического кризиса. Уже в 2008 г. произошел заметный спад в объемах реализации. Однако позитивные изменения в экономике Украины во втором полугодии 2009 г. и активные усилия компании позволили к концу года достичь объемов продаж уровня 2007 г. Этому в значительной мере способствовала активная деятельность внешних служб «Бинцель Украина» и инвестирование в них значительных средств.

Ожидания «Бинцель Украина» в отношении продажи продукции в 2010 г. весьма оптимистичны. Они основываются во



многом на появлении на рынке Украины уже в первом квартале новых инновационных продуктов торговой марки ABICOR BINZEL. Среди них в сегменте МИГ/МАГ — новое поколение горелок ABIMIG® GRIP, ABIMIG® GRIP A в комплекте со шланговым пакетом нового поколения Low-Weight Bikoх®; в сегменте ТИГ — новое поколение горелок ABITIG® GRIP, ABITIG® GRIP Little; новое в линейке комплектующих к сварочному посту — BFR (тестер для блоков принудительного охлаждения и сварочных горелок с жидкостным охлаждением); в сегменте плазменной резки — новое поколение плазматронов ABICUT; в сегменте автоматизации ш роботизированные сварочные горелки ABIROB® W.

На семинаре была проведена также презентация немецкой фирмы «JAECKLE Schneid- und Schweißtechnik», которая специализируется на выпуске широкой линейки сварочного оборудования (источников) для МИГ/МАГ сварки, в том числе импульсной, ВИГ сварки, инверторов для дуговой сварки покрытыми электродами, а также аппаратов воздушно-плазменной резки. Последние оснащаются плазменными резаками «ABICOR BINZEL».

В заключение семинара состоялась демонстрация установок для ВПР в работе, а также предоставлена возможность их опробования и выяснения особенностей их эксплуатации.

Участники семинара выразили благодарность организаторам семинара за прекрасные условия и эффективную программу мероприятия.

А. Т. Зельниченко,
канд. физ.-мат. наук
В. Н. Липодаев,
д-р техн. наук

КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК В 2010 г. (сварка и родственные технологии)

Дата	Место проведения	Мероприятие	Организатор (контакты)
11–14.01	Шарья, ОАЭ	Ближневосточная торговая выставка «Обработка металлов, металлургическая и сталелитейная промышленность»	Экспоцентр Шарья E-mail: steel@expo-centre.ae
04–07.02	Стамбул, Турция	Международная выставка производственных технологий. Сварка (сборочные, сварочные и режущие технологии)	
09–12.02	Красноярск, Россия	Сибирский промышленный форум «Литье. Сварка»	Компания «Ван Поинт» Тел.: +7(495) 223 08 97 E-mail: info@1pointmsc.com
10–12.02	Набережные Челны, Россия	Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Металлургия. Сварка»	ВЦ «Экспо-КАМА» Тел.: +7(495) 22 33 557 E-mail: 5-5cbk.ru
10–12.02	Бомбей, Индия	Международная выставка «Сварка и резка Индии»	Messe Essen GmbH Факс: 49 201 77 44 448 www.messe-essen.de
18–22.02	пос. Славское, Карпаты, Украина	Международная промышленная конференция «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала»	Тел./факс: +38 (044) 573 30 40 E-mail: office@conference.kiev.ua
25–26.02	Бангкок, Таиланд	Второй международный сварочный конгресс Юго-Восточной Азии	Сварочный институт Таиланда www.welding-kongress.com
17–19.03	Омск, Россия	Сибирский промышленный форум	«ПромтехЭкспо» Тел.: (3812) 25-25-56 факс: (3812) 25 72 02 E-mail: promexpo@intersib.ru
17–19.03	Москва, Россия	Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»	
22–26.03	Париж, Франция	Международная выставка производственных технологий, в том числе Международная выставка сварочных технологий	
23–26.03	Новосибирск, Россия	Выставка «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия»	МВЦ «Сибирская ярмарка» Тел.: +7(495) 223 08 97 E-mail: info@1pointmsc.com
23–26.03	Минск, Беларусь	Международная специализированная выставка «Сварка и резка» с салоном «Защита от коррозии. Покрытия»	МинскЭкспо Тел./факс: +375 17 226 98 58 E-mail: e_fedorova@solo.by
13–16.04	Киев, Украина	Выставка «Машиностроение. Металлургия. Металлообработка. Сварка»	КиевЭкспоПлаза
14–15.04	Галле, Германия	Международная конференция «Лучевые технологии»	Тел.: +49 345 52 46 418 факс: +49 345 52 46 412 E-mail: tagungen@slv-halle.de
20–23.04	Екатеринбург, Россия	Выставка «UralExpoMETAL»	ВЦ «КОСК «Россия» Тел.: (495) 921 44 07 E-mail: info@rtl-expo.ru
21–23.04	Сочи, Россия	Специализированная выставка «Сварка. Строительный инструмент-2010»	ЗАО «СОУД-Сочинские выставки» Тел.: (8622) 62 26 93 факс: (8622) 62 10 26
28–29.04	Галле, Германия	Европейская конференция по сварке в строительстве железнодорожных вагонов	Schweisstechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH E-mail: tagungen@slv-halle.de
11–14.05	Минск, Беларусь	Международная выставка «Сварка»	Экспофорум www.expoforum.by Тел./факс: (+37517) 299 84 99 E-mail: pra@expoforum.by
13–16.05	Донецк, Украина	Выставка «Машиностроение»	ЭкспоДонбасс, СВЦ Тел.: +38 (062) 381 21 36
16–19.05	Екатеринбург, Россия	Международная конференция «Титан-2010 в СНГ»	
19–21.05	Санкт-Петербург, Россия	Международная выставка «Сварка/Welding 2010»	ОАО «ЛенЭкспо» Тел.: +7812 321 26 31 факс: +7812 321 27 22 E-mail: naverkina@lenexpo.ru

