



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

**Издатель:** Международная ассоциация «Сварка»

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**  
Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай,  
В. Ф. Грабин, А. Т. Зельниченко,  
А. Я. Ищенко, И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко,  
Ю. Н. Ланкин,  
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, В. Ф. Мошкин,  
О. К. Назаренко, И. К. Походня,  
И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)  
Б. Брейтвейт (Великобритания)  
Д. фон Хофе (Германия)  
К. Буше (Франция)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
П. Зайффарт (Германия)  
А. С. Зубченко (Россия)  
Т. Игар (США)  
К. Иноуэ (Япония)  
Н. И. Никифоров (Россия)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Я. Пилярчик (Польша)  
Чжан Янмин (Китай)  
В. К. Шелег (Беларусь)

*Адрес редакции:*  
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623  
Факс: (38044) 528 0486  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

*Редакторы:*  
Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина

*Электронная верстка:*  
И. С. Баташева, А. И. Сулима,  
И. Р. Наумова, И. В. Петушков

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины изданий  
для публикации трудов соискателей  
ученых степеней.  
При перепечатке материалов ссылка  
на журнал обязательна.  
За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности  
не несет.

Цена договорная.

**СОДЕРЖАНИЕ**

175 лет МГТУ им. Н. Э. Баумана ..... 3

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**Махненко В. И., Сапрыкина Г. Ю.** К вопросу прерывистости кристаллизации металла сварного шва ..... 7  
**Лабур Т. М., Ищенко А. Я., Таранова Т. Г., Костин В. А., Григоренко Г. М.** Особенности зарождения и распространения трещин в условиях внецентренного растяжения сварных соединений алюминиево-литиевого сплава 1441 ..... 11  
**Юхимец П. С., Гарф Э. Ф., Нехотящий В. А.** Экспериментальное обоснование метода расчета остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями ..... 17  
**Остсемин А. А., Дильман В. Л.** Статическая прочность и напряженное состояние механически неоднородных стыковых сварных соединений с X-образной разделкой кромок ..... 22

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

**Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Логинов, В. П., Логинова Ю. В.** Применение электроимпульсной обработки элементов конструкций с целью повышения их ресурса (Обзор) ..... 26  
**Царюк А. К., Скульский В. Ю., Гаврик А. Р., Моравецкий С. И., Стрижиус Г. Н.** Герметизация горячезакатных баллонов из стали 20ХН4ФА с помощью сварки ..... 31  
Матвеев В. В. Восстановление вагонных колес наплавкой с предварительным отжигом поверхности катания ..... 36

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

**Рыжов Р. Н., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А., Кожухарь В. А.** Влияние внешних электромагнитных воздействий на структуру и химический состав швов при мокрой подводной сварке ..... 41  
Новости ..... 43  
Диссертация на соискание ученой степени ..... 45  
Патенты в области сварочного производства ..... 45  
По зарубежным журналам ..... 46  
Новые книги ..... 50

**ХРОНИКА**

Конференции, семинары, лекция ..... 51

**ИНФОРМАЦИЯ** ..... 61

# Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 11 (631)  
November 2005

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

Published since 1948

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

**Publisher:** International Association «Welding»

## EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

**B.E.PATON**

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

## THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)  
B. Braithwaite (UK)  
C. Boucher (France)  
D. von Hofe (Germany)  
Guan Qiao (China)  
U. Diltthey (Germany)  
P. Seyffarth (Germany)  
A. S. Zubchenko (Russia)  
T. Eagar (USA)  
K. Inoue (Japan)  
N. I. Nikiforov (Russia)  
B. E. Paton (Ukraine)  
Ya. Pilarczyk (Poland)  
Zhang Yanmin (China)  
V. K. Sheleg (Belarus)

## Address:

The E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 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. Yushkina  
*Electron galley:*  
I. S. Batasheva, A.I.Sulima,  
I. R. Naumova,  
I. V. Petushkov

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

## CONTENTS

N. E. Bauman Moscow Technical University is 175 ..... 3

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**Makhnenko V.I., Saprykina G.Yu.** Towards the problem of inter-mittent crystallization of weld metal ..... 7

**Labur T.M., Ishchenko A.Ya., Taranova T.G., Kostin V.A., Grigorenko G.M.** Specifics in initiation and propagation of cracks under the conditions of out-of-center tension of welded joints of aluminium-lithium alloy 1441 ..... 11

**Yukhimets P.S., Garf E.F., Nekhotyashchiy V.A.** Experimental grouping of method of calculation of residual life of pipeline with corrosion-induced damages ..... 17

**Ostsemin A.A., Dilman V.L.** Static strength and stressed state of mechanically-non-homogeneous butt welded joints with X-shaped edge preparation ..... 22

### INDUSTRIAL

**Lobanov L.M., Pashchin N.A., Loginov V.P., Loginova Yu.V.** Application of electro-pulsed treatment of structure elements for increase in their life (Review) ..... 26

**Tsaryuk A.K., Skulsky V.Yu., Gavrik A.R., Moravetsky S.I., Strizhius G.N.** Pressurization of hot-sealed cylinders of 20KhN4FA steel by welding ..... 31

**Matveev V.V.** Restoration of railway car wheels by hardfacing with a preliminary annealing of rolling surface ..... 36

### BRIEF INFORMATION

**Ryzhov R.N., Maksimov S.Yu., Prilipko E.A., Kozhukhar V.A.** Effect of external electromagnetic actions on structure and chemical composition of welds in wet underwater welding ..... 41

News ..... 43

Thesis for scientific degree ..... 45

Patents in the field of welding ..... 45

Review of foreign journals ..... 46

### NEWS

Conferences, seminars, lecture ..... 51

INFORMATION ..... 61

Developed at the PWI ..... 16, 21, 25

*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.*

## 175 ЛЕТ МГТУ им. Н. Э. БАУМАНА

**175-летняя история МГТУ имени Н. Э. Баумана** — это отечественная история развития научной и технической мысли, технического прогресса, подготовки кадров высшей квалификации.

За время своего существования университет выпустил более 160 тысяч инженеров. Среди воспитанников МГТУ — государственные деятели, выдающиеся конструкторы, известные ученые, руководители организаций и фирм, космонавты.

Питомцы МГТУ внесли весомый вклад в развитие отечественной и мировой науки и техники. Ими созданы первые в стране вертолет, аэродинамическая труба, тепловоз, автоматическая станочная линия, газотурбовоз, металлургическая лаборатория и др. Неоценим вклад выпускников университета в создание систем оборонной и ракетно-космической техники, в развитие машино- и приборостроения.

В 1930-е годы вуз стал родоначальником многих крупных инженерных вузов, известных научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро. МГТУ им. Н. Э. Баумана широко известен своими научными школами не только в России, но и далеко за ее пределами. У истоков их создания стояли выдающиеся личности — гордость российской науки и техники. Сегодня эти научные школы возглавляют их ученики — крупные ученые, которые посвятили свою жизнь продолжению и развитию славных традиций, заложенных учителями.



В 1830 г. в Москве было основано училище «для подготовки искусных мастеров с теоретическими сведениями», которое вскоре становится признанным центром подготовки специалистов высокой квалификации по многим направлениям развивающейся тогда техники. В 1868 г. это учебное заведение получило статус Императорского технического училища в составе механического и химического факультетов. К этому времени здесь уже сформировались передовые научно-методические системы обучения, получившие мировое признание. Стоит упомянуть, например, медаль за преуспевания на выставке в Вене (1873), золотые медали на выставках в Филадельфии (1876), Москве (1882), Париже (1900). «Русский метод обучения» заимствовали в институтах США, Франции, Германии, Великобритании. У истоков новых разделов науки, научных направлений, передовой техники стояли Н. Е. Жуковский, С. А. Чаплыгин, А. М. Бочвар, А. И. Некрасов, К. А. Круг, П. П. Лазарев, Н. С. Стрелецкий и многие другие профессора училища.

В конце XIX — начале XX вв. училище превратилось в крупный научно-исследовательский центр. В этот период были заложены основы аэродинамики, научная база инженерных расчетов в самолетостроении; основы проектирования сложных инженерных конструкций и развита теория механизмов и машин; изучены тепловые процессы и созданы методы расчета котлов и двигателей внутреннего сгорания, спроектированы первые в стране тепловозы. Значительный вклад ученые

МТУ внесли в решение промышленных проблем электротехники, в частности, электрических систем многофазных двигателей, преобразователей тока, а в последующем и в энергетическое машиностроение. Специалисты физико-технического и физико-математического профиля способствовали развитию фотометрии, рентгенокопии, радиотехники и в конечном итоге превращению МВТУ в ведущий учебный и научно-исследовательский центр приборостроения. В 1920–1930-х гг. возникают научные школы транспортных машин, гидромашиностроения, подъемно-транспортных машин и др. Одновременно интенсивно развивались и научные исследования под руководством выдающихся российских ученых, создавались передовые научные школы.

В 1917 г. одно из крупнейших учебных заведений получило название Московского высшего технического училища (МВТУ), а в 1930 г. ему было присвоено имя Н. Э. Баумана.

В первые годы советской власти в МВТУ были организованы электротехнический, аэромеханический, инженерно-строительный факультеты, а в 1930-х гг. на базе факультетов, кафедр и лабораторий был организован десяток новых учебных и научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, а МВТУ преобразовалось в Механико-машиностроительный институт им. Н. Э. Баумана (МММИ). В 1943 г. ему было возвращено прежнее название, ныне знаменитый базовый вуз, центр подготовки специалистов высшей квалификации по машиностроению и приборостроению

называется Московским государственным техническим университетом им. Н. Э. Баумана.

Что касается сварочных технологий, то уже в декабре 1897 г. в Петербурге к Н. Н. Бенардосу Императорское техническое училище командировало профессора С. Э. Кордеса. Изобретатель первого способа дуговой сварки предоставил «возможность ознакомиться с его способами и составить описание». Известный электротехник, кроме описания технических особенностей процесса, впервые сделал подробный расчет его экономической эффективности, разработал принципы расчета сварочного поста с генератором и батареей аккумуляторов. Это первое по сути научное исследование по электросварке было опубликовано более чем на 20 страницах в «Отчете Политехнического общества, состоящего при Московском техническом училище за 1881–1888 гг.» В МТУ и в последующие годы продолжали интересоваться сваркой и родственными технологиями». Так, например, в «Бюллетене Политехнического общества, состоящего при Московском техническом училище, 1893/1894, № 6, дек., с 13–20» опубликована статья А. П. Гавриленко «О применении электричества для нагревания металлов».

Подготовка профессионалов сварочного производства — технологов по сварке началась в 1929 г. в Автогенно-сварочном техникуме (Москва), созданном по инициативе Г. А. Николаева, В. П. Никитина и К. К. Хренова и других энтузиастов сварочного дела. Через два года на базе этого техникума был создан Автогенно-сварочный учебный комбинат, куда вошло первое в мире специальное высшее учебное заведение по сварке — Московский автогенно-сварочный институт (МАСИ). В мае 1931 г. МАСИ был преобразован в факультет сварочного производства МММИ им. Н. Э. Баумана. На факультете были три кафедры: электросварочного оборудования (руководитель В. П. Никитин, с 1939 г. академик АН СССР, в 1950 г. — директор училища), сварных конструкций (руководитель Г. А. Николаев, с 1979 г. академик АН СССР, ректор МВТУ им. Н. Э. Баумана с 1964 по 1985 гг.) и технологии сварки (руководитель К. К. Хренов, с 1943 г. академик АН УССР, с 1953 г. — член-корреспондент АН СССР). В 1938 г. две последние кафедры были объединены в кафедру технологии сварочного производства, которую возглавил К. К. Хренов (до 1946 г.), Г. А. Николаев был переведен на кафедру сопротивления материалов, которой заведовал с 1941 по 1947 гг. В. П. Никитин возглавил общеполитическую кафедру электротехники. Включение сварочной специализации в МММИ позволило поднять уровень знаний специалистов, в том числе и по общетехническим дисциплинам.

Вместе с тем, уже с первых лет в МММИ была развернута полномасштабная научная работа почти по всем аспектам развивающейся технологии соединений. С 1936 г. началась подготовка кандидатов наук через аспирантуру.

В. П. Никитин продолжил работы по созданию сварочного оборудования и теории электрических

источников питания для дуговой сварки. Уже первые сконструированные им трансформаторы, значительно более простые в изготовлении, чем генераторы постоянного тока, способствовали широкому внедрению дуговой сварки в промышленность. Исследования условий горения сварочной дуги, разработка обзоров электродов с оптимизацией эффективного потенциала ионизации, выполненные К. К. Хреновым на сварочной кафедре, обеспечивали устойчивость процесса сварки. Следует отметить, что к 1947 г. В. П. Никитин научно обосновал требования к источникам питания с точки зрения устойчивого горения дуги. В последующие годы в МВТУ (а также в других организациях) был накоплен обширный экспериментальный материал и развиты теории о процессах в дуге, решены уравнения электрического поля зарядов, теплопроводности газов и др. В разработку оборудования для контактной сварки большой вклад внесли исследования, выполненные О. Н. Братковой.

К мировым достижениям этого периода следует отнести: созданный К. К. Хреновым способ дуговой подводной сварки и резки (1933); разработку Г. А. Николаевым методов расчета прочности при проектировании сварных конструкций, которые нашли отражение в нормативных документах (1936) и первых учебниках по сварным конструкциям; работы Н. Н. Рыкалина (с 1968 г. академик АН СССР) по общей теории тепловых процессов при сварке (1938); оригинальные работы (1938–1939) по автоматической сварке открытой дугой голым электродом по измельченному электродному покрытию (К. К. Хренов, С. Т. Назаров и А. И. Чистяков) и др.

К концу 1930-х гг. в мире были накоплены данные по сварочным деформациям и напряжениям в элементах сварных стальных конструкций. В создании расчетных графоаналитических методов определения деформаций и напряжений значительный вклад внес Г. А. Николаев. В ЦНИИ железнодорожного транспорта под его руководством и Институте электросварки АН УССР под руководством Е. О. Патона установлено влияние сварки на прочность сварных конструкций при статических и вибрационных нагрузках.

С первых дней Великой Отечественной войны работа МММИ была направлена на производство и ремонт военной техники. К. К. Хренов продолжил исследования и разработку техники сварки и резки под водой в специальной лаборатории при Московском электромеханическом институте инженеров железнодорожного транспорта. Был создан специальный поезд, оборудованный всем необходимым для оперативных работ по освобождению рек от разрушенных мостов и их восстановлению, а также несколько станций подводной сварки для ремонта судов. В кратчайшие сроки вместе с оружейниками были разработаны конструкции артиллерийского и стрелкового вооружения с широким применением сварки (Г. А. Николаев, С. Т. Назаров, Н. Н. Прохоров и др.). Конструктор пистолета-пулемета ППШ Г. С. Шпагин отметил, что только благодаря замене сложной технологии

на штамповку и сварку удалось обеспечить Красную Армию необходимым количеством автоматов. В МММИ, как и в ряде других организаций, были созданы новые электродные покрытия из недефицитных материалов, в частности, — электродное покрытие МТ, которое позволяло сваривать сталь малой толщины (0,5...2 мм). Работы Н. Н. Рыкалина по плавлению основного металла и электродов явились основой для выбора экономичных режимов сварки.

В послевоенные годы научная школа Г. А. Николаева продолжила интенсивно развиваться. Были исследованы особенности возникновения деформаций и напряжений в зависимости от режимов сварки, типов соединений, марок сталей (И. П. Байкова, С. А. Куркин и др.). Вклад в успешное применение электрошлаковой и многослойной сварки внесла работа по определению объемных остаточных напряжений в соединениях большой толщины (В. А. Винокуров, В. С. Игнатьева) и регулированию зазора при ЭШС крупногабаритных пластин (В. А. Винокуров). Были разработаны расчетный метод определения параметров режима термообработки снятия остаточных напряжений (В. А. Винокуров) и метод борьбы со сварочными напряжениями, деформациями путем прокатки швов роликами (С. А. Куркин).

В конце 1940-х гг. в СССР впервые в мире был создан новый способ сварки — дуговая сварка плавящимся электродом в углекислом газе. За эту разработку коллектив был удостоен Ленинской премии, среди лауреатов был и профессор МВТУ д-р техн. наук А. И. Акулов.

Заложенное в первые годы направление по созданию и совершенствованию оборудования продолжало развиваться и во второй половине прошлого века. Основные работы были направлены на создание машин для контактной сварки (Н. Л. Каганов, Д. М. Шашин, А. П. Исаев) и аппаратов для дуговой сварки (А. И. Акулов, Г. Г. Чернышов и др.). В этот период научно-исследовательские и конструкторские работы завершаются решением конкретных научных и производственных проблем. В частности, была расширена область применения контактной конденсаторной сварки, разработаны оборудование и технология шовной сварки узлов и деталей приборов из композиционных материалов и нержавеющей сталей.

В 1965 г. сварочная кафедра вошла в состав факультета автоматизации и механизации производства и получила название «Машины и автоматизация сварочных процессов». Инженеров-сварщиков начали готовить по четырем специализациям: производство сварных конструкций, механизация и автоматизация сварочного производства, сварка пластмасс и склеивание материалов, контроль качества и надежность сварных соединений. По всем этим специальностям сотрудниками кафедры написаны учебники и учебные пособия, причем в основном на основе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных самими преподавателями с привлечением студентов. Однако объем исследований выходит далеко за рамки официальных дисциплин.

С 1960-х гг. сотрудники МВТУ, а также лазерного центра АН СССР, ИЭС им. Е. О. Патона, ИМЕТ им. А. А. Байкова и ряда других организаций занялись проблемами лазерной сварки, в частности, с целью достижения максимальной глубины проплавления при хорошем формировании шва. Были разработаны требования к специальным технологическим лазерным и сварочным установкам, изучены процессы сварки конструкционных сталей, титановых и алюминиевых сплавов (А. Г. Григорянц и др.). Сфера применения лазерной сварки расширялась по мере совершенствования оборудования и технологии и уже к концу 1970-х гг. этот способ сварки использовался в диапазоне соединения толщин от нескольких микрометров (в микроэлектронной промышленности) до десятков миллиметров (карданные валы двигателей).

В 1970-х гг. в МВТУ на кафедре машин и автоматизации сварочных процессов были начаты исследования по применению лазера в медицинской практике, выполненные совместно с врачами ряда медицинских институтов под руководством М. В. Волкова. Были получены положительные результаты при хирургических операциях и в терапии. Еще одно медицинское направление в работе сварщиков — применение в клинической практике методов ультразвукового соединения костей после переломов, ортопедических и торакальных операций, восстановление тканей и резки живых тканей было удостоено Государственной премии СССР в 1972 г. (академик Г. А. Николаев и д-р техн. наук В. И. Лощилов совместно с группой медиков). Обнаружено также существование в костных тканях человека и животных внутренних напряжений, независимых от внешних нагрузок (В. И. Лощилов, Г. А. Николаев и Э. П. Бабаев). Впервые в мире установлено, что такие напряжения для трубчатой кости в поверхностных слоях имеют характер сжатия, а во внутренних — растяжения. В 1979 г. совместно с 1-м Московским медицинским институтом им. И. М. Сеченова была образована самостоятельная уникальная кафедра биомедицинских систем и устройств.

В 1970-х гг. была создана теория и спроектированы (Э. А. Гладков) системы автоматического управления процессом дуговой сварки, внедренные, в частности, на Московском трубном заводе. Еще одним направлением в традиционных работах по дуговой обработке явилось исследование и разработка соответствующего оборудования для сварки, наплавки и пайки в вакууме (В. М. Ямпольский, В. В. Иванов). Технология и материалы для пайки, предложенные сотрудниками кафедры (В. И. Гирт, А. И. Киселев), позволили решить проблемы изготовления широкой номенклатуры изделий из различных материалов — от деталей электронных приборов до узлов ракетно-космической техники. И сегодня пайка продолжает интенсивно развиваться — сотрудниками МГТУ им. Н. Э. Баумана В. М. Неровным, В. М. Ямпольским разработана технология сваркопайки в вакууме с управляемым низкотемпературным источником нагрева.

Большое значение для научно-технического прогресса и решения современных проблем производства и эксплуатации инженерных сооружений имеют многолетние работы сотрудников кафедры по применению ультразвука для сварки и контроля качества швов.

Еще в 1935 г. в ММИ К. К. Хренов и С. Т. Назаров начали работы по неразрушающему контролю качества сварных швов — разработали магнитно-электрический дефектоскоп. На кафедре технологии сварки и диагностики успешно продолжаются фундаментальные научные исследования и разработка методов диагностики состояния ответственных инженерных сооружений. Еще в конце 1970-х гг. были разработаны и внедрены методы и аппаратура ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений (Н. П. Алешин, А. К. Ващанов, В. И. Киселев удостоены премии Совета Министров СССР). Среди многих работ по контролю качества следует отметить статистический анализ, статистическое управление качеством (В. Н. Волченко, Н. П. Алешин), достоверный объективный метод оценки возможной потери надежности изделий. Ультразвуковые методы обнаружения дефектов в процессе сварки строительных металлических и железобетонных конструкций являются заметным вкладом в диагностику.

Кроме упомянутых научно-исследовательских и конструкторских работ, специалистами вуза выполнено и выполняется множество актуальных тем, связанных с проблемами сварочного производства. Так, например, можно отметить создание бесконтактных датчиков и систем автоматического регулирования глубины проплавления (Э. А. Гладков, Н. С. Львов), исследования свариваемости и коррозионной стойкости и др. Ученые МВТУ участвовали в разработке ряда особых технологий. К таким можно отнести процесс резки горных пород и железобетона терморезактивными резаками (1965), процесс резки материалов порошкovo-кислородным копьем (Г. Б. Евсеев и др., 1960).

Следует отметить уникальные работы аналитического и исторического характера. В 1937 г. под редакцией Г. А. Николаева издан капитальный труд «Сварочное дело в СССР», а в 1981 г. — двухтомная монография (ответственный редактор В. А. Винокуров) «Сварка в СССР».

С 1989 г. кафедру технологии сварки и диагностики возглавляет Н. П. Алешин (чл.-кор. РАН, с 1982 г. — д-р техн. наук). Под его руководством и при его непосредственном участии продолжают развиваться основные направления исследовательских работ в области автоматизации процессов и создании новых технологий сварки, пайки, методов контроля и диагностики; развита теория дифракции упругих волн для коротковолновых

отражателей, сформулирована физическая модель и дано математическое описание акустосварочной модели крупнозернистых материалов и др.

Уместно отметить, что в течение многих десятилетий существовало и продолжает успешно развиваться в настоящее время тесное и плодотворное сотрудничество ученых и специалистов МГТУ и ИЭС им. Е. О. Патона.

Естественно, что успехи научных школ МГТУ, в том числе и сварщиков, служат не только непосредственно научно-техническому прогрессу, но и обеспечивают высокий уровень педагогической деятельности.

Одним из важных элементов методики преподавания является самостоятельная работа студентов при выполнении большого количества домашних заданий по фундаментальным (теория механизмов и машин, детали машин, электротехника и др.) и общим профилирующим дисциплинам для всех выпускников сварочной специализации (теоретические основы сварки, технология и оборудование различных видов сварки и др.). Обязательным является выполнение курсовых научно-исследовательских работ. Выпускники вуза несут на производство передовые технологии, продолжают участвовать в развитии науки, создают новую технику.

МГТУ оказывает методическую помощь преподавателям многих вузов Российской Федерации, выезжая с циклом лекций, приглашая на курсы повышения квалификации, организуя научно-методические конференции. Ведется подготовка аспирантов и докторантов. Интересен опыт МГТУ по «вовлечению» в науку школьников выпускных классов. Так, в Мордвесской средней школе № 11 под руководством сотрудников кафедры был разработан экспресс-метод оценки сопротивляемости алюминиевых сплавов образованию горячих трещин по критическому темпу деформации.

За почти 75 лет существования кафедр сварочного профиля было подготовлено почти десять тысяч инженеров, более 300 кандидатов технических наук и несколько десятков докторов технических наук. Послевузовскую подготовку прошли специалисты по таким направлениям, как лазерная технология и контроль качества сварных конструкций. Среди выпускников-сварщиков Герои Социалистического Труда, лауреаты Ленинской и Государственной премий, Премий Совета Министров СССР и Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники, государственные и общественные деятели, руководители производства. Сотрудниками кафедры написаны десятки фундаментальных монографий, учебников, справочников и сборников научных трудов.



## К ВОПРОСУ ПРЕРЫВИСТОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА СВАРНОГО ШВА\*

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО, Г. Ю. САПРЫКИНА**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен вопрос прерывистости кристаллизации металла сварочной ванны, который достаточно интенсивно дискутировался специалистами в 1970-х годах. Авторы статьи, не претендуя на исчерпывающее решение, предлагают феноменологическую модель хорошо наблюдаемых фактов.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварочная ванна, прерывистая кристаллизация, феноменологическая модель, металл шва, слоистое строение, скрытая теплота

При сварке плавлением качество металла сварного шва очень часто зависит от условий первичной кристаллизации, особенно для таких конструкционных материалов, как алюминиевые сплавы и аустенитные стали. Первичная кристаллизация металла шва этих материалов определяет степень локальной химической неоднородности, размер зерна, риск образования горячих трещин и т.п., поэтому вопросы первичной кристаллизации металла сварочной ванны привлекали [1, 2 и др.] и привлекают в настоящее время [3–5 и др.] достаточно большое внимание исследователей. Одним из наиболее неясных вопросов первичной кристаллизации металла сварочной ванны является так называемая прерывистая кристаллизация, наблюдаемая в специальных опытах [2, 5, 6], следы которой достаточно легко увидеть на простых шлифах металла шва. Примеры следов показаны на рис. 1, а–г, а прерывистость кристаллизации – на рис. 1, д, е. На рис. 1, а–г видны слои кристаллизации, разделенные границами, где скорость кристаллизации металла равна нулю.

Для низкоуглеродистой стали после  $\gamma$ - $\alpha$ -превращения в металле шва кристаллизационные слои, естественно, видны менее отчетливо. На рис. 1, д, е результаты скоростной киносъемки для конкретного момента времени (состояния) сварочной ванны позволили авторам наблюдать процесс прерывистости кристаллизации в зависимости от скорости сварки. Наблюдаемые в работе [1] реальные скорости кристаллизации существенно отличаются от классических представлений, вытекающих из рис. 2, при

$$v_{cp} = v_{cb} \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $v_{cp}$  – средняя скорость кристаллизации по «классическому» механизму.

Объяснений данному факту, кардинально изме-

няющему наши представления о первичной кристаллизации металла сварочной ванны, пока нет. В настоящей работе сделана попытка такого разъяснения в рамках феноменологической модели процесса.

**Предлагаемая феноменологическая модель прерывистой кристаллизации металла сварочной ванны.** В основе предлагаемой модели лежит допущение, что в зоне достаточно высоких градиентов температур «классический» механизм кристаллизации, когда скорость движения фронта превращения определяется изменением положения в пространстве температуры  $T_{кр} \approx T_S + T_L/2$  ( $T_S$  – температура солидуса;  $T_L$  – температура ликвидуса металла шва), вытесняется «мартенситным» механизмом, при котором кристаллизация начинается при определенном переохлаждении, т.е. при температуре  $T_{st} < T_{кр}$ , и заканчивается при соответствующем перегреве, т.е. при температуре  $T_e > T_{кр}$ .

Таким образом, в интервале температур  $T_{st} - T_e$  процесс кристаллизации является необратимым и происходит с достаточно высокой скоростью (как и мартенситное превращение аустенита в сталях при температурах ниже  $T_{st}$ ). Средняя скорость движения фронта кристаллизации по «мартенситному» механизму  $v_m$  должна быть связана со скоростью кристаллизации  $v_{кр}$  по (1) условием  $v_m = v_{кр} \xi_m$ , где  $\xi_m \geq 1,0$ . Поскольку процесс кристаллизации связан с выделением скрытой теплоты, то температура на фронте кристаллизации может повышаться, что создает предпосылку для остановки, если она достигнет температуры  $T_e$ . Существует приближенная зависимость из [4], по которой можно оценить приращение температуры  $\Delta T(h)$  в конце слоя кристаллизации толщиной  $h$

$$\Delta T(h) = \frac{q_{ck}}{c} \sqrt{\frac{h v_m}{\pi a}} - w \frac{h}{v_m} + Gh, \quad (2)$$

где  $\Delta T(h) = T_e - T_{st}$ ;  $q_{ck}$  – скрытая теплота кристаллизации, Дж/г;  $c$  – теплоемкость, Дж/(г·°C);  $a$  – температуропроводность материала, см<sup>2</sup>/с;  $w$  – скорость охлаждения в зоне кристаллизации, °C/с;  $G$  – градиент температур в той же зоне, °C/см ( $w$  и  $G$  – макроскопические характеристики по абсолютной величине). Параметр  $w$  изменяется от нуля в зоне

\* По материалам Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым, Украина).

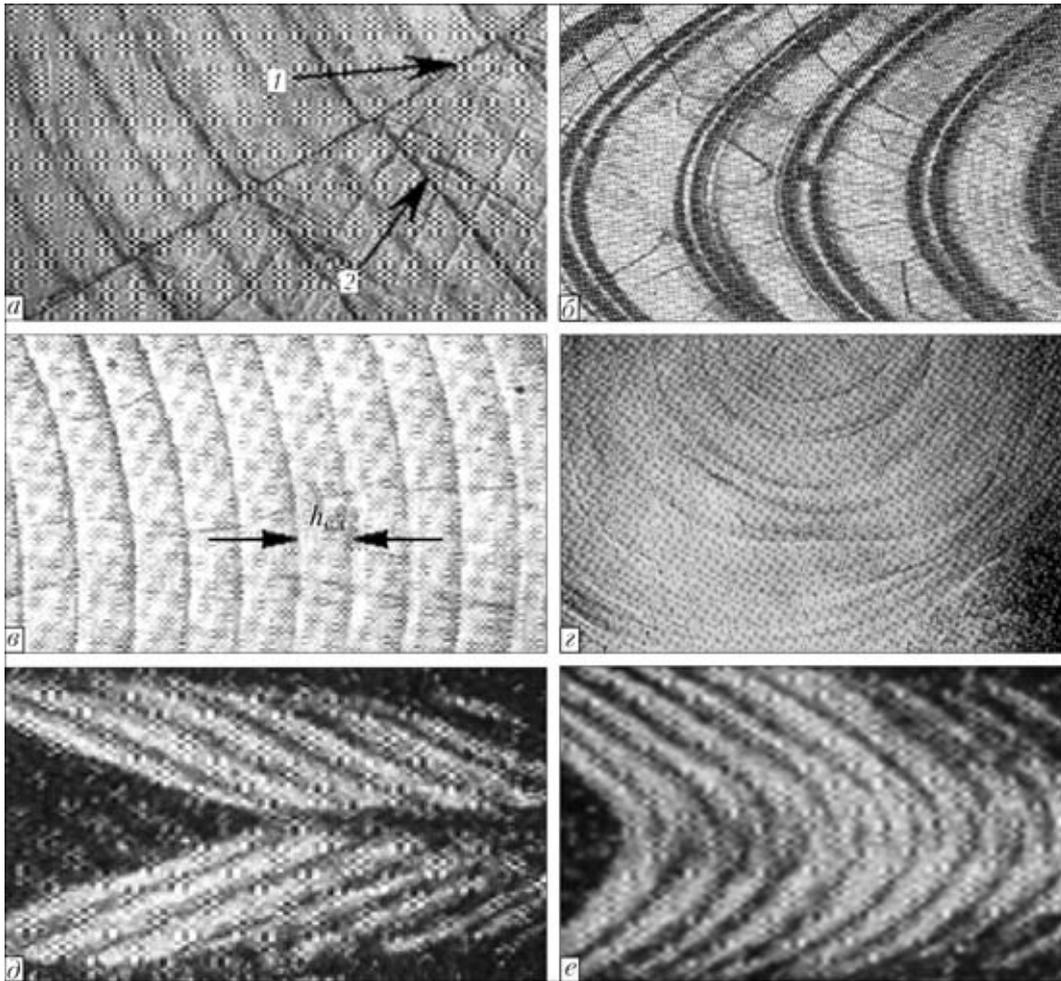


Рис. 1. Слоистое строение металла швов, выполненных сваркой плавлением: а, б – алюминий АВ000 [5, 6]; в – чистый алюминий [6]; г – низкоуглеродистая сталь [2]; д, е – сталь Х18Н10Т соответственно при  $v_{св} = 31,3$  и  $11$  м/ч [1];  $h_{сл}$  – толщина кристаллизационного слоя; 1 – граница столбчатых кристаллитов; 2 – следы фронтов кристаллизации

сплавления примерно до  $T_{пл}(v/2a)$  в хвостовой части сварочной ванны, движущейся со скоростью  $v$ . Градиент температур  $G$ , наоборот, максимальный в зоне сплавления и минимальный в хвостовой части сварочной ванны (имеется в виду градиент температур у границы сплавления со стороны жидкой части сварочной ванны). Если жидкий металл в сварочной ванне энергично перемешивается, то вполне правомочно считать, что в уравнении (2)  $G \approx 0$  и тогда толщина слоя  $h$  опре-

деляется зависимостью

$$\sqrt{\frac{hv_m}{a}} = \frac{2\sqrt{\pi}c\Delta T}{q_{ск}(1 + \sqrt{1 - Aw})}, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{4\pi ac^2}{q_{ск}^2 v_m^2} \Delta T. \quad (4)$$

Зависимость (3) имеет место, если  $Aw \leq 1$ , в противном случае процесс прерывистой кристаллизации нарушается. Для хвостовой части сварочной ванны

$$w \approx T_{пл} \frac{v^2}{Aa}. \quad (5)$$

В этом случае условие  $Aw \leq 1$  представляется соответственно в виде

$$v_m \geq v_{св} \frac{\sqrt{4\pi T_{пл} \Delta T}}{q_{ск}} c. \quad (6)$$

Для алюминия, приняв  $q_{ск} = 407$  Дж/г,  $c = 1,08$  Дж/(г·°C),  $\Delta T \approx 59$  °C,  $T_{пл} = 630$  °C, получим  $v_m \geq v_{св} \cdot 1,81$ .

Экспериментальные данные относительно слоев

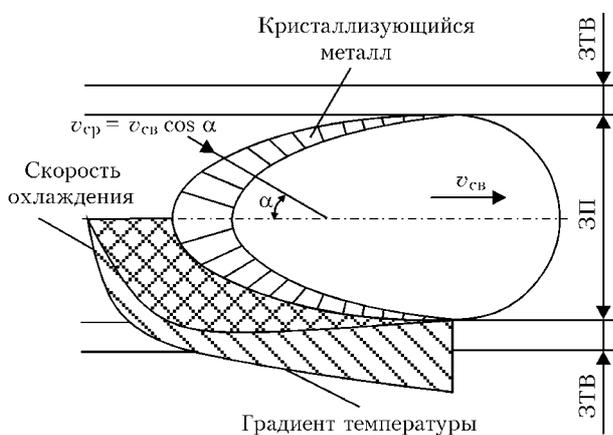


Рис. 2. Схема движущейся сварочной ванны и кристаллизации металла



кристаллизации в хвостовой части сварочной ванны при сварке чистого алюминия без присадки для  $v_{св} = 15$  м/ч показаны на рис. 1, а зависимость параметра  $h$  от различных  $v_{св}$  — на рис. 3.

Если согласно рис. 3 принять, что скорость  $v_{св}$ , при которой прерывистость нарушается в хвостовой части сварочной ванны, примерно равна 56 м/ч, то  $v_M \approx 2,8...3,0$  см/с. Тогда  $A\omega = 0,365v_{св}^2$  при  $v_M = 3,0$  см/с соответственно

$$h = \frac{0,3a}{3(1 + \sqrt{1 - 0,365v_{св}^2})^2} \quad (7)$$

Подставив различные значения  $v_{св}$  в (7), при  $a = 0,9$  см/с<sup>2</sup> получим следующие расчетные и экспериментальные толщины кристаллизационных слоев в зависимости от скорости сварки:

$v_{св}$ , см/с	0,5	0,8	1,0	1,2	1,33	1,5
$h_{расч}$ , мм	0,24	0,25	0,286	0,32	0,36	0,46
$h_{эксп}$ , мм	0,14	0,20	0,33	0,40	0,50	0,56

Как видим, этот достаточно простой расчет дает вполне хорошее согласование с экспериментом из работы [6] для хвостовой части сварочной ванны, где градиент температур  $G$  невысок и его вклад в  $h$  невелик по сравнению со скоростью охлаждения  $\omega$ .