Дата	Место проведения	Мероприятие	Организатор (контакты)
24–27.05	Москва, Россия	Международная выставка машин, оборудования, технологий и продукции металлургической промышленности»	«Экспоцентр», «Мессе Дюссельдорф ГмбХ» E-mail: info@messe-duesseldorf.de www.messe-duesseldorf.de
24–27.05	Москва, Россия	Международная специализированная выставка «Mashnex/Машиностроение»	МВЦ «Крокус Экспо» Тел.: +7 (495) 925 34 13, 982 50 69 E-mail: mashex@mvk.ru
25–27.05	Киев, Украина	Международная конференция «Прочность металлов и конструкций при низких температурах»	Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины
25–28.05	Кацивели, Крым, Украина	Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях»	ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины Тел.: +38 (044) 271 26 33 факс: +38 (044) 287 65 57 E-mail: journal@paton.kiev.ua
27–30.05	Шанхай, Китай	Международная выставка «Сварка и резка», Эссен в Китае	
01–03.06	Киев, Украина	Промышленная выставка «ПатонЭкспо 2010»	ВЦ «КиевЭкспоПлаза» www.weldexpo.com.ua E-mail: olga@welding.kiev.ua
07–11.06	Москва, Россия	Европейская конференция по неразрушающему контролю	
07–11.06	Ялта, Украина	Международная конференция «Современные методы и средства контроля и технической диагностики»	
07–11.06	Артемовск, Украина	Международная конференция по сварочным материалам	Ассоциация «Электрод» Тел./факс: +38 (044) 287 72 35
07–11.06	Ялта, Украина	Международная конференция «Композиционные материалы в промышленности»	Тел./факс: +38 (044) 573 30 40 E-mail: office@conference.kiev.ua
08–10.06	Львов, Украина	Международная конференция «Проблемы коррозии и противокоррозионная защита конструкционных материалов»	Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины
20–26.06	Пекин, Китай	Международная конференция по строительству океанских и полярных сооружений «ISOPE 2010»	ISOPE TPC E-mail: meetings@isope.org
30.08–03.09	Дрезден, Германия	Европейская конференция «Водородное разрушение»	
01–05.09	г. Ополе, Польша	Международный коллоквиум «Механическая усталость металлов»	
29.09–02.10	Санкт-Петербург, Россия	Выставка «ПромЭкспо-Российский промышленник»	ЛенЭкспо
04–08.10	Ялта, Украина	Международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»	Тел./факс: +38 (044) 573 30 40 E-mail: office@conference.kiev.ua
12–15.10	Днепропетровск, Украина	Выставка «Машпром»	Экспоцентр «Метеор»
12–15.10	Москва, Россия	Юбилейная международная выставка «Weldex/Россварка»	КВЦ «Сокольники» www.weldex.ru Тел./факс: (495) 925 34 82 E-mail: mns@mvk.ru
19–21.10	Сосновицы, Польша	Международная конференция «Передовые сварочные технологии»	Польский ин-т сварки
23–26.11	Киев, Украина	Международный промышленный форум с разделом «УкрСварка»	МВЦ
30.11–02.12	Екатеринбург, Россия	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»	ВКЦТ Тел./факс: (343) 355 51 95, 310 03 30 E-mail: vystavka@r66.ru

ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США
*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с
Ф. И. О. _____

200 г. по

200 г. включительно

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$

Полноцветная (200×290мм) — 340\$

Полноцветная (200×142мм) — 170\$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (165×245мм) — 300\$

Полноцветная (165×120мм) — 170\$

Полноцветная (82×120мм) — 80\$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

• Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

• Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади

• При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрезки 200×290мм

• В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 7.0

• Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

• К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 03.12.2009. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 7,8. Усл.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 3 цв. вклейки. Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

Днепрометиз
Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО «Днепрометиз» – крупнейшее предприятие Украины в своей отрасли, входит в международную группу производителей «Северсталь-метиз»

e-mail: sale@dm.severstalmetiz.com

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97
Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты «Правда», 20

ПРОВОЛОКА:
сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С
Вр-1 для армирования ЖБК
общего назначения без покрытия
термообработанная черная
оцинкованная
колючая

СЕТКИ:
плетеные
сварные
рифленные

ЭЛЕКТРОДЫ:
МР-3
АНО-4
АНО-6
АНО-21
УОНИ

**ГВОЗДИ
БОЛТЫ
ГАЙКИ
ШАЙБЫ**

www.dneprometiz.com.ua



С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины

предприятие «Триада-Сварка»
г. Запорожье

- Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- Пуско-наладочные работы
- Широкий выбор сварочного оборудования

ABICOR BINZEL
Fronius
SEUMA



тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua
Сервисный центр: (061) 270 2939. www.triada-weld.com.ua

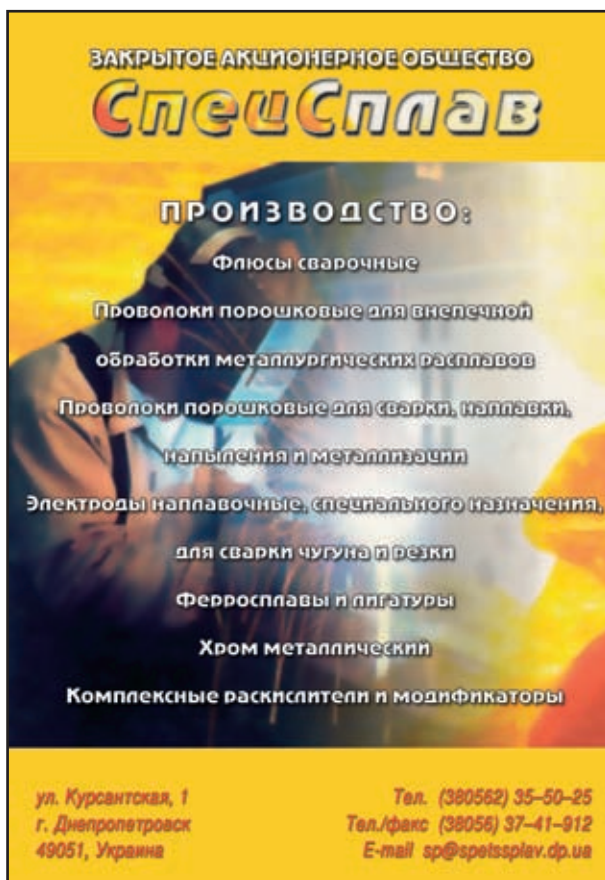
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:

- Флюсы сварочные
- Проволоки порошковые для внепечной обработки металлургических расплавов
- Проволоки порошковые для сварки, наплавки, напыления и металлизации
- Электроды наплавочные, специального назначения, для сварки чугуна и резки
- Ферросплавы и легатуры
- Хром металлический
- Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1
г. Днепропетровск
49051, Украина

Тел. (380562) 35-50-25
Тел./факс (38056) 37-41-912
E-mail sp@spetssplav.dp.ua



НАВКО-ТЕХ
Automatic machines and robots for arc welding

Автоматические установки и роботы для дуговой сварки и наплавки

- УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ
- УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ
- РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ
- СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, Киев
Тел.: +38 044 456-40-20
Факс: +38 044 456-83-53
<http://www.navko-teh.kiev.ua> E-mail: info@navko-teh.kiev.ua



ОАО «Электромашиностроительный завод
«Фирма СЭЛМА»

Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки.

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.



95000, г. Симферополь, Украина,
ул. Генерала Васильева, 32А
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55
Факс: +38 (0652) 58-30-53
E-mail: sales@selma.crimea.ua <http://www.selma.ua>



ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклонизделей» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.

На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН-348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов. **МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ**
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.



TBi Industries

**ГОРЕЛКИ
MIG /
MAG
и TIG
СВАРКИ**

**НЕМЕЦКОЕ
КАЧЕСТВО**



ПРЕДСТАВИТЕЛЬ В УКРАИНЕ - ЗАВОД **ДОНМЕТ**

Краматорск Тел. (06264) 5-77-13, 4-26-85 E-mail: svarka@donmet.com.ua <http://www.donmet.com.ua>

ОАО "ЗОНТ"

ПРОИЗВОДСТВО:

МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";
 МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";
 МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";
 МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С
 ЧПУ ДЛЯ ФИГУРНОЙ РЕЗКИ ТРУБ;
 ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЖУЩИХ МАШИН "РАДУГА";
 НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ
 КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

ПОСТАВКА
 ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.
 КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И
 МОДЕРНИЗАЦИЯ
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.





ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА «АВТОГЕНМАШ»)
 65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.
 Т. +38 (048) 717-00-50, E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA
 715-69-40, WWW.ZONT.COM.UA
 Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

ИЗС
 им. Е. О. ПАТОНА
 ОЗСМ

ГП «Опытный завод
 сварочных материалов
 ИЗС им. Е.О. Патона
 НАН Украины»

**Производство материалов для
 дуговой сварки, наплавки и резки:**

Электроды — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У,
 АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27,
 АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55,
 ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70,
 ТМЛ-1У, ТМЛ-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11,
 ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100,
 Т-590, АНР-2

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3,
 ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30,
 ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М,
 ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-АНХ25П4НЗТ,
 ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные — по ГОСТ 9087-81, а также
 АН-М13, АН-25, АН-72

Флюсы керамические — АНК-40, АНК-47А,
 АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина	Тел.: (044)	456-64-95
г. Киев-112		456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс: (044)	456-64-95
		456-63-08

Каховский завод
 электросварочного оборудования

74800, Украина, г. Каховка. Телефон: +38 (05535) 2-09-62, 2-10-72
 market@kzeso.com www.kzeso.com



СИЛА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ...



КЗЭСО

Специальные Научные Разработки **СНР**
 Научно-производственная фирма

**ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
 И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА**

**Магнитный
 структуроскоп КРМ-Ц-К2М**

- остаточные напряжения
- конструкционные напряжения
- результаты термообработки
- усталостные изменения
- развитие опасных зон
- оценка ресурса
- предупреждение разрушений



- ✓ без зачистки
- ✓ через защитное покрытие **до 6 мм**
- ✓ без контактной жидкости

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06
 www.snr-ndt.com | e-mail: mail@snr-ndt.com
 в Москве – ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 502-93-91, mail@mdiag.ru

Разработка, производство, внедрение

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки
порошковые для
сварки и наплавки,
проволоки сплошные,
электроды, флюс,
наплавочные установки



ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине

ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua



MEGAFIL® — обеспечение точности благодаря совершенной форме: полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами для получения неразъемных соединений; благодаря своим стабильным размерам, отсутствию деформаций кручения она пригодна при решении широкого круга задач; гарантированная внутренняя защита от влаги позволяет использовать ее без повторной прокатки; важными преимуществами являются сверхвысокая электрическая проводимость и стабильное горение дуги. Поддержите свою форму с помощью MEGAFIL®.

MEGAFIL®: Продукция компании Дратцуг Штайн — наша серия бесшовных изделий, включая также высококачественные порошковые проволоки TOPCORE® и MECUFIL®.



Drahtzug Stein
D-67317 Altleiningen
Tel: +49(0) 6356 966-0
Fax: +49(0) 6356 966-114
E-mail: postmaster@drahtzug.de; www.drahtzug.de

Официальный представитель в Украине
АРКСЭЛ

83017, г. Донецк, пер. Вятский, 2а
Тел.: (062) 332-2650(52)
Тел./факс: 382-9449, 332-2651
E-mail: info@aresel.dn.ua; www.aresel.dn.ua