Для получения соответствующих оценок для зоны сплавления, где высокие градиенты, использован численный алгоритм, суть которого состоит в следующем.

Процесс кристаллизации рассматривался в пространственном интервале  $l = 3(T_L - T_S)/G$ . Скорость кристаллизации по «мартенситному» ме-

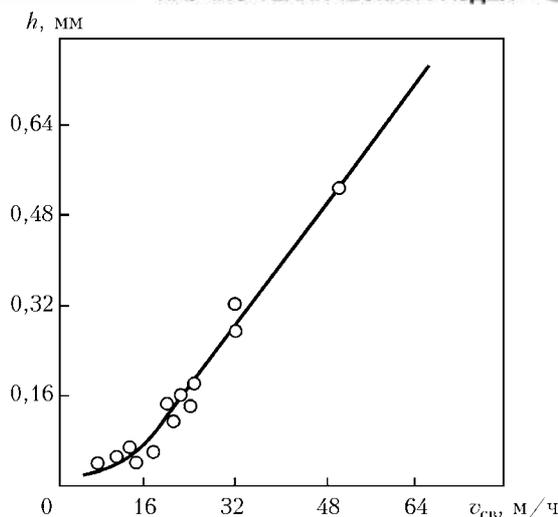


Рис. 3. Влияние скорости сварки на толщину кристаллизационного слоя [6]

ханизму значительно превышает скорость кристаллизации по «классическому» механизму, т.е.  $v_M \gg \gg v_{ср}$ , при этом на фронте выделяется скрытая теплота кристаллизации  $q_{ск}$ .

Температурное поле в процессе рассматриваемой кристаллизации определяется на отрезке  $0 < x < l$  в результате решения следующей задачи:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t) = c\gamma \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \theta \right) \quad (8)$$

где  $Q(x, t) = \frac{q_{ск}v_M\gamma}{\Delta x}$  в точке  $x = v_M t$ , а в остальных точках  $Q(x, t) = 0$ .

Таблица 1. Теплофизические свойства стали X18H10T и алюминия АМг6 [7-9]

Материал	$T_S, ^\circ\text{C}$	$T_L, ^\circ\text{C}$	$q_{ск}\gamma \cdot 10^{-6}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$c\gamma \cdot 10^{-6}$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°C)	$a$ , м <sup>2</sup> /с
X18H10T	1410	1490	2093	1,84	4,6	0,04
АМг6	570	629	879,06	0,28	2,93	0,96

Таблица 2. Параметры прерывистой кристаллизации для стали X18H10T

$G, ^\circ\text{C}/\text{см}$	$h_{сл}, \text{см}$	$\Delta t_{кр}, \text{с}$	$\Delta t_{ост}, \text{с}$	$G, ^\circ\text{C}/\text{см}$	$h_{сл}, \text{см}$	$\Delta t_{кр}, \text{с}$	$\Delta t_{ост}, \text{с}$
$v_M = 0,5$ см/с				$v_M = 2,0$ см/с			
500	0,01	0,02	0,1	500	0,0025	0,00125	0,0284
1000	0,0095	0,0185	0,054	1000	0,0025	0,00125	0,0207
1500	0,01	0,02	0,048	1500	0,0025	0,00125	0,0153
2000	0,01	0,02000	0,03800	2000	0,0025	0,00125	0,01300
2500	0,0095	0,01900	0,0310	2500	0,0025	0,00125	0,0113
3000	0,011	0,0220	0,028	3000	0,0025	0,00125	0,0105
3500	0,0115	0,02300	0,0255	3500	0,0025	0,00125	0,009
4000	0,0115	0,0237	0,0237	4000	0,0025	0,00125	0,0085
$v_M = 1,0$ см/с				$v_M = 3,0$ см/с			
500	0,005	0,005	0,053	500	0,0015	0,0005	0,0186
1000	0,0045	0,0045	0,0331	1000	0,0015	0,0005	0,0128
1500	0,0050	0,0050	0,028	1500	0,0015	0,0005	0,0102
2000	0,0045	0,0045	0,02150	2000	0,0015	0,0005	0,0087
2500	0,0045	0,0045	0,0185	2500	0,0015	0,0005	0,0075
3000	0,0045	0,0045	0,0165	3000	0,0015	0,0005	0,0068
3500	0,0045	0,0045	0,0158	3500	0,0015	0,0005	0,006
4000	0,0045	0,0045	0,0140	4000	0,0015	0,0005	0,0056



Таблица 3. Параметры прерывистой кристаллизации для АМг6

$G, ^\circ\text{C}/\text{см}$	$h_{\text{сд}}, \text{см}$	$\Delta t_{\text{кр}}, \text{с}$	$\Delta t_{\text{ост}}, \text{с}$	$G, ^\circ\text{C}/\text{см}$	$h_{\text{сд}}, \text{см}$	$\Delta t_{\text{кр}}, \text{с}$	$\Delta t_{\text{ост}}, \text{с}$
$v_m = 0,5 \text{ см/с}$				$v_m = 2,0 \text{ см/с}$			
150	0,4	0,8	0,54	150	0,068	0,034	0,212
250	0,71	1,420	–	250	0,07	0,035	0,16
350	0,51	1,020	–	350	0,07	0,033	0,128
450	0,40	0,80	–	450	0,07	0,035	0,11
500	0,35	0,74	–	500	0,073	0,037	0,107
1000	0,18	0,36	–	1000	0,12	0,06	0,1
1500	0,12	0,24	–	1500	0,1200	0,060	–
2000	0,09	0,18	–	2000	0,090	0,045	–
$v_m = 1,0 \text{ см/с}$				$v_m = 3,0 \text{ см/с}$			
150	0,15	0,15	0,36	150	0,05	0,017	0,157
250	0,15	0,15	0,26	250	0,05	0,017	0,124
350	0,15	0,15	0,2	350	0,05	0,017	0,099
450	0,28	0,28	0,210	450	0,05	0,017	0,087
500	0,30	0,30	0,066	500	0,05	0,017	0,081
1000	0,18	0,18	–	1000	0,05	0,017	0,05
1500	0,12	0,12	–	1500	0,08	0,027	0,066
2000	0,09	0,09	–	2000	0,08	0,027	0,053

Уравнение (8) решается при таких условиях:

$$t = 0; T = T_S + Gx \text{ при } 0 < x < l/3, \\ T = T_L \text{ при } l/3 < x < l; \quad (9)$$

$$t > 0; T = T_S - \theta t \text{ при } x = 0, \\ T = T_L - \theta t \text{ при } x = l. \quad (10)$$

При  $t = l/3$   $v_m = t^*$ , т.е. процесс кристаллизации слоя заканчивается, если  $T\left(\frac{1}{3}, t^*\right) < T_L$ , то  $t_{\text{ост}} = 0$ , если  $T\left(\frac{1}{3}, t^*\right) > T_L$ , то ведем расчет до момента  $t^{**}$ , когда  $T\left(\frac{1}{3}, t^*\right) = T_L$ .

Длительность остановки движения кристаллизационного фронта определяется в виде  $\Delta t_{\text{ост}} = t^{**} - t^*$ .

В статье представлены результаты расчета для зоны сплавления при кристаллизации для стали Х18Н10Т и алюминия АМг6.

Расчет проведен при постоянных теплофизических характеристиках в рассматриваемой области температур (см. табл. 1).

С помощью приведенного алгоритма получены расчетные данные, сведенные в табл. 2 и 3.

## Выводы

1. Для описания процесса образования кристаллизационных слоев следует привлекать модель кристаллизации, базирующуюся на «мартенситном» механизме образования твердой фазы, при котором выделение скрытой теплоты кристаллизации  $q_{\text{ск}}$  способствует остановке кристаллизационного фронта.

2. Разработана математическая модель прерывистой кристаллизации металла сварного шва, которая позволяет расчетным путем оценить параметры прерывистой кристаллизации ( $\Delta t_{\text{ост}}$ ,  $\Delta t_{\text{кр}}$ ,  $h_{\text{сд}}$ ) при заданных  $G$  и  $v_m$ .

3. Аprobация модели была проведена для конструкционных материалов (стали Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМг6). Полученные результаты с достаточной точностью совпадают с экспериментальными данными.

1. Дятлов В. И., Абралов М. А., Шнайдер Б. И. Первичная кристаллизация жидкой ванны при сварке металлов малых толщин // Автомат. сварка. — 1967. — № 1. — С. 26–30.
2. Петров Г. Л. К вопросу о распределении ликвирующих примесей в закристаллизованном металле сварных швов // Тр. Ленинград. политехн. ин-та им. М. И. Калинина. — 1961. — № 216. — С. 83–101.
3. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1: Свариваемость материалов / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — С. 97–105.
4. Махненко В. И. Перспективы развития математического моделирования и информационных технологий в сварке и родственных процессах // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. междунар. конф., 16–20 сент. 2002 г., Кацивели, Крым, Украина. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. — 2002. — С. 3–11.
5. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 695 с.; — 1976. — Т. 2. — 600 с.
6. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 264 с.
7. Махненко В. И., Кравцов Т. Г. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров. — Киев: Наук. думка, 1976. — 160 с.
8. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
9. Судник В. А. Прогнозирование качества сварных соединений на основе численных моделей формирования шва при сварке плавлением тонкостенных конструкций: Дис. ... д-ра техн. наук. — Тула, 1991. — 348 с.

Considered is the issue of intermittent crystallization of the weld pool metal, which was very intensively discussed by specialists in the 1970s. Not claiming to provide a comprehensive solution, the authors of the paper offer the phenomenological model of the readily observed facts.

Поступила в редакцию 18.01.2005



УДК 621.791:669.71

# ОСОБЕННОСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В УСЛОВИЯХ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441

**Т. М. ЛАБУР**, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины **А. Я. ИЩЕНКО**,  
**Т. Г. ТАРАНОВА**, **В. А. КОСТИН**, кандидаты техн. наук, чл.-кор. НАН Украины **Г. М. ГРИГОРЕНКО**  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлены особенности зарождения и распространения трещин при разрушении металла в ЗТВ сварных соединений алюминий-литиевого сплава 1441 в зависимости от теплофизических условий сварки и объемной доли выделяющихся фаз. Показано, что появление очагов разрушения связано с увеличением объемной доли фаз в структуре в виде грубых образований. Установлено, что скорость охлаждения металла при сварке плавлением влияет на показатель энергии зарождения трещины в сплаве.

*Ключевые слова:* сварка плавлением, алюминий-литиевый сплав, теплофизические условия, зона термического влияния, образец-имитатор, механика разрушения, внецентренное растяжение, фраттография

Изменение структуры металла под воздействием термического цикла сварки оказывает влияние на свойства сварных соединений и характеристики разрушения [1–5]. При этом механизм разрушения значительно отличается от процессов, происходящих в основном металле. Многие факторы, вызывающие образование и рост микротрещин в структуре конструкционных материалов, учитываются теоретическими моделями разрушения, отражающими взаимосвязь макроскопических характеристик разрушения с параметрами микроструктуры [6–15].

Исследователи отмечают [16–29] у алюминий-литиевых сплавов преобладание вязкого характера разрушения, механизм которого связан с формированием ямок (пустот) и последующим их слиянием в процессе реализации пластической деформации. Размер ямок определяется диаметром зерна и расстоянием между неметаллическими включениями (НВ). Однако зачастую на изломах высокопрочных алюминий-литиевых сплавов обнаруживают смешанное распределение мелких и крупных ямок [22–27]. Применительно к структурам сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов подобных исследований недостаточно, что, возможно, связано с наличием в сварном соединении структурных зон, отличающихся между собой объемной долей фаз, их формой и размерами (рис. 1).

Для металла шва характерна литая структура. В зоне сплавления (ЗС) в условиях кратковременного нагрева до температур, превышающих ликвидус, происходит частичное оплавление основного металла и образуется небольшое количество вытянутых и компактных частиц. Вблизи ЗС находится область закалки, где при нагреве зафиксировано растворение легирующих элементов. Распад

твердого раствора и образование структурных фаз на этом участке сварного соединения зависят от источника нагрева и температурно-временных параметров сварки [8].

Вблизи зоны закалки находится участок, где образуются вытянутые и сферические частицы различных фаз, возникшие при нагреве до температуры отжига. Затем идет зона дополнительного старения, где вследствие фазовых превращений, обусловленных неустойчивым состоянием твердого раствора, дополнительно выделяются фазы, обеспечивающие упрочнение сплава. Повышение погонной энергии при сварке плавлением способствует увеличению протяженности зоны термического влияния (ЗТВ) от 4 до 12 мм. Количество упрочняющих фаз в объеме зерна при этом сокращается, а в межзеренном промежутке при увеличении его ширины количество эвтектических фаз возрастает. Они представляют собой сложное соединение, состоящее, как правило, из двойных и тройных компонентов легирования.

Пристальное внимание исследователей к таким фазам в структуре сварных соединений обуслов-

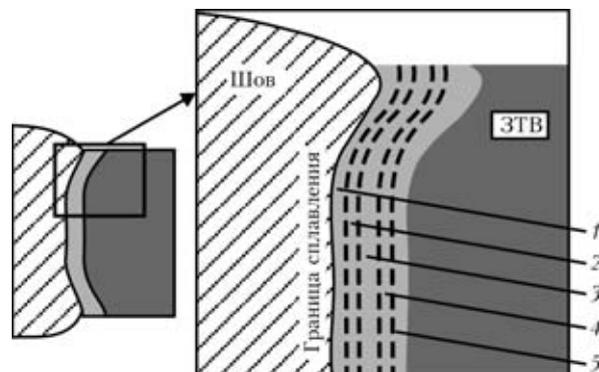


Рис. 1. Схема сварного соединения с различными структурными зонами, образующимися при сварке плавлением алюминий-литиевого сплава: 1 – перегрев; 2 – закалка; 3 – отжиг; 4 – отпуск; 5 – старение

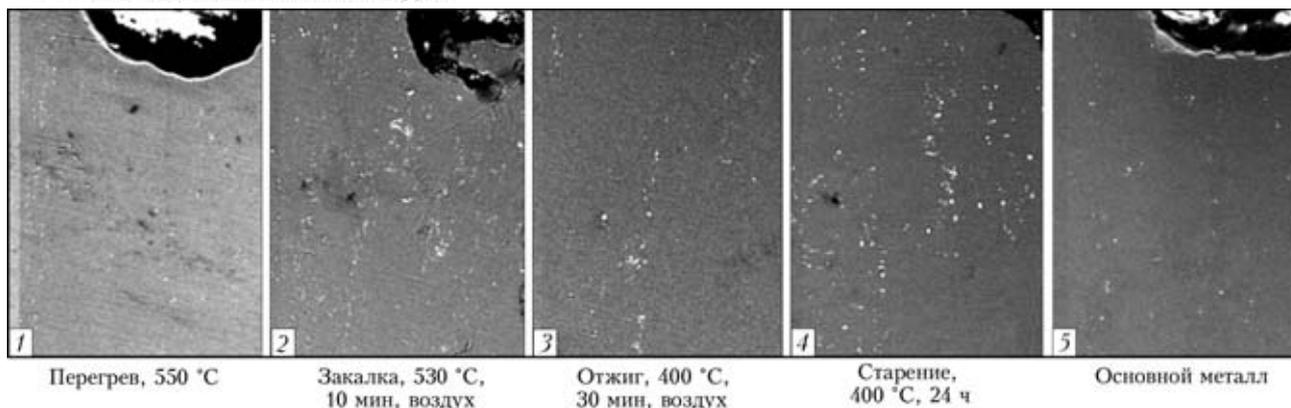


Рис. 2. Влияние условий нагрева, имитирующих ЗТВ при СНЭ, на усредненную объемную долю НВ ( $\times 200$ ), %: 1 – 0,42; 2 – 0,60; 3 – 0,40; 4 – 0,80; 5 – 0,25

лено тем, что в ряде работ [7–15] сообщается об инициировании ими хрупкого разрушения путем зарождения микротрещин и последующей коалесценции при их распространении в процессе разрушения, особенно если они располагаются по границам зерен. Существенную роль в зарождении разрушения играют НВ, попадающие в сплав при изготовлении полуфабриката. Особенно это касается алюминиево-литиевых сплавов, например типа 1441, содержащих 1,9 мас. % Li, 1,7 мас. % Cu, 0,9 мас. % Mg, 0,1 мас. % Sc и включения упрочняющих фаз многокомпонентного состава, расположенных параллельно направлению прокатки [1–3, 10–15]. Данные о количественных параметрах структурных составляющих, наличие которых является одним из основных факторов зарождения трещины, отсутствуют.

Для выявления роли структурных составляющих, изменяющихся в условиях технологических нагревов, на процессы образования трещин при разрушении сварных соединений необходим новый методологический подход. Использование количественных и качественных характеристик, полученных методом растровой микроскопии, совместно с показателями механики разрушения позволит интерпретировать свойства металла отдельных зон сварных соединений и тем самым получить данные о природе и отдельных аспектах разрушения.

Представляется целесообразным исследовать также закономерности формирования структуры в зоне нагрева при различных способах сварки с разной погонной энергией, а также определить влияние структурной и физической неоднородности на зарождение трещин и характер их распространения путем моделирования на образцах-имитаторах термического цикла сварки.

Режимы нагрева таких образцов выбирали исходя из термокинетической диаграммы превращения исследуемых сплавов при аргодуговой сварке неплавящимся электродом (СНЭ) и электроно-лучевой сварке (ЭЛС), широко используемых при изготовлении легких конструкций из алюминиевых сплавов [1–10].

Образцы испытывали в условиях внецентренного растяжения, что позволило, помимо изучения структуры металла ЗТВ сварного соединения, определить характеристики сопротивления разрушению отдельных его участков и установить влияние

характера распределения грубых частиц и их объемной доли на условия и параметры зарождения и распространения трещин.

Для количественного определения объемной доли НВ в структуре высокопрочного сложнолегированного алюминиевого сплава 1441 использовали компьютерную программу Image Pro30, позволяющую выделять характерные элементы структуры на основании цветового контраста с последующей математической обработкой. В сочетании с программой Statistica 5.0 она дает возможность обрабатывать полученные результаты по одному из статистических подходов и на их основе строить графические зависимости влияния объемной доли НВ на физико-механические свойства металла различных участков ЗТВ.

Полученные результаты показали, что перегрев сплава 1441, происходящий при сварке в ЗС (рис. 2), приводит к повышению объемной доли НВ в среднем до 0,422 %, увеличению количества вытянутых частиц, а также к оплавлению зерен основного металла. Указанное явление хорошо согласуется с данными работы [1]. Объемная доля НВ в этом участке сварного соединения в 1,5... 2,5 раза выше, чем аналогичный показатель металла в исходном состоянии (0,28 об. %). Разброс значений составляет около 100 %, что может быть связано со значительной гетерогенностью сплава, возникшей вследствие незавершенности процесса рекристаллизации, протекающей при 550 °С в течение 3 с.

При нагреве образцов до температуры закалки (530 °С) с выдержкой 10 мин и последующим охлаждением в воде происходит растворение легирующих элементов и выделение частиц фаз в объеме зерен и на границе между ними, что вызывает увеличение объемной доли НВ на 0,18... 0,42 %. В условиях охлаждения на воздухе, происходящего при СНЭ, прирост упрочняющих фаз увеличивается в 2 раза по сравнению с охлаждением в воде, моделирующим условия ЭЛС. Разброс объемной доли упрочняющих фаз в металле сокращается в 3 раза, что, возможно, связано с температурно-временными условиями, сопровождающимися быстрым охлаждением и неполным перераспределением легирующих элементов и примесей при образовании соответствующих фаз.

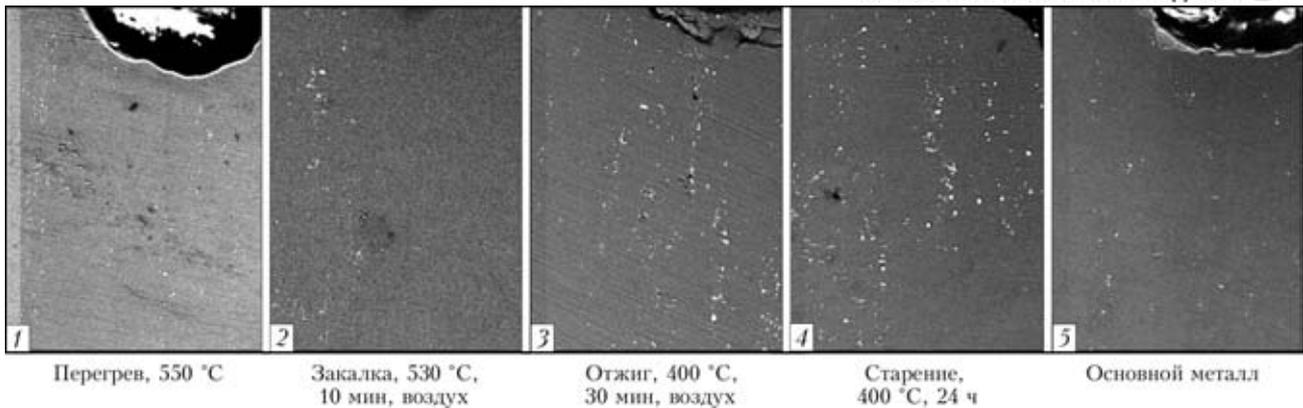


Рис. 3. Влияние условий нагрева, имитирующих ЗТВ при ЭЛС, на усредненную объемную долю НВ (X200), %: 1 – 0,42; 2 – 0,54; 3 – 0,60; 4 – 0,80; 5 – 0,25

Аналогичное влияние условий нагрева на объемную долю указанных фаз зафиксировано при охлаждении сплава с температурой отжига 360 °C в течение 20 мин. Меньшая скорость охлаждения при ЭЛС хотя и вызывает интенсивное выделение избыточных фаз из пересыщенного твердого раствора, но сдерживает процесс образования грубых частиц. Объемная доля фаз при этом на 20 % меньше по сравнению со структурой сплава после охлаждения на воздухе (рис. 3).

Объемная доля НВ на участке ЗТВ, где металл в условиях термического цикла сварки претерпевает дополнительное старение, возрастает вдвое, что согласно данным работы [14] вызвано выделением тройных фаз  $T_B$  ( $Al_{15}Cu_8Li_2$ ),  $T_1$  ( $Al_2CuLi$ ),  $T_2$  ( $Al_6CuLi_3$ ), упрочняющих сплав 1441. Выделяется и S-фаза ( $Al_2CuMg$ ), аналогичная по своей природе фазе  $T_1$ , поэтому наблюдается наибольший эффект упрочнения. Объемная доля НВ при этом составляет 0,818 %. Выделение указанных фаз в процессе старения металла приводит к уменьшению содержания лития, меди и магния в твердом растворе. Разброс значений составляет до 100 %.

Как показали эксперименты (таблица), объемная доля НВ в исследуемом сплаве 1441 оказывает значительное влияние на характеристики сопротивления разрушению (номинальное разрушающее напряжение  $\sigma_p$ ; критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$ ; энергию зарождения трещин  $J_c$ ; удельную работу распространения трещин (УРРТ)). Термические условия, возникающие при сварке плавлением, существенно влияют на характер зарождения и распространения трещин при разрушении. Процессы фазовых превращений и выделения НВ в межзеренное пространство приводят к формированию в каждой из исследуемых зон неодинаковых по объему, форме и размерам структурных составляющих.

Как видно из таблицы, показатели характеристик сопротивления хрупкому разрушению сплава 1441 в этой зоне изменяются в зависимости от условий нагрева и охлаждения. Объемная доля НВ, образующихся при этом, определяет не только уровень внутренних напряжений в металле, но и влияет на зарождение и рост трещины в металле. Следовательно, одним из возможных путей

улучшения характеристик вязкости разрушения без снижения прочностных свойств сварных соединений сплава 1441 может быть увеличение скорости сварки. Меньшее количество НВ при нагреве до 530 °C в течение 10 мин несколько (на 5...7 %) снижает уровень разрушающего напряжения при этом в 1,5...2,0 раза увеличиваются значения  $K_c$  и  $J_c$  по сравнению с металлом в исходном состоянии.

В условиях отжига, когда в металле происходят полный распад твердого раствора и коагуляция упрочняющих фаз, имеет место снижение уровня разрушающего напряжения (см. таблицу). Сплав в этом состоянии характеризуется наиболее низкой прочностью (263...268 МПа) при разрушении и удельной пластичностью ( $J_c = 8,9...9,1$  Дж/см<sup>2</sup> и УРРТ = 2,6...3,1 Дж/см<sup>2</sup>). Значения интенсивности напряжения  $K_c$  изменяются в пределах 14,6...16,8 МПа√м в зависимости от скорости охлаждения, влияющей на объемную долю НВ и характер распределения частиц вдоль границ зерен. Минимальный уровень интенсивности напряжений в сплаве 1441 зафиксирован в состоянии одноэтапного старения ( $K_c = 10,3$  МПа√м), что обусловлено образованием большей объемной доли НВ (см. рис. 2 и 3).

С помощью фрактографического анализа образцов сплава 1441, разрушенных в ходе испытания при внецентренном растяжении, установлено, что механизм зарождения и распространения трещин определяется не только химическим составом сплава, но и температурно-временными условиями термического цикла сварки. В зависимости от этого

Характеристики вязкости разрушения сплава 1441 в зависимости от условий нагрева (имитация ЗТВ сварных соединений)

Условия обработки сплава	$\sigma_p$ , МПа	$K_c$ , МПа√м	$J_c$ , Дж/см <sup>2</sup>	УРРТ, Дж/см <sup>2</sup>
Перегрев (ЗС) (550 °C, 3 с)	372	19,4	14,2	3,7
Закалка (460 °C, 10 мин)	394 / 372	21,6 / 19,4	17,0 / 7,2	4,8 / 3,7
Отжиг (360 °C, 20 мин)	268 / 263	16,8 / 14,6	9,1 / 8,9	3,1 / 2,6
Старение (150 °C, 24 ч)	441	10,3	8,9	1,6
Основной металл	453	10,3	10,1	1,6

Примечание. В числителе приведены результаты испытаний образцов после нагрева и охлаждения в воде, моделирующих термические условия ЭЛС, в знаменателе — после нагрева и охлаждения на воздухе, моделирующих термические условия СНЭ.

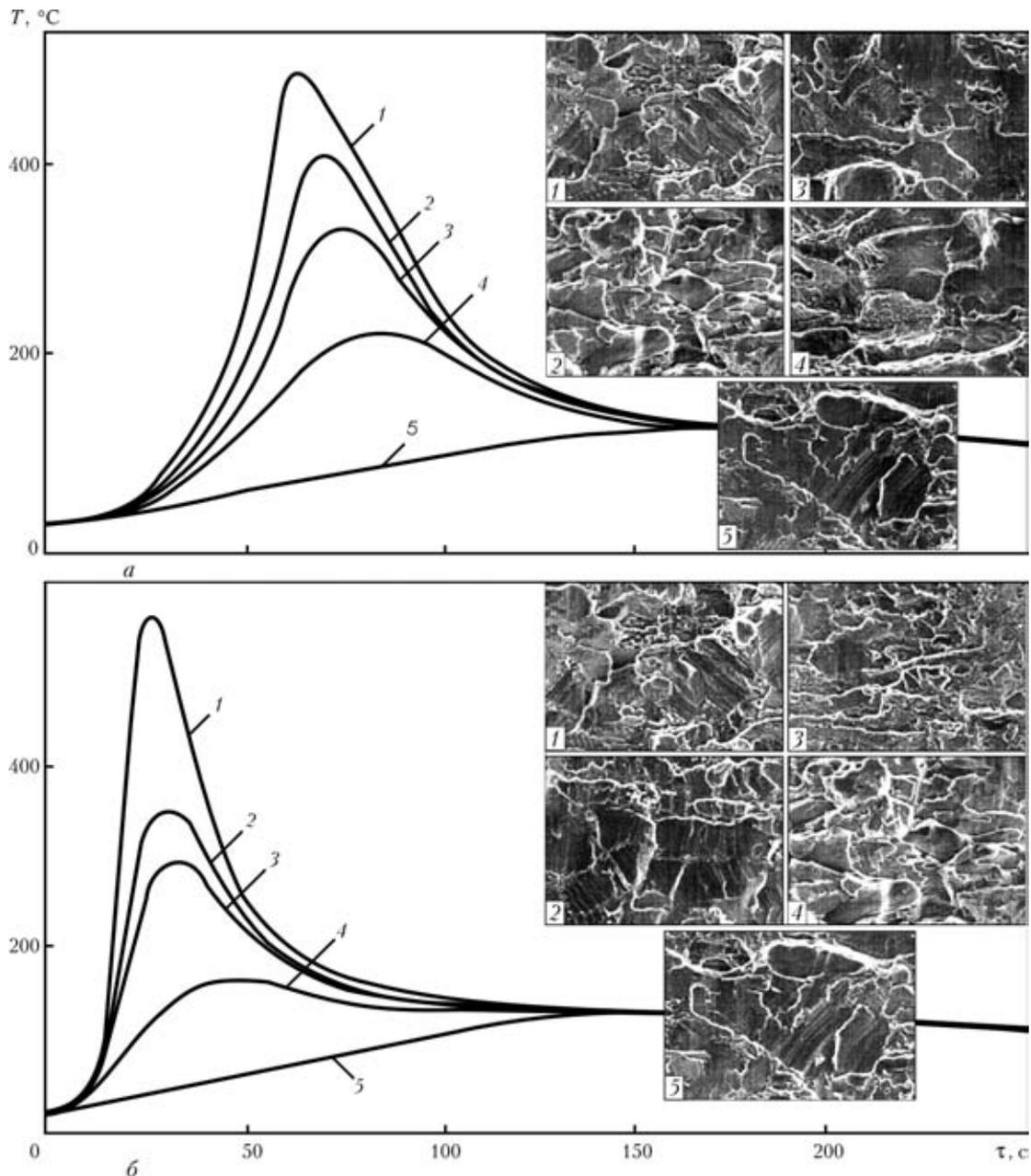


Рис. 4. Влияние моделируемых термических условий металла ЗТВ при СНЭ (а) и ЭЛС (б) на характер разрушения образцов из сплава 1441 ( $\times 500$ ) ( $\tau$  — время нагрева в зоне): 1 — перегрев; 2 — закалка; 3 — отжиг; 4 — старение; 5 — основной металл

в структуре металла на границе зерен могут появляться горячие трещины или грубые выделения фаз различной формы (протяженные, в виде эллипса, сферические). Неодинаковые размеры микропустот, образовавшихся при растрескивании грубых фазовых включений, свидетельствуют о поэтапном характере их разрушения в процессе деформирования матрицы, происходящем до того момента, пока длина фрагментов не достигнет критических размеров.

Поверхность разрушенного образца в состоянии перегрева характеризуется косым изломом, указывающим на разрушение по механизму реза под действием касательных напряжений, когда происходит образование вязких ямок (рис. 4, а, поз. 1). Их небольшие размеры и наличие участков скола, декорированных линиями скольжения, свиде-

тельствуют о локальном характере деформации, происходящей вдоль плоскостей скольжения в зерне с постепенным переходом на границу зерен.

В межзеренном промежутке обнаруживаются специфические пустоты, напоминающие «горячие трещины», образовавшиеся вследствие разрушения хрупкой эвтектики. Протяженность зоны пластической деформации, расположенной вблизи центра напряжения и характеризующейся свойствами структурных составляющих, НВ, фаз, которые изменяются в зависимости от температурно-временных параметров сварки, составляет 1,83 мм. Эта зона содержит большое количество плоских участков, на поверхности которых зафиксированы линии скольжения.

В закаленном сплаве, охлажденном на воздухе от температуры 530  $^{\circ}\text{C}$  и имеющем также локальный



характер деформаций, обнаружены горячие трещины и грубые выделения фаз (рис. 4, б). На рельефе пластической зоны на плоскостях зерен зафиксированы гребни в виде полос, пересекающихся с деформационными линиями, образованными в ходе интенсивной пластической деформации зерен. Это обусловлено, вероятно, перераспределением напряжений, механизмом релаксации которых является зернограничное проскальзывание [15].

При охлаждении образца, нагретого до температуры закалки в воде, изменяется направление магистральной трещины, что свидетельствует о возникновении более высокого уровня напряжений, при котором происходит зарождение трещины. Кроме того, в данном образце отсутствуют горячие трещины и признаки текстуры, имеющие место в металле, охлажденном на воздухе. Значительно меньше в плоскости излома образца легкоплавкой составляющей, хотя и сохраняется тот же механизм разрушения. Зона пластической деформации достаточно протяженная (3,61 мм), однако участков скола здесь больше; они образуют ступеньки (рис. 4, б, поз. 2).

Нагрев сплава 1441 до температуры отжига 360 °С с последующим охлаждением на воздухе в 3 раза сокращает протяженность пластической зоны (1,32 мм) по отношению к закаленному металлу. Для ее рельефа характерно значительное количество участков скола, окаймленных невысокими гребнями (рис. 4, а, б, поз. 3), а также наличие неглубоких пор. Охлаждение образца в воде при моделировании указанного состояния металла в ЗТВ в условиях ЭЛС приводит к сокращению протяженности пластической зоны (рис. 4, б, поз. 3), в которой появляется больше вязких фрагментов. Трещины же между зернами сохраняются вследствие повышенной хрупкости эвтектики, сформировавшейся в условиях нагрева. Вследствие разрушения по механизму образования пор с последующей их коалесценцией она становится очагом зарождения трещины.

Излом образца в состоянии перестаривания наряду с мелкими ямками содержит участки квазискола, полосы скольжения, возникшие в результате интеркристаллитного разрушения (рис. 4, а, поз. 4), что свидетельствует о высокой скорости распространения магистральной трещины из-за дополнительного упрочнения металла по сравнению с предыдущими режимами нагрева. Легкоплавкая эвтектика в таких условиях растрескивается и происходит зарождение трещины.

Протяженность пластической зоны основного металла составляет 0,64 мм. Это меньше, чем у образцов, нагретых по режимам термического цикла ЭЛС и СНЭ. Излом образца имеет характерный узор в виде линий различной протяженности и ориентации. Они образуются при переходе от одного зерна к другому вследствие изменения кристаллографии скольжения, преодоления трещиной поверхности границ на данном участке структуры, а также неоднородной деформации в пределах границ зерна. Неблагоприятные условия, возникающие при этом, не позволяют напряжению пластически релаксировать в межзеренном промежутке, поэтому

легкоплавкая эвтектика, имеющая повышенную хрупкость, становится очагом зарождения трещины, распространение которой происходит с низкой энергией (см. таблицу) и интеркристаллитно (рис. 4, а, поз. 5).

## Выводы

1. Выявлена взаимосвязь между параметрами, характеризующими процесс разрушения высокопрочного сложнотермического алюминиево-литиевого сплава 1441 в ЗТВ, и изменением объемной доли НВ в структуре при сварке плавлением.

2. Скорость охлаждения металла при сварке плавлением существенно влияет на энергию зарождения трещины в сплаве. Малая скорость охлаждения при СНЭ снижает значение  $J_c$  в 2,5 раз после нагрева до температуры закалки.

3. Механизм зарождения и распространения трещин, а также изломы разрушенных образцов сплава 1441 определяются структурными изменениями, обусловленными теплофизическими условиями сварки. Появление очагов разрушения связано с увеличением объемной доли выделившихся при сварке фаз, имеющих вид грубых образований, расположенных вдоль границ зерен. Объемная доля фаз, содержащихся в сплаве, определяет характер напряженного состояния в металле и связанный с ним механизм разрушения, а также оказывает влияние на характеристики вязкости разрушения на всех этапах развития трещины.

1. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // *Технология легких сплавов*. — 2002. — № 4. — С. 12–17.
2. Фридляндер И. Н., Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы в авиационных конструкциях // *Технолог. системы*. — 2000. — № 1. — С. 5–17.
3. Давыдов В. Г. Металловедческие и технологические исследования алюминиево-литиевых сплавов на современном этапе // *Технология легких сплавов*. — 1997. — № 5. — С. 15–25.
4. Ищенко А. Я., Лабур Т. М., Лозовская А. В. Алюминий-литиевые сплавы для сварных конструкций аэрокосмической техники // *Автомат. сварка*. — 1995. — № 7. — С. 41–44.
5. Фудзивара Т. Технологии соединения легких металлов в авиационной и космической технике // *Кэйкиндзоку ёсэцу*. — 2001. — 39, № 3. — С. 1–11.
6. Kiyoto S. Materials and joining technologies for rocket structures // *J. Jap. Weld. Soc.* — 1993. — 62, № 8. — P. 46–52.
7. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. Технология сварки и свойства соединений алюминиево-литиевых сплавов (обзор) // *Автомат. сварка*. — 1998. — № 7. — С. 29–33.
8. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1460 // Т. М. Лабур, А. А. Бондарев, А. В. Лозовская и др. // *Там же*. — 2001. — № 7. — С. 12–16.
9. Лабур Т. М. Повышение надежности сварных соединений конструкций аэрокосмической техники из алюминиево-литиевых сплавов // *Технолог. системы*. — 2003. — № 2. — С. 71–79.
10. *Сварка в самолетостроении* / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — Киев: МИИЦВ, 1998. — 695 с.
11. Лещинер Л. Н., Латушкина Л. В., Федоренко Т. П. Ресурсный высокотехнологичный сплав 1441 пониженной плотности системы Al–Cu–Mg–Li // *Технология легких сплавов*. — 1994. — № 3/4. — С. 38–42.
12. *Свариваемость* листовых полуфабрикатов сплава 1440 // Н. Г. Третьяк, Р. В. Илюшенко, М. Р. Яворская и др. // *Автомат. сварка*. — 1995. — № 4. — С. 27–30.
13. *Свойства* полуфабрикатов из высокотехнологичного Al–Li сплава 1441 / И. Н. Фридляндер, В. В. Садков, В. С.



- Сандлер, Т. П. Федоренко // Технология легких сплавов. — 2000. — № 4. — С. 24–27.
14. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 639 с.
  15. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И. Н. Фридляндер, К. В. Чустов, А. Л. Березина, Н. И. Колобнев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.
  16. Брок Д. Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
  17. Васильченко Г. С., Котелев П. Ф. Практическое применение механики разрушения для оценки прочности конструкций. — М.: Наука, 1974. — 148 с.
  18. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. — М.: Наука, 1989. — 230 с.
  19. Иванова В. С., Ботвина Л. Р., Кудряшов В. Г. Прочность и пластичность. Разрушение под действием кратковременных нагрузок. Вязкое и хрупкое разрушение. — М., 1971. — С. 54–102. — (Итоги науки и техники. Сер. Металловедение и терм. обработка).
  20. Кис Дж. А., Смит Х. Л., Ромайн Х. Э., Бернштейн Х. Испытание сварных швов на разрушение // Прикладные вопросы вязкости разрушения. — М.: Мир, 1968. — С. 442–477.
  21. Кишкина С. И. Сопrotивление разрушению алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 280 с.
  22. Клевцов Г. В. Кинетика образования зон пластической деформации у вершины трещины при разрушении конструкционных материалов в условиях плоско напряженного состояния и плоской деформации // Пробл. прочност. — 1993. — № 4. — С. 57–63.
  23. Микляев П. Г., Рудницкий Е. Н. Методика определения параметров вязкости разрушения анизотропных материалов // Зав. лаб. — 1980. — 46, № 3. — С. 265–268.
  24. Нештор Г. С., Микляев П. Г., Андреев Д. А. О возможности унификации методики определения вязкости разрушения при плоском напряженном состоянии // Там же. — С. 261–265.
  25. Гордеева Т. А., Жегина И. П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 199 с.
  26. Фрактография и вязкость разрушения алюминиевых и титановых сплавов / В. С. Иванова, В. Г. Кудряшов, Б. А. Конелович, Ю. К. Штовба // Технология легких сплавов. — 1974. — № 3. — С. 65–70.
  27. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении, классификация видов поверхностей разрушения (изломов) металлов. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 45 с.
  28. Романив О. Н. Структурная механика разрушения — новое перспективное направление в проблеме разрушения металлов // Физико-хим. механика материалов. — 1981. — № 4. — С. 28–32.
  29. Фрактография и атлас фрактограмм: Справочник / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1982. — 489 с.

Peculiarities of initiation and propagation of cracks at fracture of metal in HAZ of welded joints on aluminium-lithium alloy 1441, depending upon the thermal-physical welding conditions and volume content of precipitating phases, have been studied. It is shown that formation of fracture centres is related to increase in the volume content of coarse phases present in metal structure. It has been established that the rate of metal cooling in fusion welding affects the value of the energy of initiation of crack in the alloy.

Поступила в редакцию 17.12.2004

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА $\gamma$ -АЛЮМИНИДА ТИТАНА

Разработана технология электронно-лучевой сварки жаропрочного сплава Ti-48Al-2Nb-2Mn, найдены технологические решения, обеспечивающие свойства сварных соединений, близкие к соответствующим характеристикам основного металла.

Установлено, что для предупреждения образования холодных трещин в швах требуется предварительный подогрев деталей до 400...500 °С. Для снижения уровня остаточных напряжений необходимо непосредственно после сварки производить отжиг сварных соединений при температуре 800...900 °С в течение 10...15 мин. При этом как предварительный подогрев, так и последующий отжиг выполняются электронным лучом.

Полное устранение структурной неоднородности в сварном соединении с образованием дуплексной структуры и получение высоких механических свойств обеспечивает длительный отжиг (25 ч) в вакуумной печи при температуре 1260 °С.

Испытания механических свойств сварных соединений, выполненных по разработанной технологии, дали следующие результаты:

- основной металл —  $\sigma_B = 480...540,4$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 457,5...469,5$  МПа;
- сварное соединение —  $\sigma_B = 513...528$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 480,8...499$  МПа.

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 287 13 66  
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua; ret99@ret99.kiev.ua



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

П. С. ЮХИМЕЦ, канд. техн. наук, Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Для проверки предложенной методики расчета остаточного ресурса трубопроводов с учетом поверхностных дефектов выполнены испытания двух натурных образцов с углублениями в виде полуэллипсоида и цилиндра. Последние имитировали поверхностные коррозионные повреждения при циклическом нагружении внутренним давлением. Полученные результаты подтвердили адекватность разработанного метода оценки остаточного ресурса трубопроводов, вызванного коррозионными повреждениями.

*Ключевые слова:* магистральные трубопроводы, старение, коррозионное повреждение, концентрация напряжений, метод расчета, остаточный ресурс

Старение трубопроводов, в первую очередь магистральных, влияет на надежность их эксплуатации и нередко сопровождается ростом аварийности [1].

При длительном сроке эксплуатации трубопроводов, а также под действием термических и механических нагрузок и влиянием окружающей среды могут происходить эрозивно-коррозионные процессы. Как отмечалось в работе [2], основной причиной отказов трубопроводов за 20 лет эксплуатации являются язвенная коррозия, составляющая 42,5 % общего числа всех зафиксированных случаев.

При существующих в настоящее время требованиях к запасу прочности в трубопроводах за пределами упругости работает только материал зон концентрации, основной же объем металла труб деформируется упруго.

При выполнении исследований использовали геометрическую модель рассматриваемого поверхностного дефекта в форме полуэллипсоида, осями симметрии  $\theta$  и  $z$  которого являются наибольшие размеры дефекта в осевом, окружном и радиальном

направлениях трубопровода (рис. 1). Расчет местных максимальных деформаций ведется в вершине эллипсоида (в точке максимума) на основании значений номинальных напряжений  $\sigma_n$  и их концентрации.

Результаты выполненных исследований [3] свидетельствуют о том, что концентрация напряжений в зоне коррозионных повреждений трубопроводов на их наружной и внутренней поверхностях может достигать существенных значений, что при условии обеспечения статической прочности создает угрозу циклического упругопластического разрушения (рис. 2–4).

Для возникновения разрушения в зоне дефекта пластичных трубных сталей требуется накопление соответствующего усталостного повреждения, т. е. наработка определенного количества циклов на-

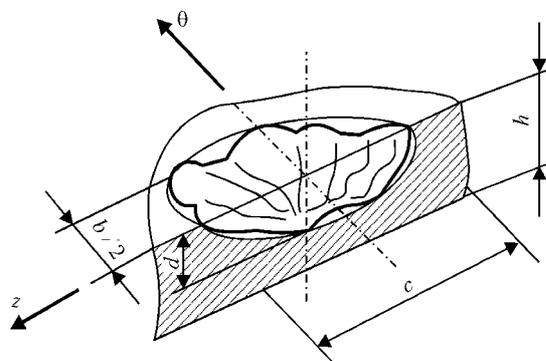


Рис. 1. Схема поверхностного дефекта в форме полуэллипсоида:  $c, b, d$  — соответственно длина, ширина, глубина дефекта;  $h$  — толщина стенки трубы

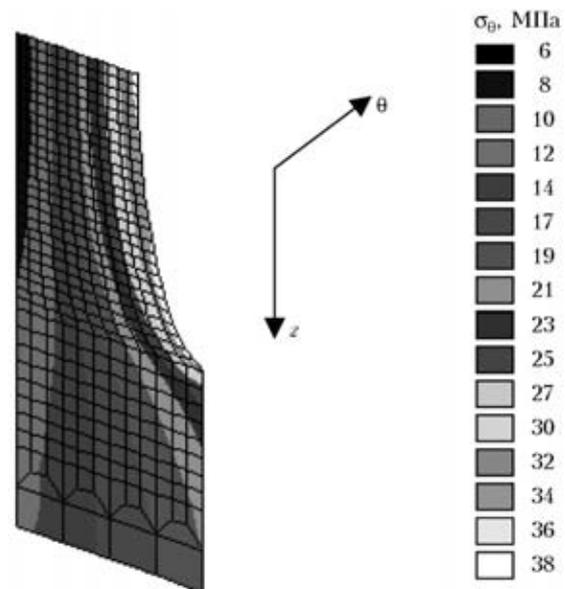


Рис. 2. Распределение кольцевых напряжений  $\sigma_\theta$  по толщине стенки трубы размером 322×7 мм в зоне дефекта (половина продольного его сечения на внутренней ее поверхности;  $c = 25$  мм;  $b = 35$  мм;  $d = 1,4$  мм) при воздействии внутреннего давления  $P = 1$  МПа (здесь и на рис. 3 представлены результаты расчета методом конечных элементов, выполненного Институтом проблем прочности НАН Украины)

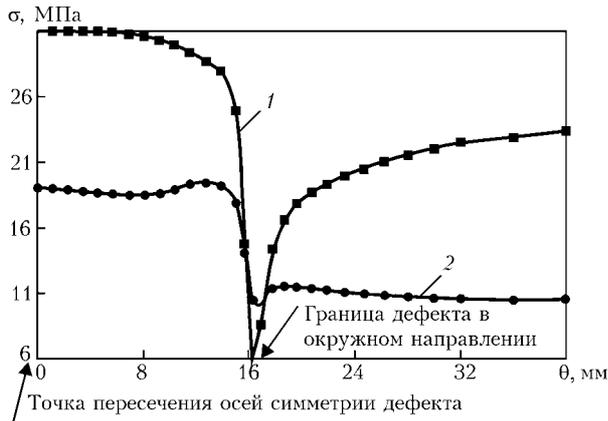


Рис. 3. Распределение кольцевых  $\sigma_\theta$  (1) и осевых  $\sigma_z$  (2) напряжений на поверхности дефекта (см. объяснения рис. 2) вдоль оси симметрии  $\theta$  под воздействием внутреннего давления 1 МПа в трубе размером 322×7 мм

ружения. Пренебрежение возможностью малоциклового разрушения сказывается не сразу и является одной из причин увеличения количества аварий, происходящих вследствие старения трубопроводов.

Требование максимальной надежности трубопроводов предполагает совершенствование методов их расчета на прочность. В связи с этим предложен метод расчета остаточного ресурса трубопровода с коррозионным повреждением по критерию образования малоциклового трещины при циклах нагружения до  $1 \cdot 10^5$ . Настоящая работа выполнена с целью экспериментальной проверки указанного метода.

В рамках используемой в расчете теории тонких оболочек напряженное состояние трубопроводов представляется как плосконапряженное — напряжения, действующие в направлении толщины стенки, принимаются равными нулю. При этом асимметрия цикла деформаций не учитывается, поскольку ее влияние на долговечность в условиях жесткого нагружения пластичных сталей при значениях асимметрии, характерных для условия изменения нагрузок, которые воздействуют на трубопроводы, незначительно. Используя интенсивность деформаций (напряжения) при расчете величин, инвариантных к типу напряженного состояния, предполагается, что диаграмма деформи-

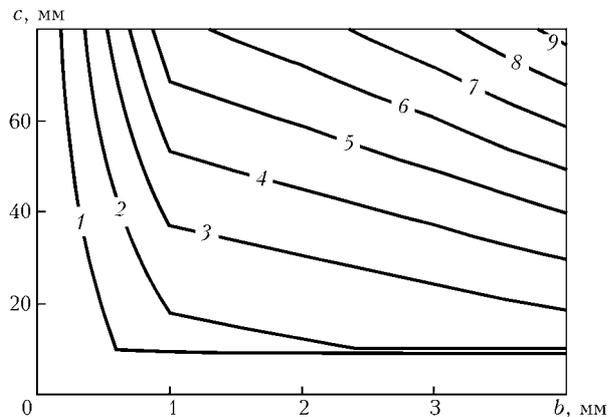


Рис. 4. Кривые изоконцентрации напряжений (значения концентрации  $\alpha_\sigma$  напряжений обозначены цифрами на кривых) на поверхности дефекта шириной  $b = 20 \text{ мм} = \text{const}$  трубы размером 219×8 мм, полученные при изменении его длины  $c$  и глубины  $d$

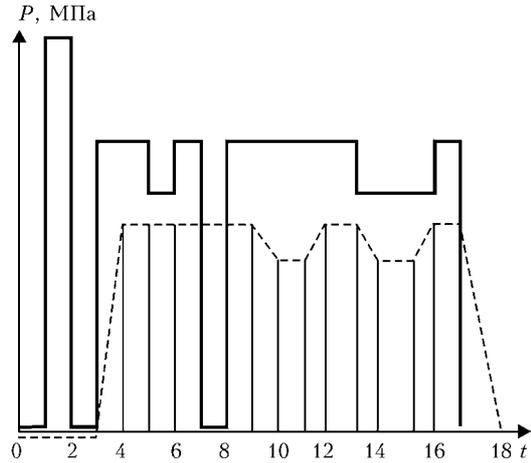


Рис. 5. Основные циклы нагружения трубопровода: сплошные кривые — давление в трубопроводе; штриховые — температура трубопровода;  $t_{1-2}$  — гидравлические испытания трубопровода;  $t_{3-4}-t_{17-18}$  — типичный пуск-останов перекачки;  $t_{5-6}$  — снижение-подъем давления при перекачке;  $t_{7-8}$  — аварийный (кратковременный) ее пуск-останов перекачки;  $t_{9-12}$  — снижение-подъем температуры перекачки;  $t_{13-16}$  — снижение-подъем температуры и давления перекачки

рования в зоне дефектов соответствует диаграмме растяжения гладкого образца.

Определение составляющих различных категорий напряжений осуществляют с использованием прямоугольной системы координат  $\theta-z$ .

На основе анализа условий эксплуатации трубопровода установлены максимальные циклы нагружения (рис. 5).

Для каждого основного цикла нагружения  $j$ -го типа рассчитывают размахи составляющих номинальных нормальных  $\Delta\sigma_{zj}$  и  $\Delta\sigma_{\theta j}$  и касательных  $\tau_{z\theta j}$  напряжений, которые используются для определения размахов (удвоенной амплитуды) интенсивности номинальных напряжений  $\Delta\sigma_{ij}$  ( $2\sigma_{aj}$ ) в цикле нагружения  $j$ -го типа:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2\sigma_{aj} = \sqrt{\Delta\sigma_{zj}^2 + \Delta\sigma_{\theta j}^2 - \Delta\sigma_{zj}\Delta\sigma_{\theta j} + 3\tau_{z\theta j}^2}$$

Используя значение коэффициента концентрации напряжений в зоне дефекта в упругой об-



Рис. 6. Экспериментальные образцы размером 219×8 (а) и 168×7 (б) мм



ласти концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  [3], вычисляется амплитуда максимальных напряжений  $\sigma_{aj}^k$  в зоне дефекта:

$$\sigma_{aj}^k = \sigma_{aj} \alpha_\sigma,$$

где  $k$  — номер цикла нагружения;

$$\alpha_\sigma = 1,4 \left[ 1 + \frac{2\frac{b}{d} \left( 1,12 - 0,48\frac{b}{c} + 0,13\frac{b}{c} \left( 3\frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h} \right) \right)}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0,75\frac{b}{c})} \right] \sqrt{1 + \frac{5\pi\lambda^2}{32}}$$

$\lambda$  — функция, учитывающая кривизну поверхности:

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{Rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2}.$$

$R$  — радиус трубы;  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\mu = 0,3$ .

Если значения расчетных упругих напряжений  $\Delta\sigma_{ij}^k$  превышают предел текучести  $\sigma_T$ , то для дальнейшего расчета используют значение амплитуды условного упругого напряжения  $\sigma_{aj}^{k*}$  или амплитуды относительной деформации  $e_{aj}^k$  в зоне дефекта:

$$\sigma_{aj}^{k*} = \sigma_{aj} K_{ej}; \quad e_{aj}^k = K_{ej} \frac{e_{aj}}{e_T},$$

где  $e_{aj}$  — амплитуда номинальных деформаций в  $j$ -м цикле нагружения;  $e_T$  — интенсивность деформации, соответствующая пределу текучести;  $K_{ej}$  — коэффициент концентрации деформаций в упругопластической области деформирования материала в зоне дефекта в  $j$ -м цикле нагружения:

$$K_{ej} = \frac{\alpha_\sigma^{2/1+m} (\bar{\sigma}_j)^{(1-m)/(1+m)}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_j)^{n(1-m)/(1+m)} [1 - (\bar{\sigma}_j - \frac{1}{\alpha_\sigma})]}$$

где  $\bar{\sigma}_j$  — относительные номинальные напряжения в  $j$ -м цикле нагружения:

$$\bar{\sigma}_j = \frac{\Delta\sigma_{ij}}{\sigma_T};$$

$n = 0,5 = \text{const}$ ;  $m$  — характеристика упрочнения материала в упругопластической области.

Остаточный ресурс трубопровода составляет

$$T_{\text{ост}} = \frac{1 - a}{a_{\text{год}}},$$

где  $a_{\text{год}}$  — повреждаемость трубопровода за год эксплуатации:

$$a_{\text{год}} = \sum \frac{f_j}{[N_j]};$$

где  $f_j$  — средняя частота повторяемости циклов нагружения  $j$ -го типа в год;  $[N_j]$  — допускаемое количество основных циклов нагружения  $j$ -го типа, определяемое на основании найденных значений амплитуды напряжений  $\sigma_{aj}^k$  или  $\sigma_{aj}^{k*}$  или дефор-

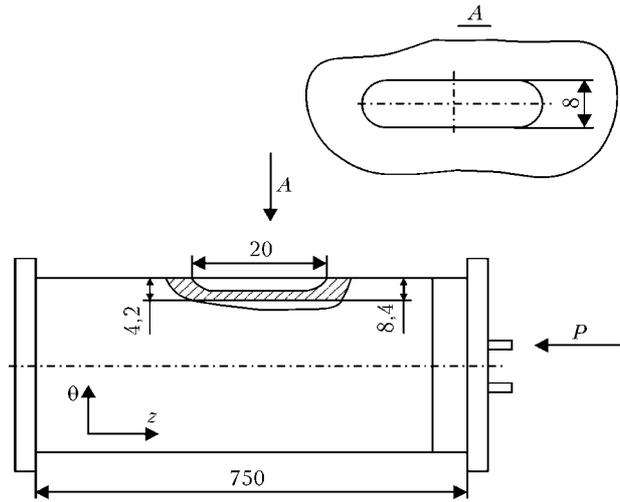


Рис. 7. Схема образца размером 219×8 мм с нанесенным на его наружную поверхность дефектом в форме полуэллипсоида

маций  $e_{aj}^k$  в зоне дефекта по расчетным усталостным кривым либо по приведенной ниже зависимости с введенными коэффициентами запаса по деформациям (напряжениям)  $\{n_e, (n_\sigma)\}$  и долговечности  $n_N$

$$[N_j] = \left[ \ln \frac{1}{1 - \Psi} \right]^{1/n}; \quad (1)$$

$$4e_T \left( e_{aj}^k - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T} \right)$$

$a$  — суммарное накопление повреждения:

$$a = \sum \frac{N_j}{[N_j]};$$

$N_j$  — фактическое количество основных циклов нагружения  $j$ -го типа трубопровода при наличии поверхностного дефекта.

С целью проверки предложенной методики выполнены испытания двух образцов (рис. 6) из труб разного размера с нанесенными механическим путем углублениями в виде полуэллипсоида и цилиндра, имитирующими поверхностные повреждения (рис. 7 и 8).

В расчет малоциклового прочностного ресурса образцов вводили характеристики механических свойств, установленные при стандартных испытаниях на растяжение и определяющие минимальное сопротивление разрушению (табл. 1).

Эксперименты проводили в лаборатории испытаний давлением сварных соединений ИЭС им. Е. О. Патона. В процессе испытаний образцы нагружали в автоматическом режиме пульсирующим внутренним давлением: от  $P_{\text{min}}$  до  $P_{\text{max}}$  с последующим сбросом до  $P_{\text{min}}$ . Скорость нагружения составляла приблизительно 1 цикл/мин.

Таблица 1. Механические свойства труб

Размер трубы, мм	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\Psi$ , %
219×8	541,3	365,5	55,0
168×7	530,6	300,2	55,3

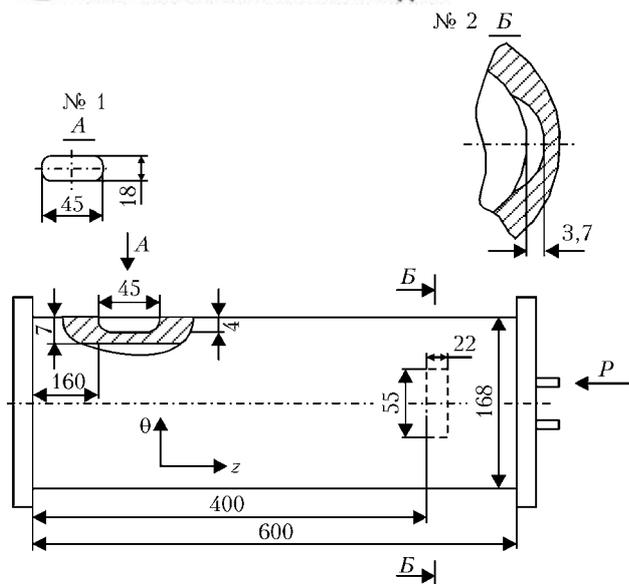


Рис. 8. Схема образца размером 168×7 мм с дефектами, нанесенными на его наружную поверхность в форме полуэллипсоида (№ 1) и на внутреннюю в форме цилиндра (№ 2)

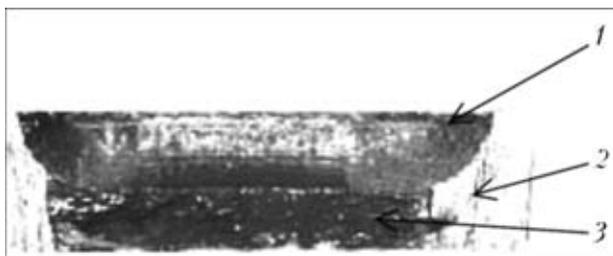


Рис. 9. Разрушение образца размером 219×8 мм в зоне дефекта: 1 — дефект в виде полуэллипсоида; 2 — основной металл; 3 — зона распространения трещины

Данные о нагружении образцов представлены в табл. 2 и 3. Приведенное в таблицах допустимое до разрушения количество циклов  $[N_j]$  определяли с использованием зависимости (1) без введения коэффициентов запаса. Испытания продолжали до момента разгерметизации образца, определяемого визуально (рис. 9). Как видно из рисунка, фактическое разрушение образца произошло после работы большего, чем прогнозировали, количества циклов. Суммарное накопление дефектов в обоих случаях превысило 1, что характеризует выполненную оценку как несколько консервативный. Следует, однако, учитывать, что при проведении эксперимента практически исключалось воздей-

Таблица 2. Характеристики нагружения образца размером 219×8 мм

$N_j$ , цикл	$P_{max}$ , МПа	$P_{min}$ , МПа	$K_e$ при $P_{max}$	$\bar{\sigma}_j$	$e_a \cdot 10^{-3}$	$[N_j]$ , цикл	$a$	
1000	20,0	1	7,78	0,593	3,550	5840	0,171	
100	20,5	4	7,92	0,608	3,386	6648	0,015	
26	19,0	1	7,49	0,564	3,240	7518	0,003	
100	20,0	1	7,78	0,593	3,550	5840	0,017	
1114	23,0	1	8,67	0,682	4,593	2983	0,373	
30	20,0	1	7,78	0,593	3,550	5840	0,005	
70	21,0	1	8,07	0,623	3,878	4610	0,015	
1590	24,0	1	9,01	0,712	4,981	2438	0,652	
$\Sigma = 1,251$								
Примечание. $\alpha_\sigma = 4,61$ .								

ствие окружающей среды, которое в реальных условиях эксплуатации трубопровода снижает его долговечность. Поэтому занижение оценки ресурса в эксперименте играет в данном случае положительную роль, поскольку направлено на компенсацию неучтенного влияния коррозионной среды при эксплуатации.

Отметим, что предложенный метод расчета в его настоящей интерпретации применим именно для условий, воспроизводившихся в описанном эксперименте — накопление повреждаемости происходило только после нанесения дефекта, в процессе испытаний размеры дефекта оставались неизменными. В действительности же от момента зарождения дефекта до момента его обнаружения проходит некоторый промежуток времени, в течение которого может быть накоплена существенная усталостная повреждаемость металла в зоне концентрации напряжений. Доля повреждаемости, накапливаемая в цикле нагружения, меняется в зависимости от размеров дефекта. Если не учитывать повреждаемость, накопленную до момента обнаружения дефекта, то это может привести к завышению остаточного ресурса трубопровода.

После экспериментального подтверждения пригодности метода расчета для практического применения он должен быть доработан таким образом, чтобы оценку остаточного ресурса трубопровода выполняли с учетом изменения геометрических параметров дефекта, которые происходили до его обнаружения и будут происходить исходя из установленной расчетной скорости коррозионного процесса в прогнозируемый период времени.

Таблица 3. Характеристики нагружения образца размером 168×7 мм

$N_j$ , цикл	$P_{max}$ , МПа	$P_{min}$ , МПа	$\bar{\sigma}_j$	$K_e$ при $P_{max}$		$e_a \cdot 10^{-3}$		$[N_j]$ , цикл		$a$	
				№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
2400	13	1,0	0,39	5,74	1,88	1,369	0,441	$\sim 2 \cdot 10^5$	$> 1 \cdot 10^6$	0,012	—
6270	17	1,0	0,51	6,65	1,88	2,120	0,588	28130	$> 1 \cdot 10^6$	0,223	—
$1 \cdot 10^4$	15	1,0	0,45	6,18	1,88	1,724	0,514	62640	$> 1 \cdot 10^6$	0,160	—
$1 \cdot 10^4$	17	0,5	0,51	6,65	1,88	2,164	0,607	26170	$> 1 \cdot 10^6$	0,382	—
$7 \cdot 10^3$	21	1,0	0,63	7,66	2,01	3,052	0,788	8912	$> 1 \cdot 10^6$	0,785	—
230	30	1,0	0,90	—	2,43	—	1,387	—	$> 1 \cdot 10^6$	—	0,001
$\Sigma = 1,562$										$\Sigma \approx 0,001$	
Примечание. Для дефекта (см. рис. 8. 2) № 1 — $\alpha_\sigma = 4,53$ ; для № 2 — $\alpha_\sigma = 1,88$ .											



**Таблица № 4. Влияние дефектов на статическую прочность образцов**

Размер образца с дефектом, мм	Поверхность трубы	$F$ , мм <sup>2</sup>	$F_d$ , мм <sup>2</sup>	$M$	$\alpha_\sigma$	Разрушение в эксперименте
219×8	Наружная	88,3	76,4	1,00	4,61	Усталостное
168×7, № 1 № 2	То же	67,6	120,0	0,83	4,53	То же
	Внутренняя	67,6	81,4	0,89	1,88	Не произошло

Примечание.  $F$  — максимальная площадь отверстия, не ослабляющего прочности трубы при воздействии статического внутреннего давления;  $F_d$  — площадь дефекта в продольном сечении с наибольшей глубиной;  $M$  — коэффициент ослабления статической прочности [5]  $P'/P$ , где  $P'$  — допускаемое внутреннее давление в трубопроводе с учетом наличия дефектов;  $P$  — расчетное давление в трубопроводе.

Данные, полученные в ходе экспериментов, показали, что в отличие от статического нагружения, когда первоочередным является соотношение площади дефекта и неукрепленного отверстия [4], при циклическом нагружении определяющую роль играет концентрация напряжений в зоне дефекта. В этом смысле показательными являются дефект в образце размером 219×8 мм и дефект № 2 в образце размером 168×7 мм. В первом случае малоцикловое разрушение имело место при отсутствии ослабления в зоне дефекта, во втором — усталостное разрушение не произошло несмотря на то, что зона дефекта была ослаблена (табл. 4).

Таким образом, на основании экспериментальных данных о долговечности натуральных образцов труб с поверхностными углублениями, имитирующими коррозионные повреждения, выполнена проверка и подтверждена адекватность разработанного ме-

тода оценки остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями.

1. *Надежность* существующих систем трубопроводного транспорта и пути ее повышения / В. А. Воробьев, А. Г. Гумеров, М. Х. Султанов, В. А. Гараева // Программа работы 3-го Конгресса нефтегазопромышленников России, г. Уфа, 22–25 мая 2001 г. — Уфа: Изд-во ТППРБ, 2001. — С. 33–39
2. *Анализ* отказов и оценка остаточного ресурса трубопроводов и оборудования ОНГКМ / Н. Н. Гафаров, А. Д. Гончаров, В. М. Кушнаренок, Ю.А. Чирков // Тез. докл. 3-й Международ. конф. «Диагностика трубопроводов», г. Москва, 21–26 мая 2001 г. — М., 2001. — С. 12.
3. *Концентрация* напряжений на участках коррозионных поврежденных трубопроводов / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский, С. В. Кобельский, П. С. Юхимец // Автомат. сварка. — 2000. — № 6. — С. 3–6.
4. *Гарф Э. Д., Нетребский М. А.* Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионным повреждением // Там же. — 2000. — № 9/10. — С. 15–20.
5. *ASME B31.8*. Appendix L. Determination of remaining strength of corroded pipe, 1995.

Two full-scale specimens with recesses in the form of a semi-ellipsoid and cylinder, were tested to check the offered method for estimation of residual life of pipelines allowing for the surface defects. The above recesses simulated surface corrosion damages under cyclic loading by internal pressure. The results obtained proved adequacy of the developed method for estimation of residual life of pipelines comprising corrosion damages.

Поступила в редакцию 19.11.2004

## ПРЕССОВАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Сварка осуществляется в вакуумной камере при температуре, близкой к 0,5 температуры плавления более легкоплавкого из свариваемых металлов, и давлении, превышающем его предел текучести в условиях сварки. Сварка выполняется в специальном приспособлении—инструменте, обеспечивающем необходимую степень деформации в приконтактной зоне, а также сохранение заданной формы и размеров свариваемой детали.

Получение качественных соединений разнородных металлов обеспечивается за счет приложения давления, достаточного для образования физического контакта по всей площади соединяемых поверхностей в начальный период сварки и достижения заданной степени пластической деформации, и ограничения температуры сварки. Время сварки выбирается из условия протекания рекристаллизационных процессов в металле приконтактных зон.

**Назначение.** Для соединения металлов с ограниченной взаимной растворимостью без применения промежуточных прослоек и образования хрупких интерметаллических фаз в зоне контакта. Сварка в указанных условиях гарантирует получение соединений с пределом прочности на уровне значений менее прочного из соединяемых металлов. Разработаны технологические процессы прессовой сварки в вакууме следующих пар металлов: титан с алюминием, титан с медью, титан с аустенитной, ферритной и низкоуглеродистой сталями, титан с вольфрамом, титан с молибденом.

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 287 13 66  
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua; ret99@ret99.kiev.ua



## СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С X-ОБРАЗНОЙ РАЗДЕЛКОЙ КРОМОК

А. А. ОСТСЕМИН, д-р техн. наук, В. Л. ДИЛЬМАН, канд. физ.-мат. наук (Южно-Уральский гос. ун-т, г. Челябинск, РФ)

На основе метода решения плоской задачи теории пластичности выполнена расчетная оценка статической прочности соединений из пластин с X-образной разделкой и менее прочным швом по сравнению с основным металлом. Исследовано напряженное состояние механически неоднородных стыковых соединений. Показана возможность определения оптимальных геометрических размеров металла шва.

*Ключевые слова:* стыковые соединения, относительная толщина, мягкая прослойка, зазор, корень шва, угол скоса, свариваемые кромки, предельное растягивающее усилие, контактное упрочнение, механическая неоднородность, коэффициент неоднородности

Прочность и напряженное состояние механически неоднородных сварных соединений определяются геометрической формой и размерами мягких прослоек, которыми могут быть сварной шов, зона термического влияния и обезуглероживенная зона, расположенная вблизи границы сплавления [1] в нефтегазовом и химическом оборудовании (сосудах давления, трубах, трубопроводной арматуре, криогенной технике). Наличие в сварном соединении мягких прослоек, металл которых имеет более низкий по сравнению с основным металлом предел текучести (мягкие швы), приводит к локализации в них пластических деформаций. В мягких швах, как и в плоских мягких прослойках, в результате сдерживания по контактными поверхностям (границам сплавления) пластических деформаций

более прочным металлом возникает объемное напряженное состояние и проявляется эффект контактного упрочнения.

В настоящее время детально изучена работоспособность сварного соединения с плоской мягкой прослойкой [2, 3]. Однако геометрическая форма последней бывает самой разнообразной, что нередко обусловлено способом подготовки свариваемых кромок, например, при сварке пластин, труб большого диаметра и значительной толщины с X-образной симметричной разделкой кромок [1].

В работе [1] показано, что напряженное состояние X-образных мягких швов можно представить с помощью сетки линий скольжения. Все X-образные симметричные швы условно можно разделить на три группы, для каждой из которых свойственны определенные интервалы изменения геометрических параметров. Однако отсутствие математического описания зависимости статической прочности от геометрических параметров и степени механической неоднородности сварных соединений с X-образным мягким швом значительно ограничивает возможность использования теории контактного упрочнения.

В работе [4] на основании метода линий скольжения предложен приближенный способ оценки прочности сварных соединений с X-образными мягкими швами. Распределение напряжений в рассматриваемой прослойке приводится согласно решению Л. Прандтля.

Однако влияние формы и размеров мягких швов на их прочность и напряженное состояние с позиций теории пластичности изучено недостаточно.

В настоящей работе на основе решения плоской задачи теории пластичности [5] дана расчетная оценка статической прочности соединений из пластин с X-образной разделкой (мягким швом), с помощью которой можно определить оптимальные зазоры  $h_0$  в корне шва и углы  $\varphi$  скоса свариваемых кромок (рис. 1).

Теоретический анализ сварных соединений из пластин проводили с учетом условий и допущений, представленных в работах [3, 5]. Рассматривали статическое растяжение (сжатие) соединений с мягким швом без усиления в предельной стадии пластического деформирования (вязкое разрушение). Материалы,

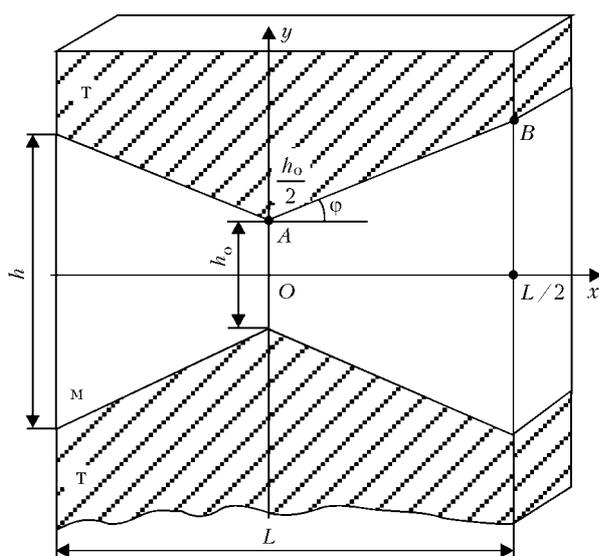


Рис. 1. Параметры мягкой прослойки стыковых сварных соединений с X-образной разделкой кромок ( $v = h_0/h$ ;  $\chi_0 = h_0/L$ ;  $\chi = h/L$ ;  $y = f(x)$ ;  $0 \leq \chi \leq L/2$ )



входящие в соединение, принимали однородными, изотропными и идеально жесткопластичными. Считали, что при наличии значительных пластических деформаций остаточные напряжения отсутствуют. В настоящей работе наряду с обычными предположениями и упрощающими условиями, которые принимаются при теоретическом изучении механически неоднородных соединений, используется также предположение [3], которое согласуется с теорией пластического слоя [5] и обобщает известное допущение Л. Прандтля: касательные напряжения  $\tau_{xy}$  в мягкой прослойке линейно зависят от расстояния от плоскости, на которой  $\tau_{xy}(x, y) = 0$  (см. ось  $Ox$  на рис. 1).

Цель работы – определение прочности и напряженного состояния в механически неоднородных стыковых соединениях с X-образной симметричной разделкой кромок.

Касательные напряжения в мягкой прослойке стабилизируются вблизи свободных поверхностей. На контактных поверхностях получим

$$\tau_{xy}^{\text{кон}} = \alpha k_m \quad (0 < \alpha < 1), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр, характеризующий вовлечение основного металла в пластическую деформацию и зависящий от механической неоднородности сварного соединения:  $\alpha = K_B - 1$ ;  $K_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M$ ;  $\sigma_B^T, \sigma_B^M$  – соответственно временное сопротивление более прочного твердого (т) основного металла и менее прочного мягкого (м) металла прослойки;  $k_m$  – предел текучести на сдвиг металла шва. Предполагаем, что функция  $\tau_{xy}$  в мягкой прослойке линейно зависит от  $y$ , что позволяет воспользоваться вместе с условием (1) формулой для вычисления нормальных напряжений  $\sigma_y$  [5]:

$$\sigma_y = k_m \times \left( 2 + \frac{1}{2} \ln \operatorname{ch} \frac{4\alpha x}{h} + \frac{4\alpha^2}{h^2} \frac{y^2}{\operatorname{ch}^2 \frac{2\alpha x}{h}} + \frac{1}{2} \ln \operatorname{ch} \frac{4\alpha x}{h} + \frac{\alpha^2}{3} \right) \quad (2)$$

Пусть  $y = f(x)$  – функция, описывающая линию контактной поверхности (кривая  $AB$  на рис. 1). Предполагаем, что линейная функция  $f(x)$  монотонна на  $[0; L/2]$  и не имеет точек перегиба (здесь  $L$  – толщина образца).

Предельное растягивающее усилие можно записать в виде  $P = P_0 + P_1$ , где

$$P_0 = 2 \int_0^{L/2} \sigma_y \left( x, \frac{h}{2} \right) dx;$$

$$P_1 = 2 \int_0^{L/2} \left[ \sigma_y(x, f(x)) - \sigma_y \left( x, \frac{h}{2} \right) \right] dx.$$

Поскольку  $f(x)$  определяет контактную поверхность, то

$$P = 2 \int_0^{L/2} [\sigma_y(x, f(x))] dx.$$

Интеграл  $P_0$  вычисляется по линии  $y = h/2$ , как и в случае прямоугольной прослойки. Поэтому можно воспользоваться результатом работы [5]:

$$P_0 = k_m L \left( -\frac{\alpha^2 + 0,2}{2\alpha} \chi + \frac{\alpha}{2\chi} + 2 + \frac{\alpha^2}{3} \right) \quad (3)$$

Используя (2), вычислим усилие  $P_1$ . При  $f(x) = \frac{h_0}{2} + \frac{h - h_0}{L} x$  получим следующее выражение (подробности вычисления не приводим):

$$P_1 = \frac{k_m \alpha}{16} (1 - \nu) L \chi \left[ 4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right], \quad (4)$$

где  $\nu = \frac{h_0}{h} = \frac{\chi_0}{\operatorname{tg} \varphi + \chi_0}$ ;  $\chi_0, \chi$  – соответственно минимальная и максимальная относительная толщина мягкой прослойки;  $\operatorname{tg} \varphi = (h - h_0)/L$ .

Из выражений (3) и (4) получаем, что предельное растягивающее усилие равно

$$P = k_m L \left[ \left( -\frac{\alpha^2 + 0,2}{2\alpha} \chi + \frac{\alpha}{2\chi} + 2 + \frac{\alpha^2}{3} \right) + \frac{\alpha(1 - \nu)\chi}{16} \left( 4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right) \right]. \quad (5)$$

Для среднего предельного напряжения из формулы (5) находим

$$\sigma_y^{\text{cp}} = 2k_m \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{4\chi} - \frac{\alpha^2 + 0,2}{4\alpha} \chi + \frac{\alpha^2}{6} \right) + \frac{\alpha(1 - \nu)\chi}{32} \left( 4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right) \right]. \quad (6)$$

В случае приближения к наиболее узкой части X-образной прослойки уровень нормальных напряжений  $\sigma_y$  значительно повышается. При  $\varphi = 0$  и  $\nu = 1$  выражение (6) преобразуется в формулу для прямоугольной прослойки [3] (при  $\alpha_1 = \alpha_2$ ):

$$\sigma_y^{\text{cp}} = 2k_m \left( 1 + \frac{\alpha}{2\chi} - \frac{\alpha^2 + 0,2}{4\alpha} \chi + \frac{\alpha^2}{6} \right) \quad (7)$$

Для того чтобы использовать выражение (7) для сварных соединений, металл шва которых упрочняется в процессе пластического деформирования, в зависимостях (3)–(6)  $k_m = \sigma_T / \sqrt{3}$  ( $\sigma_T^M$  – предел текучести металла шва) необходимо заменить на  $\sigma_B^M / \sqrt{3}$  ( $\sigma_B^M$  – временное сопротивление мягкого шва) [2]. С уменьшением зазора  $h_0$  в корне шва уменьшается и  $\nu$ , а следовательно, среднее предельное напряжение  $\sigma_y^{\text{cp}}$  увеличивается согласно (6). Зависимость величины  $\Delta \sigma_y^{\text{cp}}$ , на которую среднее предельное напряжение X-образной прослойки, вычисляемое по (6), превышает аналогичную величину обычной плоскопараллельной мягкой прослойки шириной  $h$ , от относительной глубины X-образной прослойки (рис. 2) имеет вид

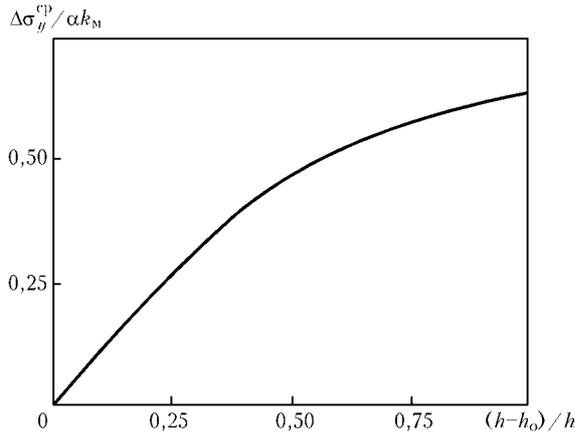


Рис. 2. Зависимость поправки  $\Delta\sigma_y^{cp}$  среднего предельного напряжения от относительной глубины X-образной разделки кромок  $1 - \nu = h - h_0/h$

$$\Delta\sigma_y^{cp} = \frac{\sigma_B^M}{16\sqrt{3}} \alpha (1 - \nu) \chi \left[ 4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right]. \quad (8)$$

Увеличение среднего предельного напряжения  $\Delta\sigma_y^{cp}$  при уменьшении зазора в корне шва  $h_0$  при постоянной толщине мягкой прослойки  $h$  согласуется с полученными экспериментальными [6] и теоретическими [7] результатами. Корень X-образных мягких симметричных швов является местом концентрации напряжений, а следовательно, может стать очагом хрупкого разрушения.

Опыт строительства трубопроводов показал, что наиболее характерным видом разрыва сварных швов газопроводов является сквозная трещина, проходящая на определенную длину по оси кольцевого сварного шва. Она начинается от первичных дефектов (подреза, непровара, скопления пор и шлаковых включений), располагающихся преиму-

щественно в корневом слое или по границам сплавления. Стык может разрушаться по всему периметру или по свищу в зависимости от уровня действующих напряжений и механических свойств металла шва [8].

Опасность хрупкого разрушения возрастает с уменьшением зазора  $h_0$  в корне шва из-за резкого увеличения максимальных напряжений  $\sigma_y^{\max}$ . Исходя из значения сопротивления  $R_y^M$  отрывы материала шва можно выполнить оценку возможности хрупкого разрушения сварного соединения. Зависимость коэффициента контактного упрочнения  $K_\chi = \sigma_{cp}/2k_M$  от относительной толщины прослойки  $\chi$  при различных углах скоса кромок  $\phi$  для сварных соединений приведена на рис. 3. Значения  $K_\chi$  уменьшаются с увеличением угла  $\phi$  скоса кромок и относительной толщины  $\chi$  мягкой прослойки. При  $\phi = 35^\circ$  и  $\chi_0 = 0$  (зазор в корне шва отсутствует)  $K_\chi = 1$ , что означает отсутствие контактного упрочнения в сварном соединении. Расчетные значения  $K_\chi$  для пластин удовлетворительно соответствуют полученным по номограммам, приведенным в работе [1], и экспериментальным данным [6].

В работе [4] изложены результаты экспериментальных исследований. Сварные образцы были изготовлены из листов высокопрочной стали толщиной 16...20 мм. Пластины сваривали проволокой Св-10ГСМТ диаметром 1,6 мм в углекислом газе. Временное сопротивление металла шва составляло  $\sigma_B^M = 600...700$  МПа. Ширина образцов равна 100 мм, что обеспечивало реализацию плоской деформации в мягких X-образных швах. Коэффициент механической неоднородности этих соединений, равный 2,2...2,4, достаточно велик, в связи с этим при вычислении расчетных значений  $K_\chi^p$  вовлечение основного металла в пластическую деформацию не учитывали —  $\alpha \approx 1$ . Расчетные

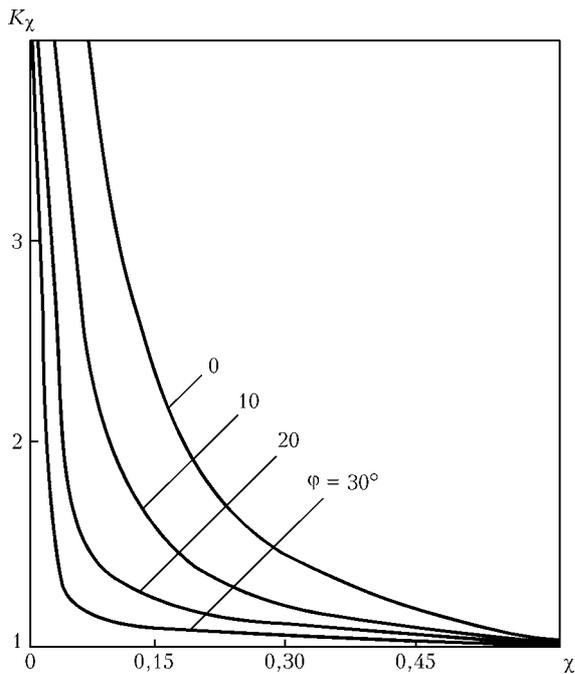


Рис. 3. Зависимость коэффициента контактного упрочнения  $K_\chi$  от относительной толщины мягкой прослойки  $\chi$  при различных углах  $\phi$  наклона X-образной мягкой прослойки

$\chi$	$\phi$ , град	$\frac{2}{\sqrt{3}} K_\chi^a$	$\frac{2}{\sqrt{3}} K_\chi^p$	$\frac{K_\chi^a - K_\chi^p}{K^a} \cdot 100\%$
0,15	26,0	1,30	1,282	1,4
0,45	12,4	1,29	1,156	10,3
0,10	28,0	1,29	1,298	0,6
0,25	21,0	1,29	1,253	2,8
0,17	22,3	1,32	1,310	0,7
0,25	19,3	1,25	1,268	1,4
0,22	20,8	1,25	1,270	1,6
0,11	27,5	1,25	1,290	3,2
0,09	34,6	1,20	1,256	3,3
0,34	21,0	1,20	1,193	0,6
0,17	30,0	1,20	1,200	0
0,22	25,6	1,22	1,240	1,6
0,25	30,5	1,19	1,200	0,8
0,10	35,7	1,13	1,230	8,8
0,06	36,8	1,11	1,240	11,7
0,54	27,0	1,08	1,060	1,8
0,15	41,3	1,10	1,190	8,4



по (6) и экспериментальные значения параметров [4, 6], полученные канд. техн. наук В. П. Ерофеевым, приведены в таблице. Сравнение этих данных по несущей способности сварных соединений при изменении  $\chi$  в диапазоне 0,10...0,54 и угле скоса кромок  $\phi = 12...41^\circ$  показало их хорошее соответствие. Средняя погрешность составляет 3,5 %. Здесь  $K_\chi^3 = \sigma_B^3 / \sigma_B^M$  и  $K_\chi^p = \sigma_y^{cp} / \sigma_B^M$  — соответственно экспериментальные и расчетные значения коэффициентов контактного упрочнения, где  $\sigma_B^3$  — экспериментальные значения временного сопротивления сварных образцов;  $\sigma_y^{cp}$  — расчетные средние предельные напряжения.

Предложенные соотношения для статической прочности механически неоднородных стыковых сварных симметричных соединений с X-образной разделкой кромок могут быть использованы на стадии конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций.

### Выводы

1. Разработанный на основе принадлежащего авторам метода решения плоской задачи (из теории пластичности) способ оценки прочности сварных соединений с X-образными симметричными мягкими швами дает возможность определять значения предельных напряжений в сварных соединениях из пластин в зависимости от зазора в корне шва и углов скоса свариваемых кромок.

2. Экспериментальные значения коэффициента контактного упрочнения хорошо сочетаются с расчетными (погрешность около 3,5 %).

3. Данные о влиянии зазора в корне шва, угла скоса кромок и степени механической неоднородности позволяют выбрать оптимальные геометрические размеры менее прочных швов, что обеспечивает прочностные характеристики металла сварных соединений на уровне основного металла.

1. Бакиш О. А., Ерофеев В. П. Напряженное состояние и прочность стыкового шва с X-образной разделкой // Свароч. пр-во. — 1971. — № 1. — С. 4–7.
2. Бакиш О. А. О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии) // Вопросы сварочного производства. Тр. Челябин. политехн. ин-та. — 1965. — № 33. — С. 5–26.
3. Дильман В. Л., Остсемин А. А. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с механической неоднородностью // Свароч. пр-во. — 1998. — № 5. — С. 15–17.
4. Шахматов М. В., Хмарова Л. И., Тюпышев Ю. А. Расчетная оценка статической прочности механически неоднородных сварных соединений с X-образной разделкой свариваемых кромок // Там же. — 1985. — № 9. — С. 33–35.
5. Остсемин А. А., Дильман В. Л. О сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами // Пробл. прочност. — 1990. — № 7. — С. 107–112.
6. Ерофеев В. П. Исследования влияния геометрии мягких прослоек сварных соединений на их напряженно-деформированное состояние и прочность: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Челябинск, 1973. — 20 с.
7. Дильман В. Л., Остсемин А. А. О напряженно-деформированном состоянии при растяжении пластического слоя с двумя осями симметрии // Механика твердого тела. — 2001. — № 6. — С. 115–124.
8. Рахманов А. С., Тарлинский В. Д., Чабуркин В. Ф. Причины и механизм разрушения кольцевых сварных стыков // Стр-во трубопроводов. — 1971. — № 4. — С. 17.

Static strength of welded joints comprising a less strong weld on plates with the X-groove, compared with base metal, has been estimated by the method of solving the plane problem of the plasticity theory. The stressed state of mechanically inhomogeneous butt welded joints has been studied.

Поступила в редакцию 13.05.2005

## ПОЛУАВТОМАТ М30 ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ МЕТОДОМ TIG



Полуавтомат состоит из подающего механизма, шланга с мундштуком и источника питания электромагнита. Подающий механизм обеспечивает подачу в зону сварки присадочной проволоки диаметром 1,0–1,5 мм с заданной скоростью. Электромагнит управляет пространственным положением сварочной дуги, перемещая ее относительно оси шва. Амплитуду перемещения дуги можно изменять в реальном масштабе времени в зависимости от величины зазора в стыке. Полуавтомат может использоваться с любым стандартным источником питания постоянного тока.

**Назначение.** Предназначен для механизированной сварки вольфрамовым электродом в аргоне в различных пространственных положениях, особенно в монтажных условиях, титана и сплавов на  $\alpha$  основе, а также других немагнитных материалов.

Механизированная сварка с применением полуавтомата улучшает формирование швов при некачественной сборке деталей, сокращает потери присадочной проволоки, снижает требования к квалификации сварщиков.

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 287 13 66  
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua; ret99@ret99.kiev.ua



# ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ РЕСУРСА (Обзор)

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЦИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Ю. В. ЛОГИНОВА**, студентка (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Обобщены существующие представления о влиянии обработки конструкционных материалов импульсами тока на их механические свойства. Проведена классификация типов электроимпульсного воздействия на токопроводящие материалы и отмечены перспективы его применения для повышения механических свойств сварных соединений. Установлено, что электроимпульсная обработка сварных соединений может быть перспективной для повышения ресурса металлических конструкций.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, электроимпульсная обработка, электростимуляция, воздействие электромагнитного поля, конструкционные материалы, алюминиевые сплавы, удельная энергия обработки, плотность тока, коррозионная стойкость, остаточные напряжения

Развитие современной техники и технологий вызывает необходимость поиска новых путей увеличения ресурса работы сварных металлических конструкций в различных отраслях промышленности. Одним из перспективных направлений оптимизации эксплуатационных характеристик новой техники является повышение механических свойств конструкционных материалов путем обработки их импульсами тока. Таковым является процесс, основанный на эффекте воздействия электродинамических сил на токопроводящий элемент. Изменяя длительность и энергию импульсов тока, воздействующих на электропроводный материал, в результате активации широкого спектра дислокационных, фазовых и других механизмов, можно влиять на пластичность, твердость, износостойкость и прочность металлов и сплавов [1–3], а также их сварных соединений. Указанные явления объясняются на основе гипотезы электронно-дислокационного взаимодействия [4, 5].

Известно, что электродинамические силы в электрических машинах при токе короткого замыкания достигают значений, исчисляемых десятками тысяч ньютонов [6]. При этом возникают деформации токоведущего контура, которые могут приводить к его разрушению. Электродинамические силы зависят от тока, длины, конфигурации и взаимного расположения частей электрических машин, а также от пинч-эффекта [7, 8]. Если конструктивные элементы из тонколистовых проводящих материалов входят в состав токоведущего контура, то при определенном значении электродинамической силы можно достичь изменения механических свойств обработанных элементов конструкций.

В соответствии с классификацией, предложенной в работе [3], отметим следующие типы воз-

действия электромагнитного поля на токопроводящие материалы.

*Индукционный и контактный нагрев, с помощью которого осуществляют процессы, электротермической и термомеханической обработки.* В основе этого процесса лежит интегральный разогрев за счет рассеяния джоулевой энергии, пропорциональной плотности электрического тока  $j^2$ . Длительность  $\tau$  внешнего воздействия импульсами тока определяется в таких процессах временем установления однородного температурного поля в обрабатываемом объеме материала, а также характерным временем  $\tau^*$  протекания физических процессов, ведущих к изменению структуры и свойств металла [1]:

$$\tau^* = \rho c l^2 / \kappa,$$

где  $\rho$ ,  $c$ ,  $\kappa$  — соответственно плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность материала;  $l$  — характерный линейный размер структуры материала. При этом плотность тока составляет  $1 \cdot 10^6 \leq j \leq 1 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>, а длительность воздействия импульсами тока  $\tau$  не менее 1 с.

*Электродинамическое воздействие электромагнитным полем для повышения пластичности.* Используемые при этом параметры электрического тока изменяли в диапазоне  $1 \cdot 10 \leq j \leq 1 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> и  $\tau \geq 1 \cdot 10^{-5}$  с. Наблюдаемые эффекты разупрочнения материала под действием электромагнитного поля объясняются на основе гипотезы электронно-дислокационного взаимодействия [4].

Электропластическая деформация металлов при их растяжении проявляется на диаграммах растяжения в виде характерных сбросов деформирующего усилия. Считается [4, 5], что в области упругой деформации металлов импульсы тока влияния на их пластичность не оказывают, но в области пластической деформации наблюдаются дискретные сбросы деформирующего усилия [9], возрастающие с увеличением плотности тока. Это объясняется как нестационарным перемещением дислокаций по плоскостям скольжения, так и процессами прорыва движущимися дислокациями препятствий

в виде дислокационных скоплений, структурных неоднородностей различного типа и границ зерен. При этом имеет место перестройка дислокационной структуры материала под действием механической деформации в период электроимпульсного воздействия. Отсутствие активного сброса нагружения в пластической области деформации материала до момента протекания импульса тока в указанной работе объясняется тем, что при данном значении растягивающей нагрузки все дислокации находятся на непреодолимых стопорах [10, 11]. Активация релаксационных процессов пластифицирования материала непосредственно в момент протекания импульса тока показала, что электрический ток большой плотности выступает в качестве инициатора срыва со стопоров дислокаций и нестационарного их движения.

Термическое действие электромагнитного поля основано на наличии градиентов температуры и электрического потенциала — электростимуляции [12], определяемой удельной энергией  $q = 1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>, приходящейся на единицу объема обрабатываемого материала, и длительностью воздействия импульсов тока  $\tau = 1 \dots 30$  с.

Под воздействием электромагнитного поля ( $q = 1 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> и  $\tau \cong 1 \cdot 10^{11}$  с) наблюдали [13] увеличение пластичности при незначительном изменении прочности токопроводящих материалов. Одним из возможных объяснений механизма указанного воздействия является локальная неоднородность выделения энергии  $q$ , связанная с наличием фаз, неметаллических включений, концентраторов электрического и магнитного полей в структуре материала.

На современном этапе развития технологии машиностроения практический интерес представляет исследование применения различных видов электроимпульсной обработки для регулирования механических свойств сварных конструкций.

Заметим, что в настоящее время достаточно мало работ по применению обработки импульсами тока сварных соединений. В то же время исследования в области использования импульсов тока для оптимизации служебных характеристик сварных швов могут сыграть важную роль в повышении ресурса как эксплуатируемых, так и изготавливаемых сварных конструкций [14]. Неразъемные соединения металлов, получаемые сваркой, отличаются рядом особенностей по сравнению с материалами, не подвергавшимися термическому воздействию, а именно наличием литой структуры металла шва, участками кристаллизации в ЗТВ, градиентами твердости металла (зон разупрочнения) в поперечном сечении соединения, характерными, в частности, для алюминиевых сплавов. Одним из основных факторов, влияющих на служебные характеристики изделий, является напряженно-деформированное состояние сварных соединений, с которым связаны такие явления, как фазовые превращения в металле шва, размерная стабильность и остаточные формоизменения конструкций, а также снижение коррозионной стойкости в зоне соединений. В ряде случаев сварочные процессы вызывают появление горячих и

холодных трещин в материале, а также падение усталостной прочности.

Анализируя работы, посвященные повышению механических свойств конструкционных материалов, можно оценить перспективы применения обработки импульсами тока сварных соединений как способа увеличения ресурса эксплуатации металлических конструкций.

На основании данных, полученных для различных материалов, проведены оценки перспективности обработки импульсами тока для улучшения механических свойств сварных соединений.

Так, в работе [3] исследовали влияние импульсов электрического тока на характеристики прочности алюминиевых сплавов АД-1, Д16 и АМг2, которые поставляли в виде листового полуфабриката толщиной 3...5 мм, предварительно подвергнутого пластической деформации холодной прокаткой с заданной степенью обжатия (деформации). Материал после такой обработки использовали как исходный. В соответствии с поставленной задачей проводили испытания до и после обработки импульсами тока на статическую прочность и трещиностойкость при статическом нагружении, а также на ударную вязкость.

При обработке материалов импульсами тока изменяли длительность  $\tau$  воздействия и удельную энергию  $q$ . Для оптимизации диапазона значений  $q$  теоретически определяли [13] энергию, необходимую для наиболее эффективной обработки материала. За максимально возможную принимали энергию, приводящую к разрушению образца. Длительность  $\tau$  воздействия импульсов тока и удельную энергию  $q$  изменяли в пределах соответственно 0,22...0,36 с и 0,5... 1,3·10<sup>9</sup> Дж/м<sup>3</sup>. Установлено, что обработка импульсами тока образцов из сплава АД-1 приводит к увеличению пластичности на 30 % при  $q = 0,9 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и на 20...25 % при  $q = 0,7 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. При этом у образцов из сплава Д16 повышается пластичность. Но если у образцов из сплава АД-1 имело место снижение прочностных характеристик материала, то у образцов из сплавов АМг2 и Д16 при условии обработки на оптимальных режимах наблюдалось увеличение предела прочности на 5...8 %.

Следует отметить, что для ограниченно свариваемого сплава Д16, склонного к повышенному трещинообразованию при локальном термическом воздействии, увеличение пластичности материала за счет предварительной обработки сварных соединений импульсами тока может положительно сказаться на их служебных характеристиках. Проводили испытания на ударную вязкость образцов с острым надрезом в исходном (с предварительной деформацией), отожженном и обработанном состояниях. Полученные результаты показали, что обработка импульсами тока приводит к увеличению ударной вязкости по отношению к нагартованному материалу на 20...50 %, а к отожженному — на 10...15 % в узкой области значений удельной энергии, причем ее максимум и максимум пластичности конкретного сплава совпадают. При этом, если оптимальные значения вязкости у сплава АД-1



достигаются при соответственно  $q = 0,9 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, то у сплавов АМг2 и Д16 — при  $q = 1,4 \cdot 10^9$  и  $17 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. Данные работы [3] позволяют сделать вывод, что обработка импульсами тока сварных соединений из алюминиевых сплавов также может положительно влиять на их ударную вязкость. Установлено, что электроимпульсная обработка сплавов АД-1, Д16 и АМг2 при значениях  $q$  и  $\tau$  соответственно  $0,92 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и 0,35 с,  $1,5 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и 0,37 с,  $1,25 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и 0,23 с повышает критическую величину раскрытия вершины трещины. Учитывая, что механизмы трещинообразования в сварных соединениях близки к процессам, происходящим в основном металле, можно рассматривать обработку сварных соединений импульсами тока как перспективный способ повышения работоспособности сварных конструкций.

Одной из причин снижения работоспособности сварных конструкций в процессе эксплуатации является зарождение и подрастание до разрушения микротрещин, возникающих в сварном шве и ЗТВ. Поэтому актуальными являются исследования процессов «залечивания» микротрещин за счет локальных разогревов материала в вершинах трещин.

В частности, важную роль в механизме распространения трещины могут играть электрические процессы, происходящие на ее берегах и в вершине [15]. Скорость развития трещины прежде всего обусловлена изменениями в кристаллической структуре металла [2] под воздействием электрического поля, которые приводят к его упрочнению. В развитие гипотезы об изменении кристаллической структуры [16] исследовали новый способ магнитно-импульсного упрочнения материалов [17], применимый и для сварных соединений. Суть его состоит в том, что образец помещают в переменное магнитное поле и через него пропускают разряд батареи импульсных конденсаторов. Использование переменного магнитного поля обусловлено тем, что в каждом импульсе тока достигаются такие значения напряженности магнитного поля, которые стимулируют начало мартенситных превращений.

Физическая сущность способа поверхностного упрочнения сплавов заключается в создании вихревых токов большой плотности, вследствие чего поверхностный слой металла разогревается до температуры фазового превращения и в нем под воздействием сильных магнитных полей и пластической деформации возникает структура, состоящая из мелкогольчатого мартенсита и мелкодисперсных карбидов и характеризующаяся повышенной твердостью.

Из работы [18] следует, что пропускание импульсов тока по массивной пластине с краевой трещиной сопровождается микровзрывом в ее вершине, приводящим к образованию кратера. При этом сам образец вдали от трещины нагревается всего на несколько десятков градусов. Это явление может быть использовано для притупления вершины трещины.

В работе [19] предложен метод «залечивания» микротрещин в металле с помощью электрического и магнитного полей. Такую возможность исследовали на образцах из армко-железа и стали 60Г. В металле зоны восстановленной сплошности наблюдается измельчение зерна и повышение микротвердости по сравнению с исходным металлом.

В ряде работ, например [20], отмечается, что электроимпульсная обработка сталей различных классов наиболее эффективна после определенного цикла эксплуатации конструкции. В то же время предварительная обработка не приводит к увеличению работоспособности изделий. Очевидно, что для целенаправленного применения данного способа необходимо знание закономерностей воздействия импульсов тока на структуру и фазовый состав обрабатываемых сталей. В работе [21] такой способ обработки апробирован на стали 08Х18Н10Т и доказана возможность повышения работоспособности конструкций из аустенитных сталей.

Известно, что элементы конструкций, испытывающие переменные нагружения, могут разрушаться от усталости при сравнительно низких номинальных напряжениях. Из большого количества факторов, влияющих на сопротивление усталости, основным является концентрация напряжений. В большинстве случаев усталостные трещины зарождаются в зонах изменения сечения или нарушения поверхностного слоя. В сварных конструкциях места перехода шва к основному металлу, и особенно дефектные участки шва, являются очагами усталостного разрушения [22].

В ряде работ [22, 23] подчеркивается необходимость подавления зарождения микроконцентраторов напряжений в материале за счет локализации микродоформаций, что достигается обработкой материала мощными импульсами тока, оптимизированными по частоте, амплитуде и времени воздействия.

В последние годы определенное количество работ посвящено проблеме увеличения долговечности сталей, сплавов и биметаллических материалов путем их обработки мощными импульсами тока на определенном участке усталостной кривой [24, 25]. На основании анализа результатов исследований фазового состава сталей [26–28] установлено, что такое воздействие увеличивает долговечность изделий на 20...30 % и снижает коррозионное растрескивание.

В работе [29] исследован рост трещины в образце из стали 60ГС2 при усталостных испытаниях до разрушения и в условиях электростимулирования импульсами тока на материал. Время этого воздействия составляло до 15 с. При этом ширина зоны усталостного роста трещины в материале, не прошедшем обработку и подвергнутом электростимулированию, в 1,25 раза больше, чем в разрушенном без обработки. Размер данной зоны соответствует критической длине трещины, поэтому можно считать, что электростимулирование увеличивает ресурс работоспособности материала. Существенно различается и максимальная длина докритической трещины: в подвергнутом электростимулированию образце она почти в 2 раза больше, чем в образце, не прошедшем обработку. Следовательно, обработка стали 60ГС2 на промежуточном этапе циклических испытаний способствует существенному увеличению длины докритической трещины. Отмечено положительное изменение структуры стали 60ГС2 в условиях промежуточной обработки импульсами тока при циклических усталостных испытаниях [30]. Одним из механизмов, поясняющим природу повышения усталостной прочности стали при электростимуляции, является снижение уровня остаточных напряжений вследствие локального повышения температуры в местах с раз-

рывом сплошностей в структуре металла, в результате чего происходит релаксация напряжений [31]. Данную гипотезу проверяли на сталях 16ГС и 09Г2 [32, 33]. При этом длительность цикла электростимулирования составляла 30 с, а обработку проводили через каждую тысячу циклов до разрушения материала. На основе анализа влияния электростимулирования на свойства исследуемых материалов можно заключить, что как у стали 16ГС, так и у 09Г2С при указанных циклах нагружения наблюдается увеличение работоспособности конструкций более чем на 70 % (в комплексе с термообработкой).

В работе [34] проведено исследование продолжительности электростимуляции на улучшение свойств стали 40 и стали 45. С помощью методов неразрушающего контроля [35] и оптической микроскопии установлена продолжительность воздействия импульсами тока, при которой имеет место повышение пластичности, и, как следствие, увеличение работоспособности конструкции [36]. Максимальное время обработки составляло 135 с. При проведении усталостных испытаний образцов, обработанных импульсами тока, установлено, что с увеличением продолжительности воздействия импульсами тока  $\tau$  с 30 до 70 с время до разрушения исследуемого материала возрастало. Максимальное увеличение работоспособности конструкции наблюдалось при  $\tau = 70$  с и составляло 28 %. При возрастании времени воздействия импульсами тока до 135 с время до разрушения конструкции уменьшается на 10 %. Предполагается, что наиболее ярко действие электропластического эффекта [37] проявляется при продолжительности воздействия импульсами тока до 70 с; в случае дальнейшего увеличения  $\tau$  доминирующее влияние начинает оказывать тепловой эффект, что может вызвать ухудшение характеристик материала.

В работах [38–40] исследовали влияние воздействия импульсами переменного тока в магнитном поле на структуру и свойства (прочность, пластичность, сопротивление усталостному разрушению и трещиностойкость) биметаллических материалов 40ХНМА и 38ХНЗМФА, наплавленных соответственно сталями 08Х19Н9Ф2С2 и 07Х25Н12Г2Т. Указанные материалы применяют в современном судостроении, причем наплавленные стали используют в качестве антикоррозионных покрытий. В связи с этим представляет интерес изучение влияния воздействий импульсами тока на коррозионную стойкость металлов. Результаты исследования показали, что при воздействии импульсами тока на поверхность обрабатываемых материалов формируется слой металла с особыми физико-химическими свойствами и параметрами структуры — так называемый белый слой. С учетом того, что судостроительные конструкции подвергаются электрокоррозии, его роль можно сравнить с действием антикоррозионного покрытия. С помощью металлографических исследований установлено снижение количества примесей на границах зерен основных сталей 40ХНМА и 38ХНЗМФА после воздействия импульсами тока, а также выходов дислокаций на поверхность металлов, что практически исключает протекание межкристаллитной коррозии и приводит к повы-

шению усталостной прочности данных сталей в условиях коррозионной среды (морская вода).

Одним из факторов, определяющих работоспособность сварных конструкций, являются остаточные напряжения, негативно влияющие, в частности, на прочность, коррозионную стойкость и геометрические характеристики изделий. Снижение уровня остаточных напряжений положительно сказывается на повышении долговечности конструкций.

Установлено, что воздействие импульсами тока на металл, подвергаемый растяжению до уровня пластичности [9], приводит к релаксации его напряженно-деформированного состояния. В сварном шве и ЗТВ имеют место напряжения растяжения, близкие к пределу текучести металла. Обработка шва и ЗТВ импульсами тока может положительно влиять на снижение уровня остаточного напряженно-деформированного состояния металлических конструкций.

Проводились работы по применению обработки импульсами тока для повышения механических свойств сварных соединений из молибдена и его сплавов, полученных контактной стыковой сваркой [41]. Через соединения стержней из сплавов молибдена диаметром 8 мм пропускали импульсы тока высокой энергии длительностью до 0,6 с. При этом имело место улучшение механических свойств обработанных соединений по сравнению с непроработанными, что объясняется ускорением процессов диффузии и релаксации напряжений, «залечиванием» микродефектов и формированием дисперсной дислокационной структуры.

При выполнении сварных швов электрошлаковым способом жидкий и остывший металл шва обрабатывали импульсным электромагнитным полем [42]. После чего проводили механические испытания, результаты которых показали возрастание ударной вязкости на 30 % и снижение порога хладноломкости от  $-40$  до  $-65$  °С. Это объясняется тем, что воздействие электромагнитного поля на сварочную ванну при электрошлаковом процессе способствует увеличению центров кристаллизации и измельчению зерен при вторичной перекристаллизации.

## Выводы

1. Воздействие на конструкционные материалы импульсами тока вызывает активацию дислокационных, фазовых и термомеханических процессов, вследствие чего происходит изменение механических свойств обрабатываемых металлов и сплавов.
2. Установлено, что различные виды воздействия импульсами тока при заданных энергетических параметрах процесса положительно влияют на напряженное состояние, статическую и усталостную прочность, пластичность, трещино- и коррозионную стойкость, а также ударную вязкость алюминиевых сплавов, конструкционных сталей и биметаллических материалов.
3. На основании анализа результатов исследовательских работ, посвященных повышению механических свойств конструкционных материалов, представляется перспективным применение обработки сварных конструкций импульсами тока как способа повышения их ресурса.



1. *Пластичность* и прочность металлических материалов при импульсном воздействии высокоэнергетического электромагнитного поля / Н. Н. Беклемишев, Н. М. Горбунов, Н. И. Корякин и др. — М.: ИПМ АН СССР, 1989. — 56 с.
2. *Троицкий О. А., Розко А. Г.* Электропластическая деформация металла // *Физика твердого тела*. — 1970. — **12**, № 1. — С. 203–210.
3. *Физические* основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
4. *Спицин В. В., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. — М.: Наука, 1985. — 160 с.
5. *Климов К. М., Новиков И. И.* Особенности пластической деформации металлов в электромагнитном поле // *Докл. АН СССР*. — 1980. — **253**, № 3. — С. 603–606.
6. *Александров Г. И.* Теория электрических аппаратов. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
7. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Влияние электрического тока и импульсного магнитного поля на скорость ползучести металла // *Докл. АН СССР*. — 1974. — **216**, № 6. — С. 1266–1269.
8. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Электропластический эффект в металлах // *Вестн. АН СССР*. — 1977. — № 11. — С. 10–15.
9. *Акустическая* эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов // *Материаловедение*. — 2004. — № 7. — С. 29–33.
10. *Синергетика* электростимулированного усталостного разрушения / В. А. Петрунин, Д. З. Чиракадзе, В. Я. Целлермаер и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. — 1997. — № 6. — С. 46–49.
11. *Мезоскопический* уровень пластической деформации в условиях электростимулированного усталостного разрушения / В. А. Петрунин, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов и др. // *Физ. мезомеханика*. — 1999. — № 4. — С. 91–93.
12. *Климов К. М., Новиков И. И.* Действие импульсов электрического тока на процесс растяжения тонких металлических проволок // *Металлы*. — 1983. — № 3. — С. 155–158.
13. *Субструктурные* изменения в меди при импульсном воздействии электромагнитного поля / Ю. В. Баранов, А. И. Тананов, С. Н. Корякин и др. // *Физика и химия обраб. материалов*. — 1980. — № 4. — С. 62–68.
14. *Влияние* импульсного электрического тока на характеристики конструкционной прочности металлических материалов / Н. Н. Беклемишев, Ю. В. Баранов, Ю. Л. Доронин и др. // *Там же*. — 1990. — № 4. — С. 108–112.
15. *Финкель В. М.* Физические основы торможения разрушения. — М.: Металлургия, 1977. — 359 с.
16. *Об упрочнении* металла в устье трещины, обтекаемой импульсом тока / В. М. Финкель, Ю. И. Головин, В. М. Иванов и др. // *Физика и химия обраб. материалов*. — 1981. — № 2. — С. 42–45.
17. *Поверхностное* упрочнение металлических материалов с помощью магнитно-импульсной установки / В. В. Гайдук, В. Р. Роккель, Д. В. Гайдук и др. // *Сталь*. — 2004. — № 7. — С. 87–89.
18. *Головин Ю. И., Финкель В. М., Слетков А. А.* Образование кратера в вершине трещины под действием мощного локального электромагнитного поля // *Физика и химия обраб. материалов*. — 1977. — № 3. — С. 18–23.
19. *Финкель В. М., Иванов В. М., Головин Ю. И.* Залечивание трещин в металлах скрещенными электрическими и магнитными полями // *Пробл. прочности*. — 1983. — № 4. — С. 54–58.
20. *Степанов Г. В., Бабицкий А. И.* Влияние импульсного тока высокой плотности на усталостную долговечность стального образца с концентратором // *Там же*. — 1995. — № 5. — С. 74–78.
21. *Мезоскопическая* субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения / Ю. В. Иванов, Д. В. Лычагин, В. Е. Громов и др. // *Физ. мезомеханика*. — 2000. — **3**, № 1. — С. 103–108.
22. *Панин В. Е.* Основы физической мезомеханики // *Физ. мезомеханика*. — 1998. — Т. 1. — С. 5–22.
23. *О возможности* залечивания усталостных повреждений / Л. Б. Зуев, О. В. Соснин, В. Е. Громов и др. // *Металлофизика* и новейшие технологии. — 1997. — **19**, № 8. — С. 80–82.
24. *Эволюция* дефектной структуры и фазового сдвига стали 18Н10Т при малоцикловых усталостных испытаниях / В. В. Коваленко, О. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов и др. // *Физика и химия обраб. материалов*. — 2000. — № 6. — С. 74–80.
25. *Электронно-микроскопический* анализ стали 45Г17Ю3 при электростимулированной многоциклового усталости / С. В. Коновалов, О. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. — 2003. — № 6. — С. 65–69.
26. *Электропластификация* закаленной углеродистой стали / Ю. Ф. Иванов, О. В. Соснин, Е. Ю. Сучков и др. // *Физ. мезомеханика*. — 2003. — № 6. — С. 71–75.
27. *Исследование* влияния импульсных воздействий на коррозионную стойкость металлических и биметаллических материалов / В. Л. Володин, В. Д. Тхай, Ю. Ф. Коныхов и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. — 2002. — № 6. — С. 39–43.
28. *Восстановление* ресурса стальных изделий при многоциклового усталости воздействием токовыми импульсами / С. В. Коновалов, О. С. Лейкина, Б. С. Семухин и др. // *Перспект. материалы*. — 2002. — № 3. — С. 45–48.
29. *Соснин О. В.* Подавление трещинообразования в стали 60ГС2 токовыми импульсами при многоциклового усталости // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. — 2003. — № 12. — С. 30–32.
30. *Соснин О. В., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е.* Эволюция структуры стали 60ГС2 при циклических усталостных испытаниях в условиях токового воздействия // *Там же*. — 2003. — № 12. — С. 27–30.
31. *Электростимулированная* пластичность металлов и сплавов / В. Е. Громов, Л. Б. Зуев, Е. В. Козлов и др. — М.: Недра, 1996. — 160 с.
32. *Малоцикловая* усталость низкоуглеродистых сталей 16ГС и 09Г2С при электростимулировании / С. В. Коновалов, О. В. Соснин, Б. С. Семухин и др. // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. — 2000. — № 10. — С. 55–57.
33. *Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. А.* Скорость звука и структуры сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996. — 280 с.
34. *Троицкий О. А., Моисеенко М. М.* К вопросу о скоростной зависимости электронно-пластического эффекта // *Изв. АН СССР. Металлы*. — 1984. — № 4. — С. 38–43.
35. *Бородин М. М., Спектор Э. Н.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 227 с.
36. *Электростимулированная* малоцикловая усталость / О. В. Соснин, В. Е. Громов, Е. В. Козлов и др. — М.: Недра, 2000. — 280 с.
37. *Электростимулированная* пластичность металлов и сплавов / В. Е. Громов, Л. Б. Зуев, Е. В. Козлов и др. — М.: Недра, 1996. — 29 с.
38. *Володин В. Л.* Исследование влияния тепловых энергетических воздействий на структуру и свойства биметаллических соединений // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. — 1993. — № 8. — С. 74–77.
39. *Исследование* импульсных воздействий на структуру и свойства биметаллических материалов / В. Л. Володин, В. В. Гайдук, А. А. Масляков и др. // *Там же*. — 2001. — № 2. — С. 45–49.
40. *Влияние* импульсных магнитных полей на структуру и свойства металлических сплавов / В. Л. Володин, В. Д. Сарычев, Л. Н. Гудимова и др. // *Там же*. — 1990. — № 10. — С. 77–79.
41. *Повышение* механических свойств сварных соединений / С. А. Ярославцев, Ю. В. Курочкин, А. Я. Подольский и др. // *Всероюз. конф. «Использование импульсной технологии в сварочном производстве»*, г. Николаев, 4–6 окт. 1988 г.: Тез. докл. — Николаев: ЦНИИ «Лот», 1988. — С. 24–26.
42. *Пономаренко В. Н., Корнеев Д. И., Шарченко К. И.* Повышение свойств сварных соединений при воздействии импульсными электромагнитными полями на процесс ЭПС // 1-я *Всероюз. конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность металлов»*, г. Юрмала, 29 сент.–1 окт. 1987 г.: Тез. докл. — М.: Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова АН СССР, 1987. — С. 68.

Current concepts of the influence of structural material treatment by current pulses on their mechanical properties are generalized. Types of electric pulse impact on current-carrying materials are classified, and prospects for its application to improve the mechanical properties of welded joints are outlined. It is established that electric pulse treatment of welded joints may be promising for extending the service life of metal structures.

Поступила в редакцию 21.04.2005

## ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ГОРЯЧЕЗАКАТНЫХ ДНИЩ БАЛЛОНОВ ИЗ СТАЛИ 20ХН4ФА С ПОМОЩЬЮ СВАРКИ

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

Рассмотрены причины образования дефектов в днищах горячезакатных баллонов и особенности их устранения. Дана оценка свариваемости стали 20ХН4ФА, рекомендована температура предварительного подогрева, сварочные электроды и техника ручной дуговой сварки. Опробован способ автоматической сварки под флюсом на подкладке как альтернативный сварочный процесс.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, горячая вальцовка, днище баллона, технология изготовления баллонов, герметизация

Одним из способов промышленного изготовления автомобильных газовых баллонов предусматривается такой процесс, как горячая вальцовка горловин и днищ. В качестве заготовки используются секции бесшовных труб толщиной 4 мм и диаметром 215 мм из стали 20ХН4ФА. После вальцовки толщина днищ баллонов увеличивается до 15...18 мм. Вследствие высокотемпературного нагрева до состояния высокой пластичности металла и быстрого прохождения рекристаллизации в условиях деформирования торцы труб покрываются окалиной, которая остается на стенке днища в зоне заката в виде прослоек. Для гарантирования герметизации полученных сферических днищ выполняют заварку зон стыковки с деформированных краев трубы в вершине сферы с помощью дуговой сварки плавлением. Однако, как выявили гидравлические испытания опытных образцов баллонов, заварка днищ баллонов без специальной механической обработки не обеспечивает стабильной герметичности соединений.

Ниже приведены результаты исследований по выбору способа, вида обработки, техники и режимов сварки с целью получения сварных соединений в вершине свальцованных днищ.

**Свариваемость стали 20ХН4ФА и выбор теплового режима сварки.** Сталь 20ХН4ФА относится к категории высокопрочных материалов и обычно рекомендуется для изготовления несварных изделий [1]. Эквивалент углерода, рассчитанный по известной формуле МИС [2] для предельно допустимых колебаний химических элементов в составе стали 20ХН4ФА по ГОСТ 4543-71 (табл. 1), составляет  $C_{\text{э}} = 0,64...0,89$ , что свидетельствует о высокой склонности стали к образованию холодных трещин (ориентировочным критерием служит  $C_{\text{э}} = 0,40...0,45$ ; если значения  $C_{\text{э}}$  превышают указанные, то сталь считается склонной к трещинообразованию).

Таблица 1. Химический состав стали 20ХН4ФА, мас. %

Материал	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Cu	S	P
В состоянии поставки	0,23	0,38	0,40	0,87	3,96	0,11	0,18	0,010	0,007
По ГОСТ 4543-71	0,17...0,24	0,25...0,55	0,17...0,37	0,70...1,10	3,75...4,15	0,10...0,18	< 0,30	< 0,025	< 0,025

Для оценки свариваемости данной стали изучен характер термокинетических превращений, происходящих в зоне термического влияния (ЗТВ), и по результатам испытаний на склонность к образованию холодных трещин выбрана оптимальная температура предварительного подогрева при сварке [3].

Представленные на рис. 1 результаты дилатометрических исследований показали, что при скорости охлаждения  $w_{6/5}$  (в интервале температур 600...500 °С) выше 20 °С/с в металле ЗТВ формируется чисто мартенситная структура, характеризующаяся высокой твердостью. Замедленное охлаждение приводит к более интенсивному развитию диффузионных процессов и прохождению промежуточного (бейнитного) превращения. С увеличением объемной доли бейнитной составляющей твердость металла снижается, хотя при  $w_{6/5} > 16$  °С/с остается выше ориентировочных значений ( $HV$  3500...4000 МПа [2]); в случае их превышения возрастает риск образования холодных трещин.

Эффективной мерой регулирования теплового режима при сварке является предварительный (сопутствующий) подогрев, который позволяет воздействовать как на силовую, так и на физико-металлургические (диффузионные и фазовые превращения, транспорт водорода) факторы, влияющие на структуру металла ЗТВ и технологическую прочность сварных соединений.

Для определения оптимальной температуры предварительного подогрева проведены испытания сварных соединений стали 20ХН4ФА на склонность к образованию холодных трещин методом вставок (имплант) [4]. Сварку выполняли с предварительным подогревом от 150 до 300 °С с использованием электродов, обеспечивающих концентрацию диффузионного водорода до 4,5 см<sup>3</sup> на 100 г Me. Установлено, что при подогреве свыше 200...250 °С стойкость против образования трещин резко возрастает. Как видно из диаграммы на рис. 2, объединяющей температуру предварительного подогрева  $T_{\text{п}}$ , скорость охлаждения металла ЗТВ  $w_{6/5}$

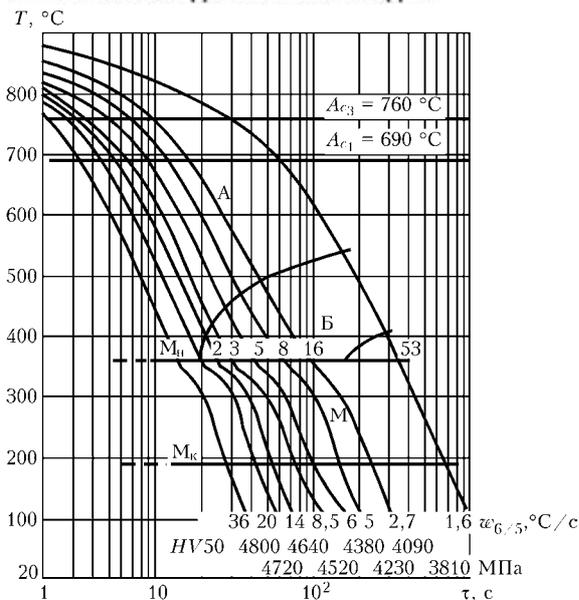


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в стали 20ХН4ФА [3]

(в условиях испытаний имплант) и зависящие от нее содержание бейнита в бейнитно-мартенситной структуре металла ЗТВ, а также твердость  $HV 50$  (взяты из диаграммы термокинетического превращения аустенита), сварка с подогревом от 200 до 300 °С обеспечивает скорость охлаждения, достаточную для выделения в металле ЗТВ от 3 до 6 об. % бейнита. Твердость такого металла составляет приблизительно  $HV 50$  4400...4500 МПа.

Таким образом, высокая стойкость сварных соединений стали 20ХН4ФА против образования холодных трещин имеет место при скоростях охлаждения, обеспечивающих начало развития бейнитного превращения в структуре металла ЗТВ. Это достигается при предварительном подогреве до 200...300 °С, рекомендованном при заварке днищ баллонов.

**Выбор электродов и механические свойства сварных соединений.** В связи с тем, что сталь 20ХН4ФА для получения сварных соединений ранее не использовали, рекомендаций по применению материалов для ее сварки нет. Поскольку указанная сталь относится к категории закаливающихся и трудносвариваемых материалов, то для снижения риска образования холодных трещин при сварке, помимо предварительного подогрева, необходимо ограничивать переход в ЗТВ водорода из наплавляемого металла. Для этого следует применять сварочные электроды с основным типом покрытия. Для снижения степени «жесткости» сварного соединения — фактора, который в условиях термомеханического цикла сварки способствует накоплению внутренних напряжений и зарождению холодных трещин в ЗТВ, целесообразно применять сварочные материалы, обеспечивающие получение металла шва с пределом текучести меньшим, чем у металла ЗТВ. При этом нарастание напряжений и развитие пластических деформаций при усадке в шве, способствуя снижению уровня внутренних напряжений в сварном соединении, будет приводить к наклепу металла шва, а следовательно, повышению его прочностных свойств [5].

Были опробованы несколько марок электродов с покрытием, применяемых для сварки ответствен-

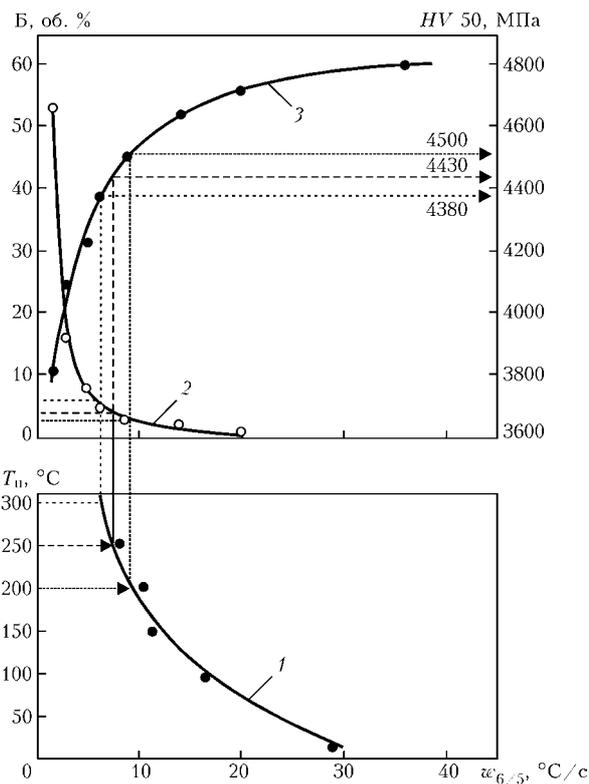


Рис. 2. Влияние температуры предварительного подогрева  $T_n$  пластины на скорость охлаждения (1) (в условиях испытания имплант), объемную долю бейнита Б (2) и твердость металла ЗТВ  $HV 50$  (3)

ных конструкций из углеродистых низколегированных сталей (табл. 2). Металл, наплавленный указанными электродами, имеет близкий химический состав, мас. %: 0,07...0,09 С; 0,25...0,50 Si; 0,63...1,30 Mn; 0,02...0,03 S; 0,015...0,030 P. Однако сочетание более высокой пластичности при достаточно высоких показателях прочности обеспечивают только электроды ТМУ-21У, Fox EV 50, ОК 53.70, LB-52U. Так, например, металл труб из стали 20ХН4ФА имеет следующие прочностные свойства, МПа: временное сопротивление составляет 1334...1520; предел текучести — не менее 1079.

Для проверки прочности сварных соединений стали 20ХН4ФА выбраны электроды ТМУ-21У диаметром 3 мм (производства России) и ОК 53.70 диаметром 3,2 мм (фирма ESAB, Швеция). Образцы для испытаний на статическое растяжение (ГОСТ 6996-66) вырезали поперек стыковых соединений, полученных из трубной стали толщиной 5 мм и прошедших отпуск при 250 °С. Сварку выполняли на следующем режиме: сварочный ток  $I_{св} = 110...120$  А (постоянный, полярность обратная); напряжение на дуге  $U_d = 22...24$  В. Кромки стыкового соединения имели одностороннюю V-образную разделку. Концентрация диффузионного водорода  $H_{диф}$  (спиртовый анализ «карандашных» проб [6]), переходящего из сварочных электродов в наплавленный металл, составляла 1,25 см<sup>3</sup>/100 г Me при использовании электродов ОК 53.70 и 3,3 см<sup>3</sup>/100 г Me в случае электродов ТМУ-21У.

Результаты испытаний представлены в табл. 3. Выбранные электроды обеспечивали достаточно высокие и практически одинаковые показатели прочности сварных соединений. При этом холодные трещины не возникали. Дополнительно испытаны со-

**Таблица 2. Механические свойства наплавленного металла при ручной дуговой сварке**

Марка электрода	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
					T = +20 °C	T = -20 °C
УОНИ-13/45	360	470	24,0	57,0	155	—
ТМУ-21У	370	520	25,0	59,0	155	—
ЦУ-5	350	500	22,0	58,0	147	—
Fox EV 50	450	540	30,0	65,0	—	180
OK 53.70	440	530	30,0	68,0	—	200
LB-52U	510	600	25,0	71,0	—	195

единения, полученные с использованием электродов ТМЛ-3У, которые обычно применяются при сварке хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых теплоустойчивых сталей ( $H_{\text{диф}} \approx 2,7 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$ ). Уровень прочности на разрыв и характер разрушения образцов аналогичны предыдущим. Таким образом, электроды испытанных марок (а также подобные им) можно применять для заварки негерметичных участков в днищах баллонов. При этом предпочтительнее выбирать электроды с меньшей концентрацией диффузионного водорода.

**Устранение причин возникновения негерметичности.** Торцы труб, сходящиеся в зените сферической части баллона при горячем деформировании, образуют складки, заключающие в себе прослойки прочно застрявшей окалины, которые могут пересекать в этой зоне все сечение стенки. Как показали металлографические исследования, окалина приводит к образованию расслоений и трещин в основном металле, а при взаимодействии со швом продукты, содержащиеся в окалине, вызывают образование несплавлений по краям последнего, а также пор и трещин в наплавленном металле. Типичный вид дефектов в макро- и микроструктуре металла «закатных» зон днищ баллонов с герметизирующими швами показан на рис. 3. В совокупности эти дефекты приводят к образованию сквозных каналов, а следовательно, к потере герметичности соединения.

Как правило, «закатные» трещиноподобные слои концентрируются в узкой зоне стыковки кромок. Для их удаления предложено осуществлять выборку дефектного металла путем высверливания. С целью облегчения доступа сварочного электрода к корню будущего шва необходимо выполнять коническую выборку металла. Отработанный экспериментально угол скоса в коническом отверстии позволяет достаточно эффективно «очистить» металл от внутренней окалины и обеспечить удобное заполнение отверстия.

**Техника заварки отверстий.** Для заварки технологических отверстий в днищах баллонов (без дополнительно вставляемой пробки) опробованы два процесса: ручная дуговая сварка покрытыми электродами (как основной) и автоматическая сварка под флюсом как дополнительный процесс с целью проверки возможности его применения. Основной особенностью ручной дуговой сварки является возможность выполнения сварки на весу (без подкладки) в любых пространственных положениях.

В ходе сварочно-технологических испытаний установлено, что для получения качественных швов

**Таблица 3. Результаты испытаний сварных соединений стали 20ХН4ФА на кратковременный разрыв**

Маркировка образца	Марка электрода	$\sigma_{0,2}$ , МПа
39-1	ТМЛ-3У	915
39-2		1007
21-1	ТМУ-21У	886
21-2		1086
28-1	OK 53.70	994
28-1		1099

днищ баллонов необходимо применять следующие приемы техники сварки.

1. При выполнении корневого шва сварочный ток следует уменьшить на 10... 15 % по сравнению с номинальным; зажигать дугу необходимо на средней части образующей конической выборки, после чего переместить дугу к отверстию и заварить его спиральным швом — от края к центру отверстия на короткой дуге.

2. Последующие проходы осуществлять на номинальном сварочном токе, начиная шов на границе сплавления основного металла со швом предыдущего прохода и заканчивая в центре выборки; сварной шов необходимо выполнять по спирали.

3. Количество слоев зависит от толщины металла в месте выборки, толщина одного слоя должна составлять 3... 5 мм.

4. После каждого прохода следует тщательно удалять шлак из выборки, обращая особое внимание на место перехода шва к основному металлу.

5. Для предотвращения образования пор сварку необходимо выполнять прокаленными электродами на короткой дуге, избегая подрезов на стенке выборки.

Указанная техника сварки имеет следующие преимущества: меньшее тепловложение в каждом проходе дает возможность получать металл шва с более мелкой первичной структурой и металл ЗТВ с зерном более мелкого размера; многопроходный способ сварки валиками малого сечения исключает транскристаллитное строение металла шва, способствует получению дезориентированной структуры шва между слоями, а также измельчению зерна металла ЗТВ вследствие фазовой перекристаллизации [7], что в целом положительно сказывается на технологической прочности сварных соединений; возможность осуществления визуального контроля качества шва после каждого прохода; удобство и простота настройки под сварку, мобильность.

К недостаткам следует отнести низкую производительность процесса сварки. К тому же при выполнении многопроходных швов в случае недостаточной квалификации сварщика существует вероятность возникновения таких дефектов, как шлаковые включения, поры и несплавления.

При механизированном процессе заварка технологических отверстий на весу недопустима из-за вытекания металла шва через его корневую часть. Поэтому сварку выполняли с использованием подкладок — чисто медной и медной со слоем флюса (флюсомедной). При отработке режимов и техники сварки использовали стальные пластины толщиной 20 мм с отверстиями двух типов — цилиндрическим и коническим. Для сварки применяли штатное сварочное оборудование — головку А1416 и выпрямитель ВДУ 1201. Длительность горения ду-

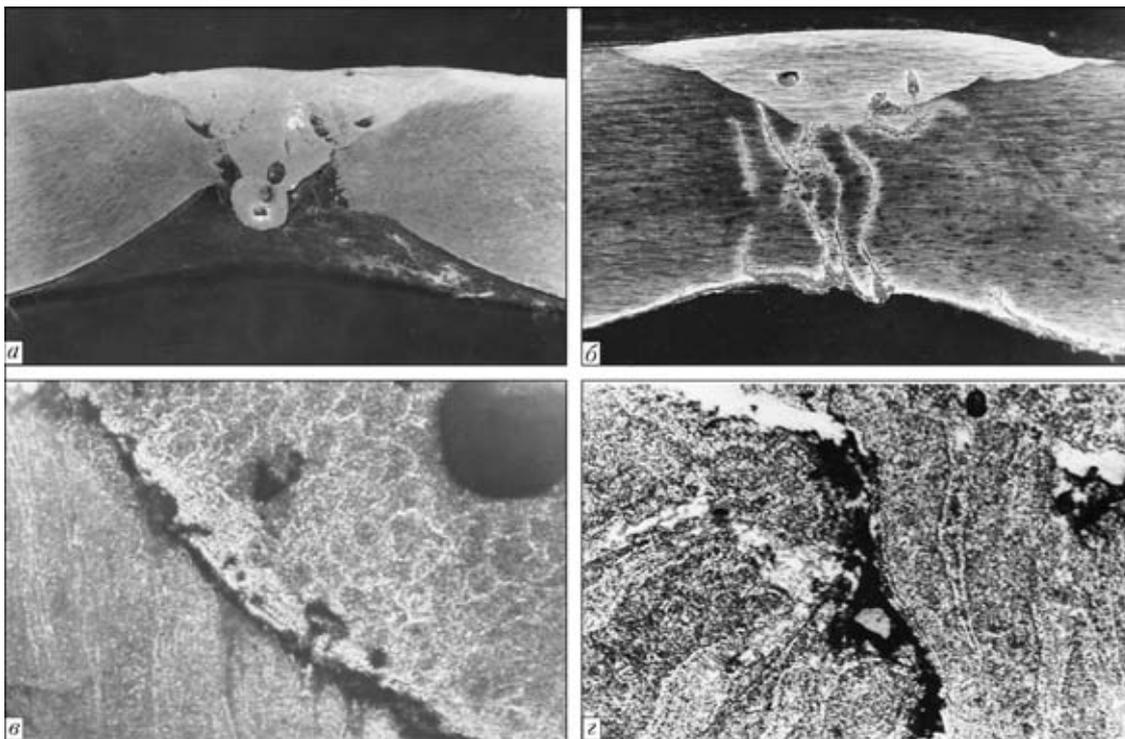


Рис. 3. Макро- (*a, б*) и микроструктура (*в, г*) «закатных» зон дниц баллонов с герметизирующими швами: *a* — общий вид дефектов в шве (поры в металле шва и трещины в зоне сплавления); *б* — общий вид пор в шве и трещиноподобных дефектов в основном металле; *в* — трещины в зоне сплавления,  $\times 100$ ; *г* — несплошности, образовавшиеся при растрескивании в зоне скопления окалины,  $\times 200$

ги и скорость подачи сварочной проволоки подбирали исходя из условий заполнения отверстия.

При использовании медной подкладки можно возбуждать дугу непосредственно на ней, что позволяет выполнять в днищах баллонов цилиндрические отверстия. В случае флюсомедной подкладки возбуждение дуги происходит на основном металле на поверхности конической разделки.

При увеличении толщины металла в зоне заварки отверстия до размера оптимального вылета электрода  $10d_3$  (где  $d_3$  — диаметр сварочной проволоки) вылет требуется также увеличить во избежание закорачивания мундштука на изделие. В настоящей работе сварку выполняли с увеличенным вылетом ( $16d_3$ ), что, однако, не отразилось на результатах заварки отверстий.

Вид подготовленных отверстий в пластинах представлен на рис. 4, а подобранные режимы их заварки — в табл. 4 и 5.

Опыты показали, что при использовании механизированного процесса удается получить монолитный шов. Однако у опробованных способов есть

свои недостатки. Так, для сварки на медной подкладке характерно неудовлетворительное формирование обратной стороны шва (рис. 5, *a, б*). Имеет место недозаполнение металлом нижней части отверстия (рис. 5, *a*), дефекты типа подрезов, неровность поверхности обратной стороны шва (рис. 5, *б*) и в ряде случаев трещиноподобные дефекты у неровностей. Неровности формируются при неудовлетворительном растекании по подкладке первых фракций расплавленного металла, разделяемых нерасплавившимися частицами просыпавшегося флюса, что, по-видимому, связано со значительной теплоотводящей способностью меди. Кроме того, происходит прихватывание медной подкладки к металлу шва.

Указанные недостатки исключаются при использовании флюсомедной подкладки. При разделке с коническим отверстием в зените за счет дополнительного внутреннего скоса  $\alpha_2$ , как показано на рис. 4, *б*, возможно получение соединений с качественным формированием шва (рис. 5, *в*). Оптимальные условия заварки отверстий, подобранные для сварки электродами диаметрами 3 и 4 мм,

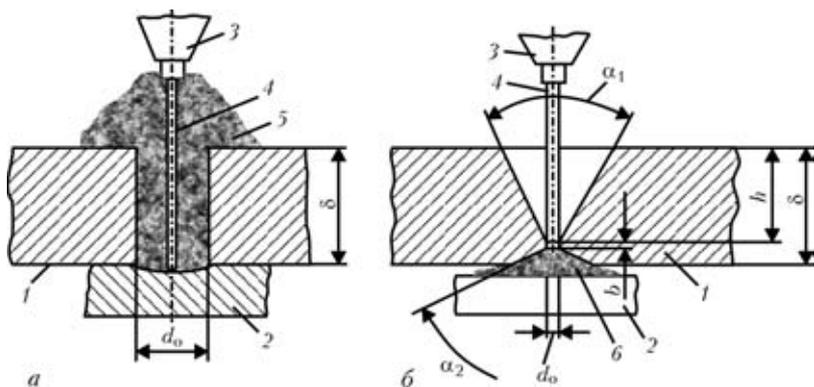


Рис. 4. Вид отверстий, подготовленных в пластинах для сварки на медной (*a*) и флюсомедной подкладке (*б*): 1 — основной металл; 2 — медная подкладка; 3 — мундштук сварочной головки; 4 — электродная проволока; 5, 6 — соответственно сварочный и подкладочный флюсы;  $d_0$  — цилиндрическое отверстие;  $\delta$  — толщина стали;  $\alpha_1$  — угол раскрытия конического отверстия;  $\alpha_2$  — угол конической внутренней выборки;  $h$  — глубина конического отверстия;  $b$  — притупление

Таблица 4. Варианты заварки отверстий в днищах с использованием различных подкладок при толщине свариваемой стали 20 мм

Форма отверстия	Тип подкладки	$\alpha_1$ , град	$\alpha_2$ , град	$d_o$ , мм	$h$ , мм	$b$ , мм
Цилиндрическая	Медная	—	—	10,2	—	—
Коническая	Флюсомедная	50	120	2,8 (3,8)*	17	1

\* Диаметр электродной проволоки 3(4) мм.

Таблица 5. Оптимальные условия заварки под флюсом отверстий в днищах из низколегированной высокопрочной стали толщиной 20 мм

$d_o$ , мм	$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$\tau$ , с	Вылет электрода, мм
3	400...420	32...34	7...9	48
4	500...520		6...8	64

Примечание. Размер зерен флюса для флюсомедной подкладки — менее 0,63 мм.



Рис. 5. Макрошлифы отверстий, заваренных под флюсом при сварке на медной (а, б) и флюсомедной (в) подкладке

представлены в табл. 5. Для обеспечения удовлетворительного формирования обратной стороны шва с незначительной или нулевой выпуклостью при флюсомедной подкладке рекомендуется применять флюс мелкой грануляции, что обеспечивает ее плотное прилегание к обратной стороне изделия.

Факторами, влияющими на формирование внешней стороны шва, являются в первую очередь сварочный ток  $I_{св}$  и продолжительность горения дуги  $\tau$ . Коническая форма отверстий, подлежащих заварке, в данном случае предпочтительнее, чем цилиндрическая, особенно при увеличении их глубины, поскольку именно такая форма обеспечивает более благоприятную направленность кристаллизации металла шва (отсутствуют зоны с поперечным ростом кристаллитов), способствующую всплыванию шлаковых включений.

Отверстия цилиндрической формы технически выполнить более просто. В случае применения при этом флюсомедной подкладки для обеспечения закорачивания электрода на изделии цилиндрическая выборка металла в области корня шва должна иметь диаметр менее  $d_o$ . Однако при этом из-за малого объема выбранного металла повышается вероятность присутствия в нем окалины.

Таким образом, в случае применения автоматической сварки под флюсом целесообразно использовать вариант с флюсомедной подкладкой. Он лишен недостатков, свойственных чисто медной подкладке. Однако механизированная сварка требует специализированной аппаратуры и дополнительных приспособлений для введения через горловину и крепления подкладки, что значительно усложняет весь процесс сварки. Кроме того, непостоянная толщина стенки в зените днища в зоне отверстий требует постоянной корректировки режима сварки. Поэтому более приемлемой является ручная дуговая сварка покрытыми электродами, при которой

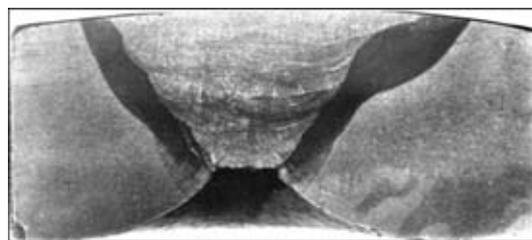


Рис. 6. Макрошлиф соединения, полученного при заварке технологического отверстия в днище баллона из стали 2ХН4ФА ручной дуговой сваркой

заварку отверстий выполняют с предварительным подогревом. Вид соединения, полученного ручной дуговой сваркой, представлен на рис. 6.

Рекомендуемый процесс ручной дуговой сварки обеспечивает высокое качество сварных соединений, прошел всестороннее опробование и принят для заводского изготовления штатных баллонов емкостью 20 и 50 л, рассчитанных на рабочее давление 16,9 МПа и предназначенных для хранения автомобильного топлива.

1. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 639 с.
2. *Гривняк И.* Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
3. *Структурные превращения и свариваемость закаляющейся высокопрочной стали 20ХН4ФА* / В. Ю. Скульский, А. К. Царюк, В. Г. Васильев, Г. Н. Стрижнук // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 19–23.
4. *Sawhill J. M., Dix A. W., Sawage W. F.* Modified implant test for studying delayed cracking // *Welding J.* — 1974. — **35**, № 12. — P. 554–560.
5. *Закс И. А.* Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справ. пособие. — СПб.: Welcome, 1996. — 384 с.
6. *Козлов Р. А.* Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 154 с.
7. *Chew B., Harris P.* HAZ refinement in CrMoV steel. Effects of welding position, weld preparation and electrode size // *Metal Construction.* — 1979. — May. — P. 229–234.

The paper deals with the causes for defect formation in the bottoms of hot-sealed cylinders and features of their repair. Weldability of 20KhN4FA steel is evaluated, preheating temperature, welding electrodes and technique of manual arc welding are recommended. The method of automatic submerged-arc welding on a backing is tested as an alternative welding process.

Поступила в редакцию 30.05.2005



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАГОННЫХ КОЛЕС НАПЛАВКОЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОТЖИГОМ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ

В. В. МАТВЕЕВ, директор ЗАО «Вилтранс» (г. Киев)

Рассмотрен комплекс технологических задач, которые необходимо решить в процессе восстановления железнодорожных колес наплавкой. Предложена технология высокопроизводительной многоэлектродной наплавки колес после отжига поверхности катания.

*Ключевые слова:* восстановление, вагонные колеса, дефекты поверхности катания, высокочастотный нагрев, ТВЧ отжиг, многоэлектродная наплавка, микроструктура

Колеса, имеющие после эксплуатации изношенную поверхность катания (рис. 1, поз. 4), для восстановления исходного профиля (рис. 1, поз. 1) обтачивают на колесотокарных станках по копиру. Ежегодно на вагоноремонтных предприятиях Украины обтачивают 400 тыс. вагонных колесных пар с уменьшением обода в среднем на 4...6 мм. При этом стоимость обточки одного миллиметра колеса оценивается в 51 гривню.

Для восстановления одного миллиметра толщины изношенного гребня вагонных колес к стандартному профилю шириной гребня 33 мм, измеренному на расстоянии 18 мм от вершины гребня, необходимо уменьшить обод на 2 мм. С целью сохранения толщины обода при восстановлении вагонных колес на предприятиях железнодорожного транспорта Украины, стран СНГ, Швеции, Германии, Чехии, Болгарии, Польши, Румынии, Индии применяют автоматическую дуговую наплавку изношенных гребней под флюсом [1–3] и обточку (рис. 1). В странах СНГ обточка предусмотрена действующими нормативными документами [4]. Известны работы по восстановлению обода вагонных колес наплавкой [1,

2] и обточкой (рис. 1, поз. 3). Однако по ряду причин, рассмотренных ниже, действующими нормативными документами восстановление ободов у вагонов, выходящих на магистрали стран СНГ, не предусмотрено.

Целью данной работы является изучение возможностей усовершенствования технологии восстановления вагонных колес наплавкой, а также применение многоэлектродной наплавки обода колеса после отжига поверхности катания. При решении проблем восстановления колес дуговой наплавкой необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Во-первых, восстановление вагонных колес наплавкой связано с потерей уровня сжимающих напряжений, создаваемых закалкой колес на заводе-изготовителе (содержание углерода в колесной стали 0,55...0,65%), выявлением и устранением дефектов металлургического происхождения [5].

Металлографические исследования колес с толщиной обода около 30 мм, поступившие в ремонт на вагоноремонтные заводы Украины, выполнены в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Установлено, что микроструктура металла обода колеса состоит из сорбитообразного перлита с микротвердостью HV1-2540...2560 МПа и тонких прослоек феррита с микротвердостью HV1-1850 МПа, твердость металла обода около HRC 20, гребня HRC 21...23. В металле ободьев колес выявлены сульфиды марганца размером не менее 0,49 мм, сложные силикаты с высокой твердостью HV1-7420...7720 МПа. Балл загрязненности сульфидами и силикатами колесной стали по ГОСТ 1778-70 соответствует № 3...4. Ввиду своей неправильной формы эти включения могут являться концентраторами напряжений, что может привести к образованию трещин и их развитию в результате циклических нагрузок при эксплуатации. В то же время согласно ГОСТ 10791-89 «Колеса цельнокатаные» балл сульфидных включений и силикатов в колесной стали не должен превышать № 3,5.

Согласно ГОСТ 10791-89 и ISO 1005/6 сходимость обода после радиальной разрезки колеса (в состоянии поставки) должна быть не менее 1 мм, расходимость не допускается. В процессе эксплуатации колес под действием механических нагрузок на поверхность катания сходимость концов обода после разрезания составляет -1...-2 мм. В ряде случаев после тормозных испытаний напряжения переходили в растягивающие (+1...+2 мм) [6]. По нашим данным, колеса с толщиной обода менее 45 и более 30 мм, поступающие в

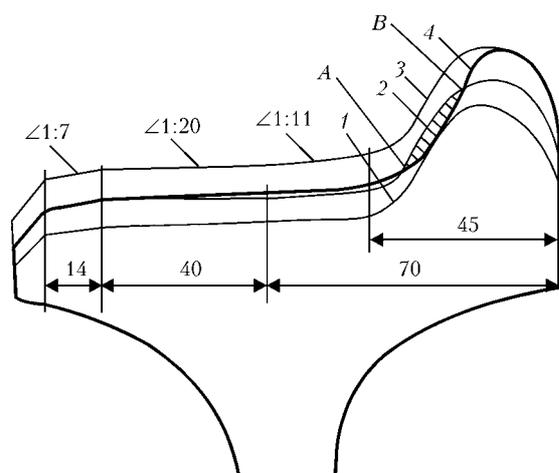


Рис. 1. Схема восстановления профиля колеса ДИИТ УЗ: 1, 2 – линия обточки соответственно без и после наплавки гребня (А – начало, В – окончание наплавки); 3 – линия обточки после восстановления колес наплавкой гребня и обода; 4 – линия изношенной поверхности колеса

ремонт на вагоноремонтные заводы после эксплуатации, имеют расхлываемость концов обода после разрезания +1 мм. С учетом отмеченного одним из главных требований при разработке технологии восстановления колес, на наш взгляд, является сохранение в них уровня сжимающих напряжений, который должен быть подтвержден эксплуатацией колес в течение длительного срока.

Во-вторых, поскольку колеса изготовлены из высокоуглеродистой стали, их поверхность катания в результате эксплуатации подвержена местной поверхностной закалке и глубокому наклепу под влиянием тепловых и механических воздействий. Часто они имеют по два-три «ползуна» глубиной 1...2 мм, около 25 % колес имеют «ползуны» с твердостью металла более *HRC* 50 на глубину 3 мм, выщербины металла глубиной 5 мм и более, дефекты на поверхности катания (выдавливание металла на периферию поверхности катания, расслоение металла, трещины, повреждения усталостного характера в зоне контакта колеса с рельсом). Перед наплавкой обода колеса (рис. 1, поз. 3) его необходимо обтачивать на глубину залегания дефектов [7]. В противном случае последние могут действовать как концентраторы напряжений в наплавленных слоях, что приводит к разрушению.

В-третьих, колесная сталь относится к категории трудносвариваемых. Для уменьшения вероятности образования горячих трещин в наплавленном металле наплавка колес обычно выполняется низкоуглеродистой проволокой, используются меры, обеспечивающие содержание углерода в нем не более 0,2 % (увеличение скорости наплавки, уменьшение сварочного тока, снижение проплавления основного металла и доли участия основного металла в наплавленном) [1]. Для устранения холодных трещин, которые могут возникать в металле ЗТВ наплавки в результате образования закалочных структур, воздействия сварочных напряжений и диффузионного водорода, применяется подогрев обода колеса перед наплавкой с замедленным остыванием после наплавки, прокаливание флюса с целью снижения в нем водорода, [1, 3]. При любом виде наплавки в металле ЗТВ происходят структурные изменения, что приводит к увеличению зерна и ухудшению прочностных свойств основного металла. Увеличение толщины износа, подлежащего восстановлению, а также нагрева и тепловложения на единицу длины (площади поверхности колеса) приведет не только к увеличению ширины ЗТВ, вероятности возникновения трещин как в наплавленном, так и в основном металле колеса, но и к снижению производительности восстановления колес (время наплавки износов обода до 4 мм составляет 3,5...4 ч) [1].

С целью продления ресурса колеса, уменьшения толщины наплавленного слоя, требуемого для восстановления, перед выполнением наплавочных работ рекомендуется отжигать поверхность катания [8]. Отжиг от температуры  $A_{c3}$  упрочненного металла поверхности катания колеса перед наплавкой способствует измельчению зерна металла и уменьшению вероятности образования холодных трещин в зоне, примыкающей к линии сплавления [7], что позволяет вести наплавку без обточки дефектов на поверхности катания. При этом температура подогрева металла перед наплавкой может быть значительно снижена. После отжига поверхности

катания твердость металла уменьшается более чем в 2 раза. Увеличить работоспособность колеса позволяет также шлифовка глубоких дефектов после уменьшения твердости поверхности катания вместо обточки по кругу катания.

Более экономичным при ремонте колес, уменьшающим их деформации во время нагрева и охлаждения, является использование высокочастотного нагрева, поскольку нагреваемый слой составляет небольшую часть от массы колеса [9]. Особенностью такого нагрева является генерирование тепловой энергии непосредственно в нагреваемом изделии, что обеспечивает высокую скорость нагрева до температур, при которых происходят структурные превращения в металле. Высокочастотный нагрев поверхности катания колеса осуществляли при помощи установки ТИ2-100/10М [7]. При частоте 10 кГц и мощности 100 кВт структурные превращения в металле происходят примерно на глубине 2 мм. Сопоставление микроструктур металла обода колеса с изношенной поверхностью, наличием на нем дефектов (ползун, трещина) и участков со следами термического воздействия при торможении на ободке и гребне до и после ТВЧ отжига поверхности катания позволило заключить, что микроструктура металла в зоне со структурой игольчатого мартенсита, а также участка со структурой зернистого бейнита после ТВЧ отжига претерпевают превращения с образованием мелкозернистого бейнита (на глубине до 2,4 мм от поверхности катания) и в целом становятся более однородными. Влияние ТВЧ отжига на структуру металла по глубине ограничено (микроструктура и микротвердость на глубине, превышающей 2,4 мм, практически не изменяются).

Растягивающие напряжения, возникающие после ТВЧ отжига, способствуют выявлению и отбраковке колес с дефектами [5]. Установлено, что расхлываемость колес после отжига на ТВЧ установке составляет +1, после отжига и наплавки гребней одним электродом — +2,5, после отжига, обточки дефектов, дополнительного нагрева на ТВЧ установке перед наплавкой гребней — +3,5 мм, что способствует вскрытию дефектов (микротрещин) на поверхности колес до размеров, выявляемых визуально, вплоть до появления трещин в ободке колеса.

С 1997 г. на вагоноремонтных заводах Украины благодаря применению отжига поверхности катания были выявлены трещины в ободьях у 0,2 % колес, поступивших в ремонт. Устранение их обточкой и последующая наплавка гребней способствовало безаварийной эксплуатации около 260 тыс. колес, выпущенных из ремонта с наплавленными гребнями [7]. Имеющийся опыт продолжительной эксплуатации восстановленных колес позволяет допускать, по нашему мнению, расхлываемость ободьев колес после их разрезания до +3,5 мм, что, вероятно, может быть принято в качестве критерия допустимой расхлываемости колес после их восстановления наплавкой.

С целью достижения максимальной производительности восстановления колес при высоком качестве наплавки после отжига поверхности катания колеса можно использовать многоэлектродную наплавку обода [10]. Благодаря поочередному импульсному характеру горения дуги с перемещением дуги поперек обода, рассредоточению теп-



ловложения уменьшается глубина проплавления, снижается доля основного металла в наплавленном материале и, как следствие, снижаются деформации в колесе после наплавки [11]. Путем легирования наплавленного слоя можно повысить предел текучести, ударную вязкость, коррозионную стойкость поверхностного слоя ободьев колес и стойкость к механическому изнашиванию при значительных ударных нагрузках, деформируемость изделий, уменьшить вероятность образования трещин. Однако при многоэлектродной наплавке ванна жидкого металла имеет значительный объем и медленно охлаждается во время кристаллизации. Это приводит к крупнотельчатому строению наплавленного металла, перегреву основного металла у зоны сплавления его с металлом шва, увеличению зерна на участках крупного зерна (УКЗ) металла ЗТВ наплавки. В результате катания наблюдается ухудшение механических свойств, особенно ударной вязкости. Увеличение тепловложения в колесо привело к повышению расхodomости колеса до +6,5 мм.

С помощью экспериментальной установки для наплавки ободьев УНО-2 (рис. 2) выполнена многоэлектродная наплавка на ободе колеса сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм под флюсом АН-60 одного и двух слоев в одну сварочную ванну (рис. 3). Наплавку гребней выполнили на установке УНГ-2М сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм под флюсом АН-348АМ путем последовательного наложения валиков и двумя электродами в одну сварочную ванну [7]. Для наплавки использовали проволоку, принятую в настоящее время для наплавки вагонных колес на предприятиях железнодорожного транспорта Украины.

Установлено, что наплавку обода шириной 100 мм вагонного колеса диаметром не менее 850 мм можно выполнить десятью электродами. Количество электродов обусловлено шириной обода (100 мм), которую необходимо наплавить, а также обеспечением многоэлектродного процесса наплавки (расстояние между электродами должно быть равно 3...4 диаметра электрода [10]). Для предотвращения растекания сварочной ванны и экономии сварочных материалов колесную пару во время наплавки наклоняли под углом не менее 5° таким образом, чтобы профиль колеса был параллелен горизонту [12]. Скорость наплавки и суммарный сварочный ток взаимосвязаны, например, при токе 500...600 А максимальная скорость наплавки сос-

тавляет 6...7, минимальная — 4 м/ч; при токе 1200 А максимальная скорость составляет 15 (время наплавки обода 10 мин), минимальная — 10 м/ч (время наплавки обода 16 мин). При большей скорости вращения колеса жидкий металл из сварочной ванны растекается по колесу, при меньших скоростях наблюдается прерывание многоэлектродного процесса наплавки.

Микроструктура металла наплавки представляет собой бейнит с микротвердостью  $HV_1$ -2850...3220 МПа, твердостью  $HRC$  23...27. Микроструктура металла УКЗ в металле ЗТВ наплавки представляет собой бейнит с микротвердостью  $HV_1$ -2540...3660 МПа, твердостью  $HRC$  20...31. При этом первое значение твердости измерено у поверхности многоэлектродной наплавки, последнее — у линии сплавления. Содержание углерода в наплавленном металле составляло 0,29%, трещин в наплавленном металле и металле ЗТВ наплавки не обнаружено.

С целью уменьшения величины зерна на УКЗ металла ЗТВ наплавки апробированы различные технологические варианты многоэлектродной наплавки. Было установлено, что изменение угла наклона электродов с 50 до 30° практически не приводит к изменению химического состава наплавленного металла (0,29...0,28 % С; 1,15...1,1 % Mn; 0,56...0,59 % Cr; 0,5...0,35 % Mo), балл зерна металла УКЗ ЗТВ наплавки № 3...4.

В результате смещения расположения электродов вперед по направлению сварки на 70 мм по отношению к зениту по сравнению с расположением назад на 70 мм уменьшилось проплавление основного металла, что привело к уменьшению содержания углерода с 0,28 до 0,22 % и уменьшению твердости с  $HRC$  24...27 до значений около  $HRC$  20.

Увеличение скорости однослойной наплавки ( $v_n = 12$  м/ч,  $I = 700...800$  А) привело к появлению в металле наплавки широких ферритных пластин наряду с бейнитом (рис. 4, а), снижению твердости его до значений менее  $HRC$  20 (микротвердость металла наплавки в центре обода  $HV_1$ -2970...3090 МПа), твердости металла УКЗ ЗТВ наплавки до  $HRC$  20...24 (микротвердость металла наплавки  $HV_1$ -3060...3220 МПа), снижению содержания углерода до 0,18 %. При этом балл зерна металла УКЗ ЗТВ наплавки повысился до № 4...6 (рис. 4, б). Расхodomость колеса после одного слоя



Рис. 2. Установка УНО-2 для наплавки ободьев колес



Рис. 3. Фрагмент обода колеса с наплавочной поверхностью

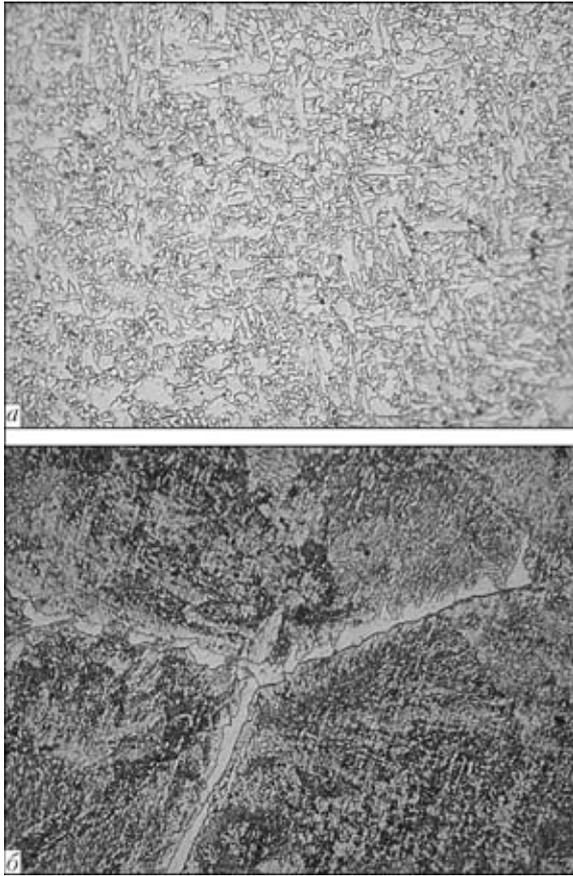


Рис. 4. Микроструктура основного металла (а) и металла УКЗ ЗТВ (б), полученная однослойной многоэлектродной (10 электродов) наплавкой обода колеса сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм под флюсом АН-60,  $\times 1000$

многоэлектродной наплавки обода колеса составляла +6,5 мм.

Наплавка обода в два слоя ( $v_{н1} = 10$  м/ч,  $I_1 = 500...600$  А,  $v_{н2} = 14$  м/ч,  $I_2 = 800...900$  А) (рис. 5) привела к увеличению размера ферритной составляющей в микроструктуре, снижению твердости наплавки до значений *HRC* 20 и менее (микротвердость в первом слое наплавки в центре обода *HV*1-3090 МПа, во втором — *HV*1-2740...2970 МПа, металла УКЗ ЗТВ наплавки *HV*1-2810...2970 МПа). Химический состав наплавленного металла, мас. %: 0,17 С, 1,2 Мн, 0,79 Сг, 0,54 Мо. В результате повторной перекристаллизации металла УКЗ ЗТВ наплавки вместе с зернами балла № 5...7 появились отдельные зерна балла № 8 (рис. 5, б). Расходимость колеса после многоэлектродной наплавки обода двумя слоями практически не изменилась (+6,4 мм).

Таким образом, снижением сварочного тока, манипуляциями с электродом, увеличением скорости наплавки, применение двухслойной наплавки при максимальной возможной скорости можно снизить проплавление основного металла и величину зерна в металле УКЗ ЗТВ наплавки, уменьшить переход углерода из основного металла в наплавленный слой.

По мнению специалистов Днепропетровского университета железнодорожного транспорта, основанного на исследованиях специалистов Института черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетров-

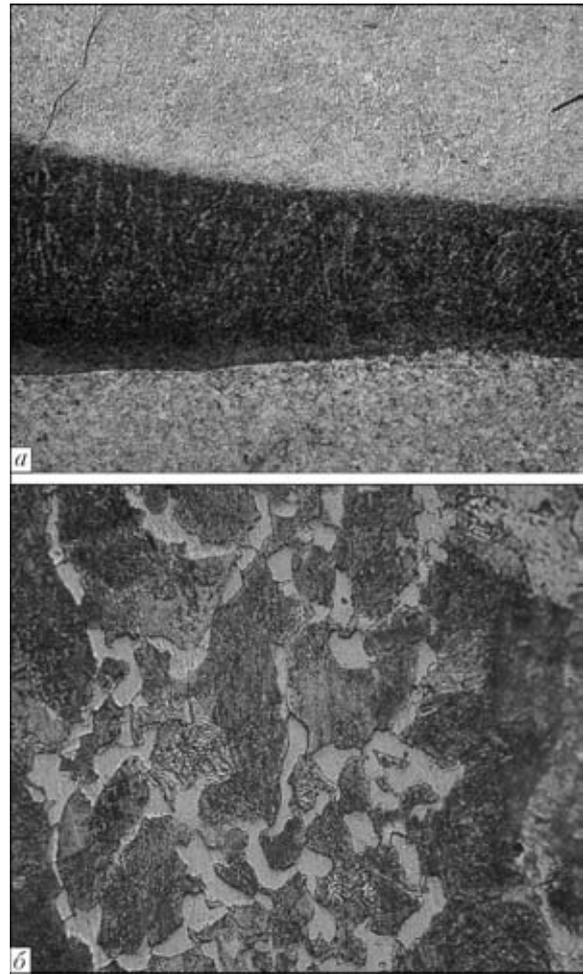


Рис. 5. Микроструктура основного металла (а) и металла УКЗ ЗТВ (б), полученная двухслойной многоэлектродной (10 электродов) наплавкой обода колеса сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм под флюсом АН-60: а —  $\times 40$ ; б —  $\times 1000$

ск), отмеченная расходимость колес не гарантирует от возможности возникновения трещин при их эксплуатации. Нами установлено, что уменьшения расходимости концов колеса после разрезания можно достичь путем нагрева поверхности катания после наплавки и обточки на установке ТИ2-100/10М со скоростью 150...160 °С/с до температуры выше  $A_{c1}$ , охлаждения до температуры ниже точки  $A_{r1}$  в течение 5...6 с, повторного нагрева в течение 5...6 с до температуры ниже  $A_{c1}$  и ускоренного охлаждения со скоростью не менее 50...60 °С/с (водяной спрейер установлен непосредственно в индуктор). После такой термообработки расходимость колеса после его разрезания уменьшается до +3,5 мм. Высокочастотный нагрев колеса после многоэлектродной наплавки ( $v_n = 6$  м/ч,  $I = 500...600$  А) и обточки по профилю не изменил микроструктуру, балла зерна в металле УКЗ ЗТВ, твердость, микротвердость металла наплавки.

В металле УКЗ ЗТВ наплавки содержатся преимущественно зерна балла № 8, остальные — № 5...7. Более существенное измельчение зерна достигается при увеличении скорости наплавки первого слоя ( $v_{н1} = v_{н2} = 14$  м/ч,  $I_1 = I_2 = 1100...1200$  А), рис. 6. Содержание углерода наплавленного металла понизилось до 0,1 % (1,15 % Мн, 0,79 % Сг,

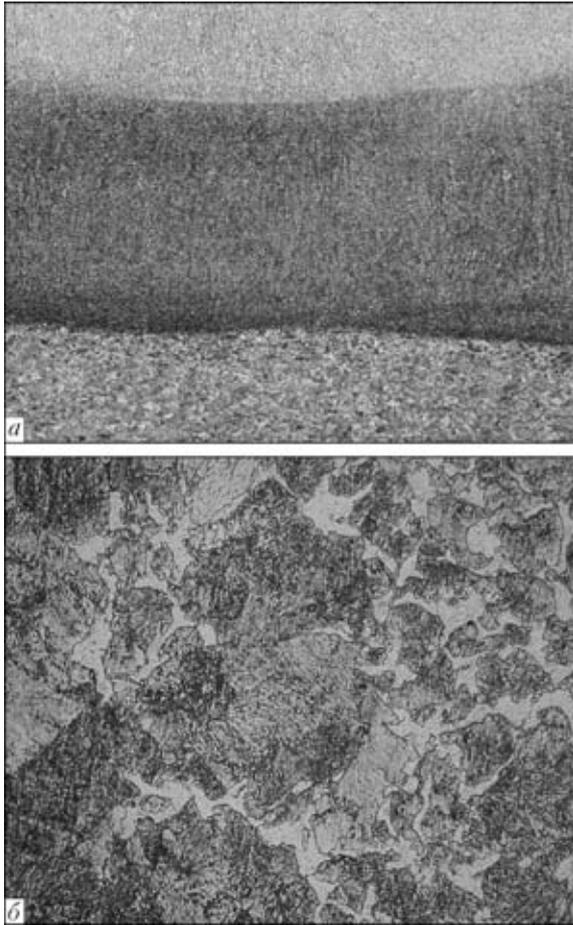


Рис. 6. Микроструктура основного металла (а) и металла УЗК ЗТВ (б), полученная двухслойной многоэлектродной (10 электродов) наплавкой обода колеса сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм под флюсом АН-60 после термообработки наплавленного и обточенного по профилю катания слоя: а –  $\times 40$ ; б –  $\times 1000$

0,54 % Мо), твердость металла наплавки не изменилась. Минимальное время наплавки одного слоя толщиной 9 мм на обод вагонного колеса с диаметром 850 мм составило не более 11,5 мин. Расходимость концов колеса после многоэлектродной наплавки обода составляло +6,5 мм.

Минимальная толщина обода вагонных колес в эксплуатации составляет 22, после заводского ремонта 28, после деповского – 27 мм. В настоящее время при ремонте колес при деповском ремонте допускается минимальная толщина обода после обточки 25 мм. Наибольшего эффекта можно достичь в результате восстановления тонких колес с толщиной обода 26...30 мм, которые после обточки имеют толщину обода менее допустимой и подлежат распрессовке. В настоящее время средний срок службы таких колес составляет 8 лет, продлив его на два-три года (до допустимой толщины обода в эксплуатации), можно рассчитывать на увеличение срока службы до 12 лет и без учета затрат получить доход не менее 1400 грн. (на 01.05.2005 г. цена нового цельнокатаного колеса для вагоноремонт-

ных заводов «Укрзалізниці» составляла около 3000 грн. без НДС).

В заключение можно отметить, что технология восстановления железнодорожных колес вследствие износа должна включать следующее:

отжиг поверхности катания колес на ТВЧ установке с частотой 10 кГц на глубину около 2,5 мм, обеспечивающий возможность увеличения расходящихся напряжений, выявления дефектов и отбраковки колес, снижения вероятности возникновения трещин после наплавки, уменьшения толщины наплавленного слоя, необходимого для восстановления;

шлифовку мест залегания глубоких трещин на глубину более 3 мм вместо обточки по кругу катания;

многоэлектродную наплавку на обод колеса одно- или двухслойную (десятью электродами) в одну сварочную ванну легированной проволокой, например, сварочной проволокой Св-08ХМ диаметром 3 мм под флюсом АН-60 ( $v_n = 12...14$  м/ч,  $I_{св} = 800...900$  А,  $U_d = 28...30$  В, угол наклона сварочных электродов к зениту  $35...45^\circ$ , смещение электродов на  $65...70$  мм от зенита вперед по ходу вращения колеса), обеспечивающую высокую производительность и качество наплавленного металла (балл зерна в УЗК металла ЗТВ не менее № 6...8), значения твердости поверхности катания не ниже твердости основного металла колеса;

наплавку изношенных гребней [7];

термообработку наплавленных и обточенных колес на ТВЧ установке, обеспечивающую уровень расходимости не более +3,5 мм.

1. Сварка под флюсом при ремонте локомотивов / А. Е. Аснис, Л. М. Гутман, В. П. Степенко, В. А. Чумаченко. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – С. 65–79.
2. ESAB delivers engineered automatic welding station to Ghana for build-up welding of worn railway wheels // Svetsaren. – 2001. – № 1. – Р. 20–21.
3. Наплавка гребней вагонных колесных пар / Н. В. Павлов, И. Д. Козубенко, И. Е. Бызова, А. И. Рассоха // Ж.-д. транспорт. – 1993. – № 7. – С. 37–40.
4. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колесных пар: ЦВ/3429: Утв. М-вом путей сообщ. – М.: Транспорт, 1977. – С. 54–57.
5. Цюренко В. Н. Эксплуатационная надежность колесных пар грузовых вагонов // Ж.-д. транспорт. – 2002. – № 3. – С. 24–28.
6. Узлов И. Г. Колесная сталь. – Киев: Техника, 1985. – 110 с.
7. Матвеев В. В. Наплавка гребней вагонных колес после отжига поверхности катания на вагоноремонтных заводах Украины // Автомат. сварка. – 2005. – № 6. – С. 42–48.
8. Пат. 44373, Украина. Спосіб відновлення поверхні кочення коліс рейкового транспорту / В. В. Матвеев. – Опубл. 15.02.2002, Бюл. № 2.
9. Вологдин В. П. Поверхностная индукционная закалка. – М.: Оборонгиз, 1974. – 291 с.
10. Меликов В. В. Многоэлектродная наплавка. – М.: Машиностроение, 1988. – 140 с.
11. Емельянов Н. П. Многоэлектродная электродуговая и электрошлаковая наплавка под флюсом // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта. – 1962. – Вып. 239. – С. 18–20.
12. Пат. № 61794, Украина. Спосіб відновлення профіля поверхні обода колеса рейкового транспорту / В. В. Матвеев, В. І. Ольшевський. – Опубл. 15.07.2003, Бюл. № 7.

The paper deals with a set of technological problems, which are to be solved during restoration of railway wheels by surfacing. A technology of highly efficient multielectrode surfacing of wheels after annealing of the rolling surface is proposed.

Поступила в редакцию 15.09.2005



УДК 621.791.753

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШВОВ ПРИ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

**Р. Н. РЫЖОВ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),  
**С. Ю. МАКСИМОВ**, канд. техн. наук, **Е. А. ПРИЛИПКО**, инж., **В. А. КОЖУХАРЬ**, магистр  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе анализа микроструктур всех зон сварного соединения и химического состава швов определены оптимальные параметры управляющего магнитного поля, обеспечивающие максимальное улучшение механических свойств соединений при мокрой подводной сварке.

*Ключевые слова:* мокрая подводная сварка, внешнее электромагнитное воздействие, химический состав, микроструктура швов

В работе [1] установлено, что применение внешних электромагнитных воздействий (ЭМВ) в условиях мокрой подводной сварки позволяет повышать прочность и пластичность сварных швов соответственно на 10 и более чем на 60 %, что свидетельствует об улучшении качества сварных соединений. Улучшение механических свойств обусловлено изменениями процессов кристаллизации, что подтверждают микроструктуры образцов, изготовленных из центральных областей швов. На практике хрупкие разрушения чаще всего происходят в металле ЗТВ, где структурные изменения существенны. Снижение на 15 % микротвердости в данной области, достигнутое благодаря ЭМВ, может быть связано с изменениями вторичных микроструктур (последнее предположение требует дополнительных исследований). К тому же актуальным является выяснение возможности изменения химического состава металла швов в условиях мокрой подводной сварки порошковой проволокой с помощью ЭМВ, что также может способствовать улучшению механических свойств соединений. Исходя из сказанного выше, целью данной работы является оценка влияния параметров режима ЭМВ на химический состав и структуру швов и металла ЗТВ.

Образцы для исследований получали в условиях, аналогичных рассматриваемым в работе [1]. Многопроходную сварку образцов из стали 15ХСНД толщиной 14 мм с V-образной разделкой кромок осуществляли на глубине до 1 м порошковой проволокой ППС-АН2 на следующем режиме:  $I_{св} = 180$  А (прямой и обратной полярности),  $U_{д} = 32$  В,  $v_{св} = 7$  м/ч. Реверсивное аксиальное управляющее магнитное поле (УМП) в зоне сварки генерировали с помощью цилиндрического электромагнита, размещенного коаксиально мундштуку. Индукцию УМП  $B$  регулировали с помощью блока управления Ф91 [2]. Микроструктурный и спектральный анализ образцов проводили в плоскостях, параллельных поверхности свариваемых пластин.

Установлено, что микроструктура металла швов, полученных при сварке по штатной технологии, представляет собой литую структуру, состоящую преимущественно из верхнего бейнита (рис. 1, а). При сварке с ЭМВ по границам литых кристаллитов образуются ферритные прослойки (рис. 1, б). Применение ЭМВ оказывает существенное воздействие на процесс кристаллизации. Интенсивное перемещение потоков расплава во всем объеме ванны приводит к измельчению дендритной структуры, причем более высокая дисперсность наблюдается при сварке с ЭМВ на токе обратной полярности (рис. 1, б). Это связано с различным энерговыделением в швы и соответствующими изменениями скоростей кристаллизации. Качественно аналогичные результаты ранее были

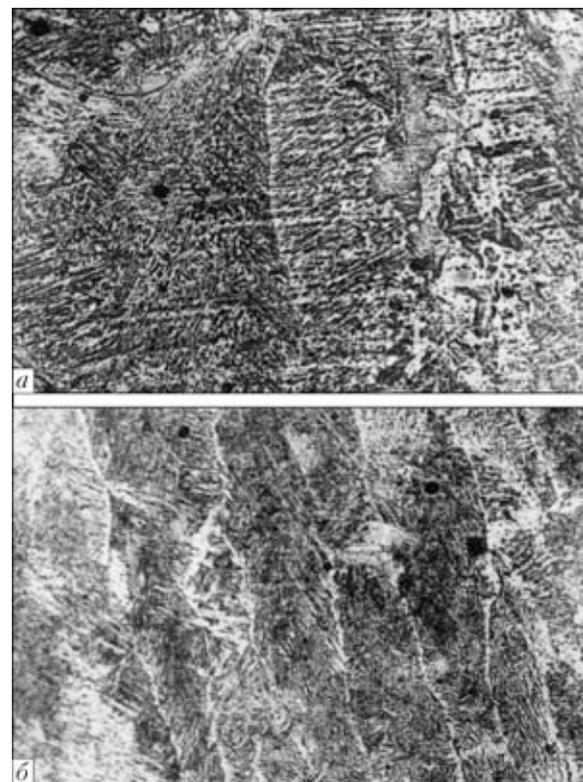


Рис. 1. Микроструктура сварных соединений ( $\times 200$ ), выполненных без (а) и с ЭМВ (б) на токе обратной полярности при  $B = 15$  мТл

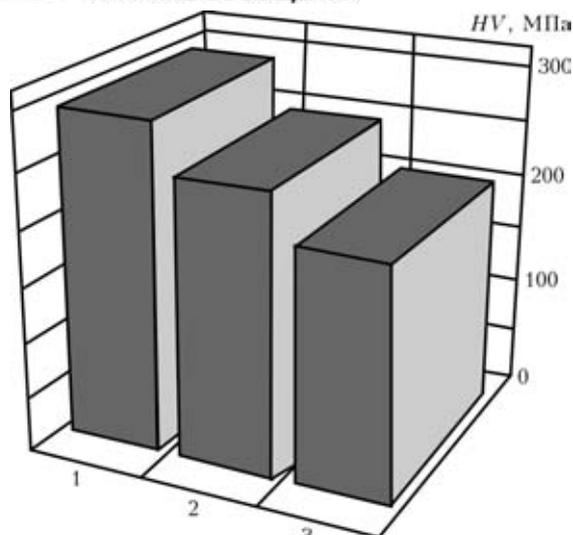


Рис. 2. Влияние величины индукции на микротвердость металла в ЗТВ: 1 —  $B = 0$ ; 2, 3 — 15 мТл соответственно при токе прямой (2) и обратной (3) полярности

получены при сварке с ЭМВ на воздухе конструкционных сталей. В работе [3] измельчение структуры швов в соединениях из данного класса материалов объясняли разветвлением выступающих частей твердой фазы в период импульсного роста с увеличенными мгновенными скоростями. Данный механизм можно применить и для объяснения микроструктурных изменений в швах в условиях мокрой подводной сварки с ЭМВ.

Структура металла ЗТВ представляет собой ферритно-перлитную смесь и также изменяется при использовании ЭМВ в зависимости от значения индукции УМП и полярности  $I_{св}$ . Так, образцы, полученные при сварке на токе прямой полярности  $I_{св}$ , характеризуются ориентацией зерен в направлении теплоотвода, перпендикулярном боковой поверхности сварочной ванны. В структуре просматриваются колонии мартенситных игл, что приводит к повышению микротвердости металла ЗТВ [1].

Применение ЭМВ при сварке на токе обратной полярности  $I_{св}$  позволяет гомогенизировать структуру металла ЗТВ, повысить ее дисперсность. Мартенсит в металле ЗТВ при индукции УМП  $B = 15$  мТл не обнаружен. Это свидетельствует о том, что данный режим ЭМВ характеризуется максимальной интенсивностью гидродинамических процессов в ванне, сопровождающихся периодическими подплавлениями фронта кристаллизации, и уменьшением скорости охлаждения в металле ЗТВ, что подтверждается значениями микротвердости при токе различной полярности (рис. 2).

Таким образом, в условиях мокрой подводной сварки для получения гомогенной структуры, обеспечивающей максимальное улучшение пластичных и прочностных свойств, как в шве, так и в металле ЗТВ, более благоприятной является сварка с применением ЭМВ на токе обратной полярности.

Analysis of microstructure of all the welded joint zones and weld composition was the basis to determine the optimum parameters of the controlling magnetic field, providing maximum improvement of mechanical properties of the joints in wet underwater welding.

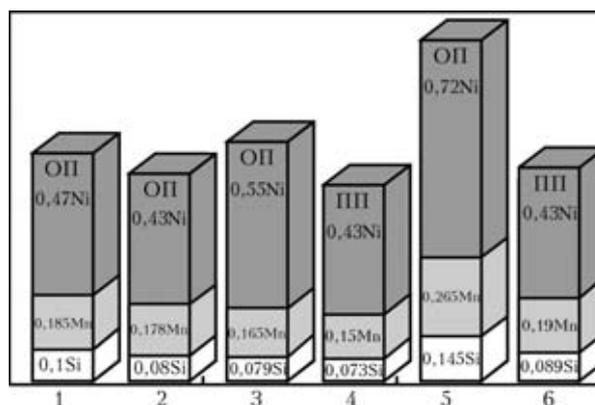


Рис. 3. Изменение процентного содержания в швах легирующих элементов при токе прямой (ПП) и обратной (ОП) полярности: 1, 2 —  $B = 0$ ; 3, 4 — 10; 5, 6 — 15 мТл

Спектральный анализ исследуемых образцов показал незначительные отличия химических составов швов, сваренных по штатной технологии ( $B = 0$ ) и с применением ЭМВ ( $B = 10, 15$  мТл), когда индукция УМП не превышала 10 мТл (рис. 3). Однако при токе обратной полярности повышение индукции до 15 мТл сопровождалось увеличением более чем на 50 % содержания в швах легирующих элементов, переходящих из шихты порошковой проволоки. Известно [4], что при сварке с ЭМВ капли на торце электрода принимают форму эллипсоида вращения. При этом с повышением индукции УМП экспоненциально увеличивается теплопередача дуги к электроду и соответственно повышается интенсивность ее расплавления. Указанный эффект способствует увеличению коэффициента перехода элементов из проволоки, что объясняет изменения химического состава швов. Это особенно важно в условиях мокрой сварки, поскольку высокоокислительная атмосфера парогазового пузыря значительно ограничивает возможность легирования металла шва элементами с высоким сродством к кислороду.

Таким образом, применение ЭМВ в условиях мокрой подводной сварки позволяет положительно влиять на химический состав швов, гомогенизировать микроструктуру металла шва и ЗТВ, что является действенным фактором для улучшения пластичных и прочностных свойств сварных соединений.

1. Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств швов при мокрой подводной сварке / Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь, С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 53.
2. Короб Н. Г., Скачков И. О., Матяш В. И. Система управления электромагнитными воздействиями при сварке // Там же. — 1993. — № 11. — С. 52.
3. Якушин Б. Ф., Мисюрюв А. И. Повышение технологической прочности швов при сварке среднелегированной стали с электромагнитным воздействием // Свароч. пр-во. — 1979. — № 12. — С. 7–9.
4. Болдырев А. М., Биршев В. А., Черных А. В. Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем продольном магнитном поле // Там же. — 1991. — № 5. — С. 28–30.

Поступила в редакцию 20.01.2005



## НОВОСТИ

### Установка для плазменной резки

Научно-производственное предприятие «Плазмоторон» в ряду производимых им установок нового поколения разработало и приступило к производству установки серии «Днепр», предназначенной для аппаратурного оснащения отечественных машин для плазменной резки.

Предлагаемая установка «Днепр» состоит из источника питания, обеспечивающего стабилизацию тока, его плавное регулирование и малое энергопотребление, плазменного резака, обеспечивающего высокие (до 5 м/мин) скоростные и качественные показатели фигурной резки, и дистанционного пульта управления, легко встраиваемого в пульт управления машиной. Наличие легкого малогабаритного плазменного резака с воздушным охлаждением упрощает монтаж его кабель-шлангового пакета на портале машины и обеспечивает быструю смену катодно-соплового узла.

Высокие показатели качества реза (малые ширина реза, угол скоса кромок, чистота их поверхности, малые ЗТВ и литой участок кромок) обеспечивают широкие технологические возможности прецизионной резки деталей различного назначения, в том числе под углом к линии реза с получением режущих кромок, разделки кромок под сварку и пр.



Плазменный резак с воздушным охлаждением установки «Днепр»

#### Техническая характеристика установки «Днепр»

Напряжение питающей сети, В (50, 60 Гц) ....	380±10%
Ток резки, А .....	20... 120
Потребляемая мощность, кВт .....	5... 20
Максимальная толщина разрезаемой стали, мм .....	40
Диапазон толщин качественной фигурной резки стали, мм .....	1... 20
Ширина реза, мм .....	1,0... 3,5
ПВ, % .....	100

Стоимость установки «Днепр» и сменных деталей плазмоторонов в 2...3 раза ниже зарубежных аналогов, а ряд показателей технического уровня (скорость резки, максимальная толщина разрезаемого металла, ПВ, ресурс работы катодно-сопловым узлом) — выше.



Известный производитель электросварочного оборудования в Украине — Каховский завод электросварочного оборудования освоил производство новых образцов техники.

### Многопостовые выпрямители

Выпрямители многопостовые сварочные КИМ-1201 (на 8 постов) и КИМ-601 (на 3 поста) предназначены для комплектации сварочных постов ручной дуговой сварки покрытыми электродами изделий из углеродистых и легированных сталей на постоянном токе. Регулирование сварочного тока производится для каждого поста независимо с помощью балластного реостата.

#### Технические характеристики

Параметр	КИМ-1201	КИМ-601
Активная максимальная эквивалентная потребляемая мощность, кВт, не более	84	18
Номинальный сварочный ток, А, при ПВ 100 %	1250	630

Количество постов	8	3
Номинальный сварочный ток одного поста, А, при ПВ = 60 %	315	315
Номинальное рабочее напряжение, В	56	50
Напряжение холостого хода, В, не более	85	85
КПД, %, не менее	83	83
Охлаждение	воздушное, принудительное	
Габаритные размеры, мм, не более (длина×ширина×высота)	980×680×650	980×560×650
Масса, кг, не более	450	260

Отличаются: простотой в обслуживании и ремонте, максимальной приспособленностью для работы в тяжелых условиях эксплуатации; обеспечивают стабильное горение дуги, малое разбрызгивание; сварочная цепь защищена от токов перегрузки и короткого замыкания.

**Универсальные передвижные сварочные выпрямители**

Универсальные передвижные сварочные выпрямители КИУ-301 и КИУ-501 предназначены для автоматической и полуавтоматической сварки в среде защитных газов и под флюсом, а также для ручной дуговой сварки штучными электродами всех типов. Обеспечивают стабильное горение дуги, малое разбрызгивание.

**Технические характеристики**

Параметр	КИУ-301	КИУ-501		
Номинальное напряжение сети, В	380	380		
Частота тока питающей сети, Гц	50	50		
Номинальный сварочный ток при ПВ 60 %, А	315	500		
Пределы плавного регулирования сварочного тока, А	падающие 50...315	жесткие 60...315	падающие 50...5000	жесткие 60...500
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	падающие 22...32	жесткие 18...38	падающие 22...46	жесткие 18...50
Активная максимальная эквивалентная потребляемая мощность (с учетом ПВ), кВт	8,7	18		
Напряжение холостого хода, В	72	85		
Диаметр электродов, мм	2...6	2...6		
Масса, кг	205	275		
Габаритные размеры, мм	750×530×915	805×600×1050		

**Полуавтомат КП-010**

Этот полуавтомат относится к новому поколению полуавтоматов с широким диапазоном регулирования сварочных параметров и предназначен для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов сплошной и порошковой проволокой низколегированных и легированных сталей, а также коррозионностойких (нержавеющих) сталей в среде аргона в различных пространственных положениях.

В конструкции полуавтомата предусмотрено подключение горелки с евроразъемом и комплектация колесами для перемещения.

Полуавтомат оснащен микропроцессорным блоком управления, который конструктивно расположен в механизме подачи проволоки. Содержит четырехроликовое полноприводное подающее устройство фирмы «Fortrans» и кассетное устройство WR4 фирмы «СООРТИМ» (Венгрия), клапан для подачи защитного газа фирмы «САМОZZI» (Италия), тормозное устройство Standart 2 фирмы «СООРТИМ».

Полуавтомат может комплектоваться любыми источниками питания, выпускаемыми ОАО «КЗЭСО». Активная максимальная эквивалентная потребляемая мощность из сети (с учетом ПВ) зависит от источника.

**Технические характеристики**

Параметр	Значение параметра
Номинальное напряжение сети, В	380
Частота тока питающей сети, Гц	50
Номинальный сварочный ток при ПВ = 60 % и цикле сварки 10 мин, А	315
Пределы регулирования сварочного тока, А	50...315
Пределы плавного регулирования напряжения на дуге, В	18...38
Диаметр электродной проволоки, мм	
сплошной	0,8...1,6
порошковой	1,2...1,6
Пределы плавного регулирования скорости подачи электродной проволоки, м/ч	120...1200
Источник питания (рекомендуемый)	КИУ-301
Масса, кг	
устройства подающего	27
электродной проволоки	15
источника питания	205
Габаритные размеры, мм	
устройства подающего	620*×380×460
источника питания	750×530×915

\*Длина указана без учета устройства для удержания кабелей.



## ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**Приазовский государственный технический университет**

*В. В. Арсенюк (ИЭС) защитил 27 сентября 2005 г. докторскую диссертацию на тему «Закономерности формирования соединений разнородных металлов различными способами сварки давлением»*

Диссертационная работа посвящена анализу и уточнению представлений о кинетике и микромеханизмах пластической деформации, об особенностях структурообразования и технологий получения качественного соединения из разнородных металлических материалов при разных скоростях деформирования, и разработка на основе этих представлений рекомендаций по применению того или иного способа сварки давлением и оптимизации технологического процесса.

В литературном обзоре сделан анализ состояния вопроса сварки давлением разнородных металлов. Для исследований использовались современные методы физического металловедения. Рассмотрены особенности влияния состояния контактирующих поверхностей на формирование соединения из разнородных металлов при сварке давлением. Изучены особенности и кинетические закономерности формирования структурной и химической неоднородности, фазообразования и пластической деформации в зоне соединения разнородных металлов (Al-Fe; Al-Cu; Cu-Ti; Ti-Fe и др.) при ДСВ, СГП, СТр, УСВ, МИС

и СВз в условиях деформирования со скоростью  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Изучены закономерности процессов ускоренного массопереноса в металлах при скоростном нагружении.

Впервые установлено, что скорость деформирования является главным фактором, определяющим особенности структуры и изменение механизмов деформации.

Установлено, что при низких скоростях деформирования (ДСВ, СТр) наблюдается формирование сплошных слоев интерметаллидов, локализованных по плоскости контакта. При высокоскоростной деформации (УСВ, МИС, СВз) наблюдаются дисперсные фазовые выделения (от ультрадисперсных до нескольких микрометров). Показано, что глубина зоны локализации пластической деформации зависит от скорости и составляет 25...200 мкм. При этом степень локализации пластической деформации изменяется приблизительно от 40 до 1000 %.

Разработан новый методический подход к аналитической оценке прочностных и пластических свойств по зоне сварки с учетом структурных факторов. Предложен новый металловедческий подход к оценке свариваемости разнородных металлов.

Разработаны технологические рекомендации и определены оптимальные режимы и технологические приемы соединения различных пар разнородных металлов разными методами сварки давлением, которые использованы при промышленном изготовлении деталей и устройств в агрегатах и системах. Выполнена оценка применимости различных способов сварки давлением для соединения разнородных трудносвариваемых металлов, которая позволяет выбрать оптимальный способ и технологические параметры сварки.

УДК 621.79(088.8)

## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Способ регулирования источника сварочного тока с резонансным контуром**, выполненный в виде последовательно-параллельного преобразователя, которым с помощью управляющего устройства управляют мостовой схемой, образованная отдельными переключающими элементами и через мостовую схему обеспечивает потребителя, в частности сварочный процесс. Приведены отличительные признаки способа. Патент Украины 72024. А. Хуберт (Фрониус Интернациональ ГмбХ, Австрия) [1].

**Способ изготовления детали из алюминия или алюминиевого сплава с покрытием (варианты)**, которое содержит гексафторсиликат щелочного металла или состоит из него, при этом используют чистый гексафторсиликат щелочного металла или смесь гексафторсилката щелочного металла с фторалюминатом щелочного металла в количестве максимум 5 мас. % с учетом на использованный гексафторсиликат щелочного металла, и на деталь методом сухого или мокрого нанесения флюса наносят гексафторсиликат щелочного металла или смесь. Патент Украины 71969. У. Сесеке-Коуро, Й. Фрехсе, А. Бекер (Солвей Флюор унд Деривейт ГмбХ, Германия) [1].

**Способ автоматической электродуговой сварки обсадных труб**, отличающийся тем, что в качестве электродной проволоки используют высокомарганцевый порошок, шов формируют с аустенитной структурой, содержащий, мас. %: углерода 0,6...0,8; марганца 10...12 и относительной толщиной 0,45...0,8. Патент Украины 4992. Р. В. Палаш (Национальный ун-т «Львовская политехника») [2].

**Устройство для наплавки деталей**, отличающееся тем, что оснащено механизмом фиксации наплавляемого вала относительно дополнительных валов, привод соединен с дополнительными валами независимо от наплавляемого вала, соединение которого с цепной передачей выполнено с возможностью отключения, причем соседние звенья цепной передачи связаны между собой с помощью рабочих поверхностей, содержащих участки с разными центрами кривизны, а конфронтующие участки соседних звеньев, вступающие в контакт в процессе работы, имеют отличающиеся радиусы кривизны. Патент Украины 4839. С. В. Фетисов, В. В. Яблоков, М. В. Грибачев [2].

**Способ сварки под флюсом и устройство для его осуществления**, отличающийся тем, что соединения кожуха с поверхностью сварного соединения образуют полость, в которой начинают и ведут процесс горения дуги, плавления основного и присадочного материалов, а защитное газообразное вещество аккумулируют в полости, причем вещество представляет собой смесь продуктов испарения расплавленного металла и шлака, диссоциации составляющих флюса, химических реакций между металлом и шлаком, между составляющими флюса, а также шлака. Патент Украины 72542. А. К. Царюк, Ю. Н. Вахнин, В. С. Сидорук, С. И. Моравецкий (ИЭС им. Е. О. Патона) [3].

**Способ контактной точечной сварки с автоматическим регулированием**, отличающийся тем, что если измеренное в процессе сварки негативное отклонение сварочного тока от эталонного по абсолютному значению не превышает заранее установленное граничное значение, то стабилизируют затраченную на нагрев металла энергию с помощью стабилизации напряжения на электродах и увеличения времени протекания тока. Патент Украины 72571. В. К. Лебедев, А. А. Письменный (То же) [3].

\*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях Украины «Промислова власність» за 2005 г. (в скобках указан номер бюллетеня).



**Способ электрошлаковой сварки деталей больших сечений и габаритов и устройство для его осуществления**, отличающийся тем, что в теле частей свариваемой детали до сварки зачеканивают систему термопар и процесс ЭШС ведут с постоянным мониторингом температурного поля свариваемых частей и токоподводящих оплавленных электродов и поддерживают постоянство отмеченного температурного поля на уровне ниже температуры начала роста зерна. Приведены и другие отличительные признаки. Патент Украины 72664. Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. (ИЦ электрошлаковых технологий ИЭС им. Е. О. Патона) [3].

**Стержень электрода для электродуговой сварки**, отличающийся тем, что на торцевых поверхностях выполнены соответствующие элементы механического замка, что обеспечивает последовательное соединение стержней между собой. Патент Украины 52515. В. П. Колотий [4].

**Установка для контактной стыковой сварки трубчатой обложки с заглушкой**, отличающаяся тем, что цапги основного и присадочного зажима соединены между собой с помощью тяг, в канале корпусонаправляющего цапги основного зажима расположен упругий элемент, контактирующий с торцом цапги

основного зажима с боку лепестков, а зажимный элемент, охватывающий ползун электрододержателя, размещен на торцевой поверхности упорного элемента. Патент Украины 6154. Н. А. Лаврентьев, Н. Н. Белаш (НИЦ «Харьковский физико-технический институт») [4].

**Термитный стержень**, отличающийся тем, что крепежный элемент выполнен в виде внешнего элемента из горючего материала, который охватывает таблетки по периметру, при чем вертикальное сечение крепежного элемента повторяет форму вертикального сечения таблеток, а длина крепежного элемента превышает длину стержня, который образован таблетками, при этом таблетки распределены в крепежном элементе таким образом, что в одном из окончаний крепежного элемента образуют полость, а таблетка, которая изготовлена из негорючего материала, установлена последней со стороны полости. Патент Украины 6320. С. Г. Позднякова [5].

**Экзотермический паяльно-сварочный или режущий стержень**, отличающийся тем, что он дополнительно содержит как минимум одну вертикальную перегородку, выполненную из термостойкого материала, размещенную в экзотермической смеси. Патент Украины 6321. С. Г. Позднякова [5].



По  
зарубежным  
журналам\*

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

**Boekholt R.** Использование лазерной технологии в судостроении, с. 22–24.

**Smith F., Wylde G.** Сварное соединение COMELD — инновация в соединении композитного материала с металлическим, с. 26–27.

**Padmanabham G., Pandey S., Schaper M.** Влияние частоты импульса при импульсной сварке МИГ на геометрию сварного валика и структуру подложки Al-Cu-Li, с. 33–43.

**Arulmani A., Singh H., Pandey S.** Влияние твердой наплавки на рабочие характеристики плужных лемехов, с. 44–47.

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

**Торированные вольфрамовые электроды**, с. 11–13.

**Zhu P., Simpson S.** Экспериментальный анализ свободного полета капли при сварке МИГ с мелкокапельным переносом, с. 33–38.

**Sterjovski Z., Dunne D.** Исследование ЗТВ с помощью испытаний по Шарпи с V-образным надрезом для аттестации сварных швов, с. 39–47.

*BULETINUL INSTITUTULUI in SUDURA si INCERCARI de MATERIALE (BID ISIM) (Румыния). — 2004. — № 2 (рум. яз.)*

**Pekkari B.** Сварка или соединение в будущем, с. 2–7.

**Pascu R. et al.** Коррозионные свойства свариваемых титановых сплавов Ti-1Pd и Ti-6Al-4V, с. 8–14.

**Cocard M.** Дефекты сварных соединений полиэтиленовых труб, с. 15–20.

\* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона.



**Научно-исследовательские** и технологические инженерные проекты, разработанные в ИСИМ, г. Тимишоара в рамках государственных исследований, с. 25–28.

*BULETINUL INSTITUTULUI in SUDURA si INCERCARI de MATERIALE (BID ISIM) (Румыния). — 2004. — № 3 (рум. яз.)*

**Pekkari B.** Сварка или соединение в будущем, с. 2–10.  
**Zuev I. V.** Новая техника сварки — «дуговая сварка листовым электродом», с. 11–13.

**Dragut L. et al.** Высокопроизводительные сварочные процессы в судостроении — области применения процесса T.I.M.E., с. 14–20.

*BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH (Польша). — 2004. — 48, № 6 (пол. яз.)*

**Brozda J.** Жаропрочные стали нового поколения, их свариваемость и свойства сварных соединений. Ч. 5. Сталь HCM12A, с. 30–37.

**Klimpel A., Lisieckia A. et al.** Лазерная сварка стыковых соединений тонколистовой оцинкованной стали, с. 42–46.

**Banasik M., Brzeczek J. et al.** Лазерная сварка панельных теплообменников, с. 37–41.

**Luksa K., Weglowski M.** Световое излучение сварочной дуги при сварке GMA, с. 47–50.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония). — 2003. — Vol. 41, № 10 (яп. яз.)*

**Okura I.** Применение алюминиевых сплавов в мостостроении, с. 1–6.

**Wada J.** Применение предварительно оребренных плит алюминиевых сплавов в архитектурных конструкциях, с. 32–36.

**Nakagomi T., Ichikawa Y.** Расширение применения алюминиевых сплавов в современном строительстве, с. 7–11.

**Hashimoto T. et al.** Разработка криволинейных настилов крыши из алюминиевых листов, с. 37–42.

**Sakurai K.** Алюминиевые мосты в Европе и США, с. 12–19.

**Tsuchiya K.** Разработка понтонных мостов простой формы из алюминиевых сплавов, с. 43–47.

**Araya M.** Современное состояние применения пространственных алюминиевых конструкций, с. 20–31.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония). — 2003. — Vol. 41, № 11 (яп. яз.)*

**Обзор зарубежных публикаций 2002 г. по сварке металлов:**

1. Прочность сварных швов, с. 1–7.
2. Сварочное оборудование, с. 7–11.
3. Металлургия сварки и сварочные материалы, с. 12–15.
4. Способы сварки.
  - 4.1. Дуговая сварка, с. 15–18.
  - 4.2. Сварка сопротивлением, с. 18–24.

- 4.3. Лазерная сварка, с. 24–32.
  - 4.4. Сварка трением с перемешиванием, с. 32–42.
  - 4.5. Другие способы соединения, с. 42–42.
  5. Применение сварки, с. 42–46.
  6. Сварные соединения, с. 47–49.
- Основа проектов кораблей из алюминиевых сплавов, с. 50–51.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония). — 2003. — Vol. 41, № 12 (яп. яз.)*

**Hashimoto T.** Технологии низкотемпературной пайки алюминиевых сплавов, с. 1–3.

**Ueyama T. et al.** Применение гибридной (лазерная + импульсная МИГ на переменном токе) сварки для получения соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, с. 9–17.

**Fujii N. et al.** Экспозиционные диаграммы магния и титана в рентгенографии, с. 4–8.

**Применение** сварки трением с перемешиванием для снижения производственных затрат, с. 22–24.

**Регулятор** подачи защитного газа для сварки, с. 32–33.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония). — 2004. — Vol. 42, № 1 (яп. яз.)*

**Okita T.** Контактная сварка разнородных металлов, с. 2–15.

**Ikami H.** Ультразвуковая пайка алюминиевых сплавов с разнородными металлами, с. 31–37.

**Katayama S.** Лазерная сварка алюминиевых сплавов с разнородными материалами, с. 16–25.

**Cederqvist L., Reynolds A. P.** Характеристики нахлесточных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 38.

**Satou D.** Плакирование алюминия методом взрыва, с. 26–30.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония). — 2004. — Vol. 42, № 2 (яп. яз.)*

**Okamura H., Aota K. I.** Сварка трением с перемешиванием разнородных металлов, с. 1–10.

**Aizawa T.** Получение тонколистовых Al/Fe соединений шовной сваркой давлением с использованием магнитного потока высокой плотности, с. 31–37.

**Katoh K., Tokisue H.** Сварка трением алюминиевых сплавов с разнородными материалами и разнородных материалов, с. 11–18.

**Kallee S. W. et al.** Применение сварки трением с перемешиванием для изготовления алюминиевых паромов, с. 38–39.

**Ohashi O.** Диффузионная сварка алюминиевых сплавов с разнородными материалами, с. 19–23.

**Dalle Donne C. et al.** Влияние сварочных дефектов и остаточных напряжений на распространение усталостных трещин в соединениях, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 40–41.

**Nishio K., Katoh M., Yamaguchi T.** Соединение прокаткой в вакууме титана с алюминием, с. 24–30.

*JOURNAL of LIGHT METAL WELDING & CONSTRUCTION (Япония). — 2004. — Vol. 42, № 3 (яп. яз.)*

**Производство** алюминия в 2003 г., с. 1–13.

**Изучение** основных характеристик свариваемости магниевых сплавов.

**Aochi M., Fujii N., Yasuda K.** Ч. 1. Сварка магниевых сплавов. Изучение способов практического осуществления сварки магниевых сплавов, с. 14–20.

**Aochi M., Fujii N., Yasuda K.** Ч. 2. Сварка магниевых сплавов, с. 21–27.



**Katoh K.** Структура и механические свойства соединений магниевого сплава AZ31, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 28–39.

**Smith C. B.** Сварка трением перемешиванием промышленными роботами, с. 40–41.

*JOURNAL of THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония). — 2004. — Vol. 73, № 6 (яп. яз.)*

**Особенности** сварочных материалов с низкой температурой превращения, с. 5.

**Kobayashi H.** Мировые тенденции разработки правил и норм на соответствие назначению, с. 7–11.

**Tagawa T., Miyata T.** Обзор норм и стандартов на соответствие назначению, с. 12–17.

**Tahara T.** Оценка на соответствие назначению по API RP 579 нефтехимического оборудования, с. 18–20.

*JOURNAL of THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония). — 2004. — Vol. 73, № 7 (яп. яз.)*

**Техническая** спецификация. Применение сварочных материалов с низкой температурой превращения для подавления образования низкотемпературных трещин, с. 5–6.

**Специальный** выпуск. Современное состояние разработок в области материалов, используемых для хранилищ и трубопроводов для природного сжиженного газа.

**Takahashi K.** Место природного сжиженного газа в энергетике будущего, с. 7–10.

**Yamamoto S.** Материалы и конструкции терминалов для природного сжиженного газа, с. 11–14.

**Kodama M.** Конструкции судов для перевозки природного сжиженного газа и сварочные технологии, с. 15–18.

*MATERIALS SCIENCE and TECHNOLOGY (Англия). — 2004. — Vol. 20, № 2 (англ. яз.)*

**Guo Z., Zhu X. et al.** Микроструктура и износостойкость гальванических композитных покрытий RE-Ni-Mo-P-B4C-PTFE, с. 257–260.

*MATERIALS SCIENCE and TECHNOLOGY (Англия). — 2004. — Vol. 20, № 3 (англ. яз.)*

**Slow K. S., Tay A. A. O. et al.** Механические свойства нанокристаллической меди и никеля, с. 285–294.

**Chen Z. Q., Hu D. et al.** Влияние добавок углерода на микроструктуру и механические свойства Ti-15-3, с. 343–349.

*MATERIALS SCIENCE and TECHNOLOGY (Англия). — 2004. — Vol. 20, № 5 (англ. яз.)*

**Straffelini G., Pellizzari M. et al.** Микроструктура и характеристики ударной вязкости сварных изделий из стали ASTM A105/AISI 304L, выполненных сваркой трением, с. 634–640.

**Smuk O., Hanninen H. et al.** Механические и коррозионные свойства супердуплексной нержавеющей стали P/M-NIP

*MATERIALS SCIENCE and TECHNOLOGY (Англия). — 2004. — Vol. 20, № 8 (англ. яз.)*

**Ojo O. A., Richards N. L. et al.** Ликвация различных фаз в ЗТВ при сварке литого сплава инконеля 738LC, с. 1027–1034.

*QUARTERLY JOURNAL of THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония). — 2004. — Vol. 22, № 4 (November) (яп. яз.)*

**Miyasaka F. et al.** Разработка модели процесса кольцевой сварки ТИГ — модель для сварки труб и плит, с. 487–493.

**Owa T. et al.** Никель-алюминиевое покрытие, выполненное плазменной наплавкой дугой прямого действия и его окислительные свойства, с. 494–501.

**Owa T. et al.** Никель-титановые поверхностные слои, выполненные плазменной наплавкой дугой прямого действия для повышения износостойкости титана, с. 502–508.

**Shirai H. et al.** Влияние профиля луча в фокальной точке на сварочную деформацию, с. 509–514.

**Ekman L., Norlin A., Backlund J.** Оценка качества швов при сварке трением с перемешиванием с использованием вводных и выводных планок, с. 42–43.

**Hasegawa K.** Направления оценки дефектов по стандартам ASME, с. 21–22.

**Hiramatsu U. H. et al.** Примеры оценки разрушений сварных тавровых соединений стальных труб по различным критериям, с. 23–28.

**Nisihimoto K.** Свариваемость жаростойких сплавов и высокотемпературные свойства швов, с. 29–35.

**Shinoda T., Takegami H.** Модификация поверхности с помощью сварки трением, с. 36–40.

**Katayama N.** Современное состояние материалов, используемых для строительства танкеров и трубопроводов для природного сжиженного газа, с. 19–23.

**Yamaguchi I.** Курс лекций. Новейшие разработки в области лазерных спектрометров, с. 24–28.

**Лекции** для практикующих инженеров

**Hirasawa H.** Магнитно-порошковая дефектоскопия с использованием капсульной пленочной обшивки, с. 29–31.

**Koide H.** Диагностика состояния бетонных конструкций с помощью цифровой обработки изображений, с. 32–35.

**Bahadur A., Ravi Kumar B. et al.** Разработка и сравнение остаточных напряжений сварных соединений разными методами, с. 261–269.

**Koussy M. R., Mahallawi I. S.** Влияние термического старения на микроструктуру и механические свойства сварных соединений из дуплексных нержавеющей сталей, с. 375–381.

**Liu H. J., Fujii H. et al.** Микроструктура и механические свойства соединений из литого алюминиевого сплава AC4A, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с. 399–402.

после разных видов промышленной термообработки, которая используется при изготовлении крупногабаритных компонентов, с. 641–644.

**Tyagi R., Nath S. K. et al.** Разработка износостойких среднеуглеродистых двухфазных сталей и их механические свойства, с. 645–652.

**Kawabata T. et al.** Исследование оценки фактического повреждения при повторяющейся предварительной деформации под напряжением и сжатием на плите из высокопрочной стали 780 МПа, с. 515–523.

**Hasegawa M. et al.** Повышение усталостной прочности сварного соединения из сплава алюминия с помощью проковки большой удельной массой, с. 524–530.

**Takahashi I. et al.** Автоматическое ограничение и визуальное обнаружение роста усталостных трещин с помощью нанесения глиноземистой пасты, с. 531–541.



**Kimura M. et al.** Влияние деформации при ползучести на релаксацию напряжений в процессе высокотемпературной пайки электрического соединения керамика-металл, с. 542–550.

**Mori T. et al.** Усталостная прочность клиновидных боковых сварных соединений с алюминиевым покрытием, нанесенным погружением, с. 551–556.

**Kainuma S. et al.** Усталостное поведение несущих крестообразных угловых сварных соединений, имеющих пластины разной толщины, с. 557–564.

*PRAKTIKER (Германия). — 2004. — № 11 (нем. яз.)*

**Vanschen W.** Как функционирует плазменная сварка с формированием канала (Ч. 1), с. 338–340.

**Aretz H.-G.** Точка зрения читателя — Журнал «Praktiker» очень важен для работы в производстве, с. 342–346.

**Функциональность** спецодежды, с. 346–350.

*PRAKTIKER (Германия). — 2004. — № 12 (нем. яз.)*

**Присуждение** инновационной премии Abicor 2004, с. 370–371.

**Kuriykov Y., Kunkel R. et al.** Вибрационная сварка с подогревом инфракрасным излучением, с. 372–373.

**Tuma R., Aretz H.-G.** Как функционирует плазменная сварка с формированием канала (Ч. 2), с. 374–376.

**Сварка** и резка на выставке ЕвроЛИСТ 2004 — очень важно для практиков, с. 1–8.

*PRACTICAL WELDING TODAY (USA). — 2004. — Vol. 8, № 4 (англ. яз.)*

**Ситуация** сварщиков с точки зрения их трудоустройства, с. 18–21.

**Сертификация** сварщиков для выполнения ремонтных работ методом ТИГ в авиакомпании «Delta Air Lines», с. 22–25.

*PRACTICAL WELDING TODAY (USA). — 2004. — Vol. 8, № 5 (англ. яз.)*

**Соответствующий** выбор подачи газа для повышения производительности, с. 16–18.

**Villafuerte J.** Обеспечение срока службы контактных наконечников и стабильность процесса сварки МИГ, с. 20–23.

*SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия). — 2004. — № 11 (нем. яз.)*

**Производство** немецких транспортных средств инвестирует в инновации 24 млрд ЕВРО, с. 580.

**Производительность** сварочных роботов повышается за счет программирования, с. 581.

**Новые** способы программирования промышленных роботов, с. 584.

**Bach F.-W., Kremer G. et al.** Расчет потоков при контактной дуговой резке под водой, с. 586–592.

*SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия). — 2004. — № 12 (нем. яз.)*

**Плазменная** точечная сварка в серийном производстве, с. 642–643.

**Лазерная** пайка полотна круглой пилы, с. 643.

**Сварка** и резка на выставке ЕвроЛист 2004 — очень важно для практиков, с. 1–8.

**Maurer M., Liebscher C. et al.** Новые пеноматериалы, с. 646–652.

*SCHWEISS- & PRUFTECHNIK (Австрия). — 2004. — № 11 (нем. яз.)*

**Своевременно** предупредить разрушение сооружения, с. 135–137.

**Новшества** в области сварки в смесях защитных газов, с. 137–139.

**Nakatani M. et al.** Исследование метода оценки сварочных деформаций при сварке толстолистовых угловых соединений, с. 565–571.

**Nishimoto K. et al.** Лазерная сварка давлением алюминия и низкоуглеродистой стали, с. 572–579.

**Kanai S. et al.** Диффузионное соединение интерметаллида Ti-Al со сплавом Ti-6Al-4V и с чистым титаном, с. 580–586.

**Naragawa M. et al.** Введение остаточных напряжений сжатия на металлические поверхности ультразвуковой волной, усиленной путем погруженного в воду рупора, с. 587–594.

**Wesling V., Giese P. et al.** Плазменно-порошковая наплавка продольно сварных труб большого диаметра, с. 352–354.

**Tatter U.** О некоторых аспектах опасности работы с кислородом, с. 355–357.

**Simler H., Krink V. et al.** Широкий потенциал применения резки тонким плазменным лучом, с. 358–359.

**Janssen A., Jerzembeck J. et al.** Разработки, использование результатов при применении сварки и родственных способов, с. 378–390.

**Zwatz R.** Аттестация способов сварки согласно серии стандартов DIN EN ISO 15607 bis 15614, с. 392–397.

**Schramm W., Zwatz R.** Аттестация сварщиков; сварка плавлением. Ч. 1. Стали DIN EN 287-1, с. 397–398.

**Обеспечение** безопасности при роботизированной сварке, с. 26–28.

**Наплавка** лентой из высокопрочных сплавов, с. 30–32.

**Увеличение** срока службы полотен ленточных пил, с. 34–36.

**Фирма «NARCO»** использует ремонтную сварку для технического обслуживания сталелитейного оборудования, с. 24–26.

**Hahn O., Wibbeke T.-M.** Применение гибридных технологий соединения тонких листовых материалов с низким выделением тепла, с. 593–600.

**Bohm S., Dilger K. et al.** Клейка отбортовки методом реактивного нанесения плавящегося клея, с. 601–605.

**Оптимизация** и контроль процесса лазерной сварки, с. 606–609.

**Заседание** комитета CEN/TC 121/SC 1 в июне 2004 г. в Дюссельдорфе. Требования и аттестация способов сварки металлических материалов, с. 609–611.

**Gramer H., Bschorr T. et al.** Сварка конденсаторным разрядом и среднечастотная сварка сталей с повышенным содержанием углерода, с. 654–660.

**Zwatz R.** Как изменился новый DIN EN 287-1 после аттестации сварщиков стали, с. 661–666.

**Разработки** и использование результатов при применении сварки и родственных способов, с. 667–678.

**Работа** Австрийского института стандартизации, с. 140–141.

**ПРЕДЛАГАЮТСЯ ИЗДАНИЯ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ**

**Книги ❖ Монографии ❖ Труды конференций**



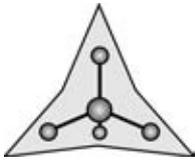
- Ryabov V.R., Dobrushin L.D., Jung-Gi Moon. Welding of Bimetals. — 2003. — 130 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$\*.
- Lysak V.I., Kuzmin S.V. Explosive Welding of Metal Layered Composite Materials. — 2003. — 118 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Juttner B., Vasenin Yu.L. Cathodic Processes of the Metal Vapor Arc. — 2003. — 68 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Междунар. конф., 16–20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В.И. Махненко. — 266 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- Laser Technologies in Welding and Materials Processing: Сб. докл. Междунар. конф., 19–23 мая 2003 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — 2003. — 256 с., формат 200×290 мм (англ. яз.), 100 грн./720 руб./38\$.
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Второй Междунар. конф., 13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В.И. Махненко. — 256 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- Контактная сварка и другие виды сварки давлением: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за 2001–2005 гг., по проблемам различных видов сварки давлением. — 2005. — 128 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- Трубопроводный транспорт: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001–2005 гг., по проблемам трубопроводного транспорта. — 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- КАТАЛОГ. Технологии. Материалы. Оборудование. Содержит информацию о разработанных в последние годы в ИЭС технологиях, материалах и оборудовании для сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов, предлагаемых для коммерческой реализации. — 2005. — 260 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.
- ТИТАН: технологии, оборудование, производство: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за 2001–2004 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. — 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.
- Письменный А. С. Индукционный нагрев при сварке и родственных технологиях. — 2005. — 140 с. — формат 140×200 мм, мягкий переплет, 25 грн./240 руб./20\$.
- Гаращук В.П. Вступ до фізики лазерів. — 2005. — 244 с. — формат 140×200 мм, мягкий переплет, 40 грн./360 руб./38\$.
- Сборник докладов Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing» (23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — 2005. — 246 с., формат 200×290 мм (англ. яз.), 100 грн./720 руб./38\$.

**Готовятся к печати в 2005 г.**

- ✓ Makhnenko V. I., Pochynok V. E. Strength Calculation of Welded Joints with Adjacent Sharp Cavities (англ. яз.). — Kiev: PWI, 2005. — Format 165×235 mm. Hardback (in English).
- ✓ Kononenko V. Ya. Technologies of Underwater Wet Welding and Cutting. — Kiev: PWI, 2005. — Format 140×200 mm. Softback (in English).

*По вопросам заказа изданий следует обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка»  
Тел./факс: (38044) 271 24 03, 529 26 23, 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua*

\* Цены указаны с НДС соответственно для Украины, России и дальнего зарубежья с учетом доставки заказной бандеролью.



## V МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

С 27 по 30 июня 2005 г. в Дрогобычском государственном педагогическом университете им. Ивана Франко (г. Дрогобыч, Львовская обл.) проходила V Международная школа-конференция «Актуальные проблемы физики полупроводников». Организаторами конференции выступили Национальная академия наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Институт физики полупроводников НАНУ, Институт физики НАНУ, Научно-производственное предприятие «Карат» (г. Львов), Дрогобычский государственный педагогический университет им. Ивана Франко.

Сопредседатели конференции: И. В. Блонский — чл.-кор. НАНУ, профессор; В. Ф. Мачулин — чл.-кор. НАНУ, профессор; В. И. Бойчук — профессор.

В работе конференции приняли участие более 120 ученых и инженеров. Были представлены доклады из Украины, России, Белоруссии, США, Румынии и др.

Тематика конференции включала доклады по следующим основным направлениям физики полупроводников: примесные и примесно-структурные комплексы технологического и радиационного происхождения; квантово-размерные явления; электронный транспорт, оптические,

фотоэлектрические и магнитные свойства полупроводниковых кристаллов; фактор структурного разупорядочения базовых свойств полупроводниковых кристаллов; полупроводниковая метрология, новые методы и методики и др.

Ряд докладов на конференции был посвящен вопросам нанофизики и наноэлектроники, являющимися на сегодня базовыми направлениями в полупроводниковой науке и технике. Интерес к этим системам вызван тем, что электрические, оптические и другие свойства в них значительно улучшаются в сравнении с объемными аналогами.

Многие доклады вызвали большой интерес у слушателей, в частности совместный доклад сотрудников Института физики полупроводников НАНУ и Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, в котором показана роль легирующих и фоновых примесей в формировании свойств монокристаллов кремния при бестигельной электронно-лучевой зонной плавке.

Организаторы конференции планируют издать труды конференции в 2006 году.

С. П. Заболотин, канд. техн. наук

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «СОВРЕМЕННЫЕ СВАРОЧНЫЕ ФЛЮСЫ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

29–31 августа 2005 г. в Запорожье на базе завода ОАО «Запорожстеклофлюс» состоялся Международный научно-технический семинар по сварочным флюсам, организованный НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона» НАН Украины, Обществом сварщиков Украины и ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий».

Перед открытием семинара генеральный директор ОАО «Запорожстеклофлюс» Н. Я. Осипов провел экскурсию по заводу, рассказал о проводимой модернизации производства. В частности, сообщил об освоении выпуска новых марок флюсов, в том числе пемзовидных (АН-60, АН-68, АН-47АП), изготавливаемых дуплекс-процессом (газопламенная + электродуговая печь), что значительно улучшает качество. Участники семинара отметили современную оснащенность сварочной и химической лабораторий завода.

В работе семинара приняли участие около 30 ученых и специалистов из Украины, России, Словакии. На нем было представлено 20 докладов. Открыл заседание вице-

президент Общества сварщиков Украины, заведующий отделом техники и технологии дуговой сварки ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, канд. техн. наук В. М. Илюшенко. Заведующий отделом сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона, канд. техн. наук В. И. Галинич рассказал о производстве и применении сварочных плавле-



ных флюсов в Украине. Интересное сообщение о комплексных поставках сварочного оборудования и материалов сделал генеральный директор фирмы «СЭЛМА» Г. В. Павленко. С докладом об организации аттестации и сертификации сварочных флюсов в Российской Федерации выступил директор аттестационного центра ЦНИ-ИТМАШа д-р техн. наук, профессор Н. Н. Потапов. Заместитель директора Института сварки (г. Братислава) Д. Шефчик сделал доклад на тему «Сварочные материалы для наплавки рабочих поверхностей валков линии для непрерывной разливки стали». Особый интерес и дискуссию у участников семинара вызвал доклад канд. техн. наук Ю. Д. Брусницына (ЦНИИКМ «Прометей», г. С.-Петербург) «Сварочные плавные флюсы как компоненты электродных покрытий». Вице-президент Общества сварщиков Украины канд. техн. наук В. М. Илюшенко рассказал о проблемах общества, об отношениях с Научно-техническим сварочным обществом Российской Федерации. А. К. Царюк, канд. техн. наук (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) сделал доклад о флюсах для сварки ответственных конструкций энергетического машино-

строения. Доклады кандидатов техн. наук И. А. Гончарова и В. В. Головки (ИЭС им. Е. О. Патона) касались перспектив организации производства агломерированных флюсов с использованием плавных полупродуктов.

С докладом «Бесфтористые флюсы для сварки и наплавки. Методики определения сварочно-технологических свойств» выступил доцент НТУУ «Киевский политехнический институт» канд. техн. наук Л. А. Жданов. Значительный интерес вызвал доклад заведующего группой плавных флюсов ИЭС им. Е. О. Патона В. С. Токарева «Улучшение отделимости шлаковой корки при дуговой наплавке порошковыми проволоками под флюсом АН-348А в условиях предварительного подогрева». В докладе канд. техн. наук А. В. Залевского (фирма «ИНПАТ», г. Киев) рассматривались новые направления в технологии производства сварочных флюсов.

Участники семинара в неформальной обстановке имели возможность обсудить проблемы взаимовыгодного сотрудничества ученых и производителей Украины, Словакии и России в области производства и применения сварочных флюсов.

В. С. Токарев, И. А. Гончаров,  
кандидаты техн. наук

У ДК 621.791.009(100)

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА XXI ВЕКА»

19–23 сентября 2005 г. в Крыму (пгт Николаевка) состоялась VI Международная конференция «Возобновляемая энергетика XXI века». Ее организаторами выступили



Институт возобновляемой энергетики НАНУ, Минпромполитики, Минтопэнерго, Министерство по вопросам молодежи и спорта, Министерство образования и науки, Государственный комитет энергосбережения Украины, а также ГНПП «Укрэнергомаш», МНТЦ ветроэнергетики НАНУ, журнал «Зелена енергетика», издательство «Екоінформ».

В работе конференции приняли участие 86 ученых и специалистов из Украины, России, Узбекистана и Венгрии.

Тематика конференции включала доклады по следующим основным направлениям возобновляемой энергетики: ветроэнергетика, солнечная энергетика, энергия геотермальных источников, биоэнергетика.

Во всех докладах была отмечена важность развития возобновляемой энергетики. Использование возобновляемых источников энергии дает возможность сократить применение дефицитных в Украине нефти и газа и уменьшить негативное влияние вредных выбросов на окружающую среду. В этом направлении сейчас движется вся мировая энергетика. Германия, США, Япония и некоторые другие развитые страны планируют в первой половине XXI века увеличить долю возобновляемой энергетики в общем энергобалансе до 20...50 %. Европейское сообщество планирует к 2010 г. увеличить долю возобновляемых источников до 12 %. Поэтому часть возобновляемых источников энергии в национальном энергопроизводстве стран, которые стремятся к вступлению в ЕС, должна составлять не меньше 12 %.

По материалам прошедшей конференции был издан сборник статей «Відновлювана енергетика XXI століття».

С материалами конференции, а также с первыми выпусками журнала «Відновлювана енергетика» можна ознакомитися в Інституті возобновляемой энергетики НАН Украины.

В. В. Волков, канд. техн. наук

## XIX МОЛОДЕЖНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. Г. В. КАРПЕНКО НАНУ

21–23 сентября 2005 г. во Львове по инициативе Совета молодых ученых и специалистов ФМИ им. Г. В. Карпенко состоялась XIX научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «КМН-2005», посвященная 95-й годовщине со дня рождения академика Г. В. Карпенко. Конференция проходила при поддержке Украинского общества по механике разрушения материалов, Украинской ассоциации коррозионистов, Западноукраинского объединенного отделения IEEE, провайдера услуг «Интернет-Украина», ГП «Инженерный центр «Техно-Ресурс», ГМП «Газотермик», Главного управления по делам семьи и молодежи, Львовской областной государственной администрации.



Академик НАНУ В. В. Панасюк открывает конференцию

Цель конференции — поддержка молодых ученых и специалистов научных и учебных организаций различных регионов Украины и повышение их профессиональной квалификации и научного уровня, а также апробация новых научных результатов, приобретение опыта публичного изложения и защиты основных положений работы.

На конференцию было заявлено 135 докладов молодых ученых и специалистов, представлявших 23 научные, учебные организации и предприятия Киева, Запорожья, Луганска, Ивано-Франковска, Луцка, Тернополя, Ровно.

Открыл конференцию директор ФМИ им. Г. В. Карпенко академик НАН Украины В. В. Панасюк. В своей вступительной речи он рассказал о выдающемся украинском ученом, чье имя было присвоено Физико-механическому институту в 1980 г., о том, как зарождался и развивался институт, о тех, кто стоял у его истоков — М. Я. Леонове, В. М. Михайловском, К. Б. Карандееве и др. Отметил важность и актуальность проведения подобных конференций, необходимость привлечения молодых ученых в науку и развитие их творческого и интеллектуального потенциала. В ходе пленарного заседания, посвященного открытию конференции, с лекционными докладами выступили также д-р физ.-мат. наук Д. Б. Куриляк, д-р техн. наук А. З. Студент, канд. техн. наук О. Б. Рябов.

Конференция проходила в течение трех дней в секциях по следующим направлениям: «Механика разрушения и прочность материалов. Защита от коррозии», «Физичес-



Выступление С. Г. Григоренко

кие поля в неоднородных средах. Математические модели и методы механики», «Современные проблемы материаловедения, новые материалы и технологии», «Математические модели и методы механики. Современные проблемы алгебры и анализа», «Водородные технологии. Трибология и трибофатика», «Численные методы. Математические модели сигналов и систем. Обработка изображений и распознавания образов», «Неразрушающий контроль материалов. Диагностические системы», «Экологический мониторинг». В ходе работы конференции заслушан 131 доклад. Большинство докладов были посвящены математическому и физико-математическому моделированию механических процессов и численным методам решения прикладных задач.

Институт электросварки был представлен четырьмя докладами: «Водородная деградация корпусной стали 15X2МФА» (С. Н. Степанюк), «Особенности структуры соединений, полученных сваркой давлением, низкоуглеродистой трубной стали 10Г2ФБ класса прочности Х70» (С. Г. Григоренко), «Влияние методов получения на свойства порошков из сплава AlCuFe» (А. Ю. Туник), «Аналитическое решение уравнения диффузии водорода, рас-



Победители конкурса «Лучший доклад»

творенного в цилиндрической наплавке» (А. В. Игнатенко), которые вызвали интерес у аудитории.

По окончании конференции авторам лучших докладов были вручены дипломы и денежные премии. Среди лауреатов отмечены и два представителя ИЭС им. Е. О. Патона: А. Ю. Туник (диплом I степени) и С. Н. Степанюк (диплом III степени).

УДК 621.791.002

## ЗАСЕДАНИЕ БЮРО МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО СОВЕТА ПО СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

22 сентября 2005 г. в Минске под председательством академика Б. Е. Патона состоялось заседание бюро Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям, в работе которого приняли участие члены бюро от Республики Грузия, Республики Беларусь, Российской Федерации и Украины. На заседание бюро были приглашены ответственные сотрудники Совета Министров, Министерства промышленности, Госстандарта Республики Беларусь, а также главные сварщики крупных промышленных предприятий.

Члены бюро рассмотрели ход выполнения межгосударственной научно-технической программы «Создание конкурентоспособных на мировом рынке сварных конструкций, ресурсосберегающих технологий, материалов и оборудования для сварочного производства», вопросы подготовки стандартов по сварке и родственным технологиям, гармонизированных с европейскими, проблемы подготовки и аттестации кадров для сварочного производства, а также ряд организационных вопросов.

В результате обмена информацией были приняты соответствующие решения. В частности, в рамках межгосударственной программы признаны приоритетными направления исследования в области энергетики и оценки остаточного ресурса безопасной эксплуатации сварных конструкций ответственного назначения; утвержден сводный план по стандартизации на 2005–2008 гг., подготов-

УДК 621.791.009(100)

## 2-й НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ПО СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ СТРАН СНГ «ДУГОВАЯ СВАРКА. МАТЕРИАЛЫ И КАЧЕСТВО»

26–30 сентября 2005 г. Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ совместно с ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод — МЕТИЗ» организовали и провели в Магнитогорске 2-й Научно-практический семинар по сварочным материалам на тему «Дуговая сварка. Материалы и качество», посвященный 15-летию Ассоциации «Электрод».

В работе семинара приняли участие 80 человек, представляющих 50 предприятий, акционерных обществ, фирм,

Необходимо отметить, что Совет молодых ученых и специалистов ФМИ, программный и организационные комитеты во главе с академиком НАНУ В. В. Панасюком и чл.-кор. НАНУ З. Т. Назарчуком приложили все усилия, чтобы конференция прошла на высоком организационном и техническом уровне. По материалам докладов будет издан сборник трудов конференции.

С. Н. Степанюк, канд. техн. наук

ленный рабочей группой МТК-72 «Сварка и родственные процессы». Признано целесообразным создание единой системы по обучению, квалификации, сертификации персонала сварочного производства, что даст возможность гарантировать уровень качества изготовления сварных конструкций вне зависимости от страны-изготовителя, а также обеспечить условия для свободного перемещения рабочей силы в странах СНГ, для чего с учетом международной практики необходимо разработать соответствующие нормативные документы.

По предложению делегации Республики Беларусь в состав бюро вместо выбывшего В. А. Бикмана введен генеральный директор Белорусского государственного научно-производственного концерна порошковой металлургии д-р техн. наук А. Ф. Ильюшенко.

Принято предложение делегации Российской Федерации провести заседание бюро Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям в 2006 г. в Москве.

Заседание бюро научного совета прошло в обстановке полного взаимопонимания и заинтересованности в развитии творческих связей ученых и специалистов стран-участниц, а также было подчеркнуто, что совместными усилиями можно успешно решить актуальные проблемы сварочной науки и производства.

А. В. Бабаев, канд. техн. наук



тоспособных сварочных материалов, созданием и внедрением современных материалов, технологического оборудования, прогрессивных технологических процессов, а также обеспечением сертификации продукции и управления качеством и переоснащением существующих мощностей современным оборудованием.

В приветственном слове управляющего компанией ООО «ММК-МЕТИЗ» А. Д. Носова, которое зачитал исполнительный директор А. В. Титов, содержалась краткая историческая справка о становлении и развитии завода. Главный инженер А. М. Артемов доложил о перспективах развития производства сварочных материалов на ОАО «ММК-МЕТИЗ», ознакомил с разработанной программой на 2005–2012 гг., которая предусматривает приобретение:

- линии ЛИП 1,8-3,5 для изготовления сварочной и наплавочной порошковых проволок и замены физически изношенных станков;
- универсальной тоннельной печи для сушки и прокатки электродов взамен конвейерной;
- рентгенофлуоресцентного спектрометра;
- линии дозирования для производства электродов специального назначения, порошковой проволоки (сварочной и наплавочной), что позволяет повысить качество шихты и полностью механизировать процесс дозирования;
- новой линии ЛИП 10-19 для производства порошковой проволоки для внепечной обработки металлургических расплавов и др.

По отдельным направлениям выступили также специалисты завода: И. Н. Зверева, инж., С. В. Михайлицын, канд. техн. наук («Особенности изготовления электродов специального назначения в условиях электродного цеха завода»); А. А. Соколов, инж. («О роли испытательной лаборатории в вопросах обеспечения качества электродов и порошковой проволоки»); С. В. Ишимов, инж., И. Н. Зверева, инж. («Освоение порошковой проволоки для внепечной обработки металлургических расплавов»); О. А. Путова, инж. («Опыт сертификации и аттестации сварочных материалов в условиях завода»).

Большой интерес у слушателей вызвали следующие доклады: П. В. Игнатченко, А. И. Бугая «15 лет Ассоциации «Электрод» и анализ состояния производства сварочных материалов в странах СНГ», академика И. К. Походни НАНУ (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) «Сварочные материалы. Состояние и пути совершенствования»,

зачитанный И. Р. Явдошиным, академика И. М. Лившица МАРЭ (ЗАО «Свэма») «О создании новых сварочных электродов», И. Н. Ворновицкого, канд. техн. наук (ЗАО «Электрод»), А. П. Волохова, инж. (ЗАО «ЗСЭ СИБЭС»); И. Р. Явдошина, (Н. В. Скорины, кандидатов техн. наук (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) («О возможности использования сварочной проволоки из полуспокойной стали взамен проволоки Св-08»); «Исследования химической активности порошков ферросплавов, используемых в электродном производстве с жидким стеклом», М. Ф. Гнатенко, канд. техн. наук (ООО «Велма») («Новые технические и технологические решения в области покрытых сварочных электродов»); А. Н. Балина, канд. техн. наук (ЗАО «ЗСМ») («Наплавочные материалы для упрочнения деталей в условиях ударно-абразивного износа»); В. П. Костюченко и др. (ОАО «Межгосметиз-Мценск») «Особенности производства прочной омедненной проволоки на ОАО «Межгосметиз-Мценск».

За весомый вклад в создание и развитие производства конкурентоспособных сварочных электродов и в честь 15-летия Ассоциации «Электрод» были награждены дипломами такие предприятия, как ОАО «ЧСПЗ» (г. Череповец), ОАО «Межгосметиз-Мценск», ОАО «ОСП «Элком» (г. Комсомольск-на-Амуре), ОАО «ММК-Метиз» (г. Магнитогорск), ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ОАО «Спецэлектрод» (г. Москва), ООО «Велма» (г. Киев) и др. Кроме того, ряд специалистов был награжден грамотами за активное участие в создании современного электродного производства, в частности М. И. Кучеров, нач. технического бюро ЗАО «Электродный завод» (г. С.-Петербург), Г. Н. Полищук, нач. технического отдела ОАО «Спецэлектрод» (г. Москва), З. А. Сидлин, д-р техн. наук директор по науке и качеству ЗАО «СЗМ «Ротекс» и др.

Участникам семинара были розданы сборники докладов и справочники Ассоциации «Электрод» (2005 г.). Затем была проведена экскурсия по цехам ОАО «ММК-Метиз», где участники семинара ознакомились с производством сварочных электродов, легированных сварочных проволок диаметром 0,8...2,0 мм, порошковых проволок, метизной продукции.

П. В. Игнатченко,  
исп. директор Ассоциации «Электрод»

## СЕМИНАР «СУДОСТРОЕНИЕ. СВАРКА 2005»

5 октября 2005 г. в Каховке на ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования» (КЗЭСО) состоялся уже ставший традиционным семинар «Судостроение. Сварка 2005». В его работе приняли участие свыше 30 специалистов, представлявших судостроительные и судоремонтные заводы Украины и России (ОАО «Севморверф», г. Севастополь; ГП «ХСЗ» и ОАО «Паллада» г. Херсон; СРЗ РФ № 13, г. Севастополь; ГП ССЗ им. «61 Коммунара и ГПНПКГ «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев), Институт электросварки им. Е. О. Патона, Международная ассоциация «Сварка», Общество сварщиков Украины, производители сварочных порошковых проволок (ООО «АРК-СЭЛ», г. Донецк; ООО «ТМ.ВЕЛТЕК», г. Киев), Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова, г. Николаев; ЧП «Технотест», г. Одесса, специализированные журналы «Автоматическая сварка» и «Сварщик» (г. Киев). От КЗЭСО в работе семинара приняли участие руководители и главные специалисты технических служб и отдела маркетинга.

Цель семинара — ознакомление потенциальных потребителей с продукцией КЗЭСО, организацией и культурой производства, технической политикой предприятия по совершенствованию выпускаемой техники, учет пожеланий и анализ возможных замечаний со стороны потребителей, основанный на опыте эксплуатации ранее поставленного оборудования, а также с учетом новых задач в производстве на судоремонтных и судостроительных предприятиях.

Открыл работу семинара директор ОАО «КЗЭСО» Я. И. Микитин. Он кратко осветил достижения завода за прошедшие два года. За этот период создан ряд новых изделий, систем управления, расширен типовой ряд выпрямителей. В целом объемы продаж возросли вдвое по сравнению с 1980-ми годами. Возникла серьезная задача: не допустить отставания тылов (традиционно выпускаемые и пользующиеся спросом образцы техники) с передовыми (созданными в последние годы). Полезное сотрудничество налажено с одесской фирмой ЧП «Технотест», позволившей найти удачные решения по упрощению техники в эксплуатации при одновременном повышении надежности. Завод в 2004 г. отметил свой 75-летний юбилей. Приятно, что сегодня КЗЭСО стал в ряд предприятий, определяющих уровень современного оборудования для дуговой сварки в СНГ. По контактными машинам сохранено лидирующее положение в мире. В 2006 г. появятся новые машины. Среди них мобильная машина для сварки крестовин, которая выполняется по заказу из России. В настоящее время идут проектные работы, а в 2006 г. опытные образцы уже будут опробованы на трассе. Имеются заказы на внутритрубные машины для контактной сварки труб большого диаметра (1020...1420 мм). В них заложены интересные конструкторские и инженерные решения. На предприятии продолжается реконструкция производственных мощностей, в том числе на приобретенной в последнее время производ-

ственной площадке. Там будет налажено производство мобильных железнодорожных комплексов.

Основная доля продаж оборудования для дуговой сварки сегодня составляет 40...45 % общего выпуска оборудования, около 50 % приходится на машины для контактной сварки и 10 % на радиаторы.

Среди новых образцов оборудования для дуговой сварки источник на 3000 А (для металлургической промышленности), два полуавтомата, установка для аргонодуговой сварки алюминия и его сплавов, нержавеющей сталей. Налажен выпуск порталов, оснащенных оборудованием для дуговой сварки крупногабаритных сварных конструкций. Именно они способны в ближайшие годы заменить на судостроительных предприятиях устаревшие образцы оборудования зарубежных фирм.

Среди первоочередных задач предприятия — приблизиться к максимально полной номенклатуре дугового оборудования. При этом прямые контакты с главными специалистами заводов, по мнению Я. И. Микитина, позволяют получать оперативную информацию и помогают достигать быстрого результата в совершенствовании производимого оборудования.

В 2006 г. завод планирует организацию производства инверторных источников питания (прежде всего для полуавтоматической и автоматической сварки в среде углекислого газа). И в этой связи участники семинара могут уже сейчас направлять на завод свои технические задания на их проектирование с учетом требований производства.

Сегодня по откликам многих производителей Украины и России выпрямители КЗЭСО имеют наилучшие показатели технологических свойств. Для них характерны прежде всего простота и надежность. Есть некоторые замечания по транспортировке оборудования. Необходимо усовершенствовать систему крепления оборудования при транспортировке, ужесточить испытания на «тряску». Уже с IV квартала 2005 г. будут освоены новые системы компоновки конструкций крепления.

Уделяется серьезное внимание сервису. При необходимости специалисты КЗЭСО оперативно устраняют неисправности, возникающие при эксплуатации оборудования.

Приобретен опыт реализации оборудования совместно с передачей технологии сварки (например, для ОАО «Азовмаш»).

В заключение Я. И. Микитин отметил, что КЗЭСО постоянно идет навстречу производителям для обеспечения надежного партнерского сотрудничества.

Участники семинара ознакомились с основными цехами завода, посетили развернутую выставку оборудования. Там же им была продемонстрирована дуговая полуавтоматическая сварка с использованием порошковых проволок диаметром 1,2 мм производства ООО «АРКСЭЛ» и ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» на оборудовании КЗЭСО. После посещения цехов состоялся оживленный обмен мнениями участников семинара. Резюмируя его, следует отметить, что представители предприятий дали в целом высокую



оценку производимому на КСЭЗО сварочному оборудованию и поделились результатами успешной его эксплуатации. Были высказаны пожелания направлять образцы новых источников и полуавтоматов на предприятия судостроения для всесторонней производственной проверки.

Выступающие отметили как весьма положительный факт оснащения оборудованием классов дуговой сварки профильных кафедр технических вузов Украины (г. Киев, Николаев, Херсон, Львов, Тернополь), России (г. Новгород, Екатеринбург), Беларуси (г. Минск, Могилев).

Главный сварщик ГППКГ «Зоря»-«Машпроект» Ю. В. Бутенко высказал предложение в будущем приглашать на подобные семинары ведущих ученых ИЭС им. Е. О. Патона для вводных лекций теоретического характера. Были предложены комплектовать реализуемую технику технологическими рекомендациями потребите-

лям, включающими режимы сварки для различных видов сварочных материалов и перечень предпочтительных поставщиков их поставщиков. В. М. Илюшенко (ИЭС им. Е. О. Патона) высказал пожелание в будущем на подобных семинарах обсуждать результаты оценки технологических свойств оборудования КСЭЗО при работе с конкретными поставщиками сварочных материалов.

Технический директор ОАО «АРКСЭЛ» А. Н. Алимов ознакомил участников семинара с номенклатурой производимых ими сварочных проволок малого диаметра, ни в чем не уступающих лучшим западным образцам и уже вытеснившим их в ряде случаев на судостроительных заводах Украины.

В заключение Я. И. Микитин поблагодарил участников семинара за активное участие в работе, подчеркнул его высокую эффективность и пожелал всем успехов в подьеме сварочного производства Украины.

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

У ДК 621.791.009(100)

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПАЙКА 2005»

6–8 октября 2005 г. в Тольятти (Россия) проходила Международная научно-техническая конференция «Пайка 2005», посвященная 35-летию кафедры оборудования и технологии пайки.

В конференции приняли участие более 60 специалистов из трех стран (Россия, Украина, Германия), представителей 20 городов, более 30 предприятий и организа-

ций, среди них 10 докторов и 20 кандидатов наук, а также руководители предприятий. Кроме того, в работе конференции принимали активное участие преподаватели, сотрудники и студенты Тольяттинского государственного университета. Со вступительным словом выступили ректор университета С. Ф. Жилкин и В. И. Столбов, который был ректором в течение многих лет. Последний особо

отметил, что в течение всех 35 лет существования кафедры осуществлялся тесный контакт с ИЭС им. Е. О. Патона, и выразил надежду, что сотрудничество сохранится и в дальнейшем.

Научные достижения кафедры, ее широкая связь с производством были освещены в докладе А. Ю. Краснопецева и Б. Н. Перевезенцева «Кафедра «Оборудование и технология пайки» за 35 лет». За эти годы сотрудники кафедры не только создали учебные программы и лабораторную базу для подготовки высококвалифицированных специалистов, но и истинно творческую среду для научной работы.

На конференции были представлены доклады из четырех стран (Россия — 30 докладов, Украина — 3, Германия — 5 и США — 1 доклад).

Анализ докладов, сделанных представителями России, показывает, что в России быстрыми темпами развивается производство припоев на базе современных технологий. Появились лидеры, которые все увереннее завладевают рынком своей страны — это ЗАО «АЛАРМ» и ООО «МИФИ-АМЕТО», где используются принципиально отличные от традиционных технологии ускоренного охлаждения расплава. В ЗАО «АЛАРМ» получил развитие метод экстракции расплава, который заключается в извлечении вращающимся кристаллизатором из ванны расплава затвердевающей на его поверхности заготовки. Технология отличается высокой производительностью и сравнительно низкой стоимостью продукции. «МИФИ-АМЕТО» использует более известный метод сверхбыстрой закалки (более 105 К/с) на вращающемся с большой скоростью диске с получением аморфных или нанокристаллических пластичных припоев. Метод пригоден для широкой гаммы металлических сплавов, в том числе на основе химически активных металлов. В докладах В. Т. Федотова и О. Н. Севрюкова представлены последние достижения предприятия в этой области. Интересная информация о получении припоев системы Cu–Mn–Ni механическим легированием содержалась в докладе И. Н. Пашкова (ЗАО «АЛАРМ»).

В области пайки алюминия все более явным лидером становится ОАО «Криогенмаш». Предприятие выпускает для криогенной техники уникальные пластинчато-ребристые теплообменники больших размеров, которые ранее изготавливали в соляных ваннах. Проведя большой объем исследований под руководством Е. И. Сторчая, сотрудники предприятия предложили технологию бесфлюсовой пайки таких теплообменников. В докладе, представленном Л. С. Лантушенко, освещены различные аспекты этого процесса.

Сотрудниками кафедры пайки Тольяттинского политехнического института было представлено 13 докладов, из которых следует, что основными направлениями исследований на кафедре являются контейнерная пайка, пайка

в парах металлов, оценка коррозионной стойкости соединений и остаточного ресурса конструкций, пайка титановых сплавов. Отдельно следует упомянуть доклад «Пайка ювелирных изделий» — о деятельности школы дизайнеров при университете, который сопровождался показом ювелирных изделий, выполненных в сложной технике и с большим художественным вкусом.

Несомненный интерес представлял доклад о дуговой пайке кузовов автомобилей (ОАО «АвтоВАЗ»), хотя и не отражал передовых достижений развития этого процесса.

В области низкотемпературной пайки большой интерес вызвали доклады: «Низкотемпературный теплоноситель для пайки волноводных узлов через металлические покрытия (ФГУП «НПП Исток», г. Фрязино) и «Оборудование для пайки в микроэлектронике» (НПП «КВП Радуга», г. Москва).

В целом следует отметить, что пайка в России активно развивается, стабильно растет рынок паяльных материалов, и пайка все больше применяется в промышленности. В то же время мало было представлено докладов, отражающих фундаментальные исследования. Может быть, это в какой-то мере объясняется отсутствием на конференции таких институтов, как ВИАМ, НИАТ, НИИД, Техномаш и др.

Большой резонанс получили доклады немецких ученых. Из них следует отметить доклад В. Шилия, М. Новотника и К. Виттке «Проблемы при применении бессвинцовых припоев в электронной промышленности Европы». Эта проблема, важнейшая для электроники, к сожалению, практически не решается в странах СНГ, и информация была весьма полезна. Неоднозначно был принят доклад тех же авторов «Производство паяных соединений методом надсолидусной пайки», в котором были обобщены известные в практике технологии пайки внутри интервала плавления припоя. Оживленную дискуссию вызвал доклад К. Виттке о новом подходе к определению понятий, определяющих различные методы соединения (сварка, пайка и склеивание).

Оживленную дискуссию вызвали также доклады по пайке жаропрочных никелевых сплавов и алюминия с использованием реактивного флюса (Институт электросварки им. Е. О. Патона, Украина). Большой интерес был проявлен также к обзору работ института в разных областях пайки.

Кроме докладов, были организованы технические экскурсии в музей ВАЗа, где представлены различные образцы военной техники, включая подводную лодку, школу-студию художественных изделий. Интересной была и культурная программа.

При подведении итогов конференции было высказано желание провести следующую конференцию по пайке в Киеве.

В. Ф. Хорунов, д-р техн. наук

## «Современное состояние, направления развития сварочной науки и техники» — лекция, посвященная памяти А. М. Сливинского

10 октября 2005 г. в актовом зале главного корпуса НТУУ «КПИ» была заслушана лекция зам. директора ИЭС им. Е. О. Патона академика НАН Украины профессора К. А. Ющенко на тему «Современное состояние, направления развития сварочной науки и техники», посвященная памяти декана сварочного факультета КПИ Анатолия Матвеевича Сливинского.

Среди слушателей — нынешние и бывшие студенты сварочного факультета, представители администрации и профессорско-преподавательского коллектива НТУУ «КПИ», руководство Общества сварщиков Украины, ИЭС им. Е. О. Патона, всего свыше 200 чел.

Церемонию памятного мероприятия открыл нынешний декан сварочного факультета С. К. Фомичев. В коротком вступительном слове Президент Общества сварщиков Украины В. Г. Фартушный отметил высокие заслуги А. М. Сливинского на поприще научно-педагогической, организаторской и общественной деятельности и предложил ежегодно в НТУУ «КПИ» проводить лекцию, посвященную памяти А. М. Сливинского. Затем С. К. Фомичев рассказал о жизненном пути А. М. Сливинского. Он родился в 1939 г. в крестьянской семье на Винничине. В 16 лет поступил на механический факультет КПИ при конкурсе около семи человек на место. По окончании вуза А. М. Сливинский отказался от лестного приглашения работать на «Южмаше» и остался на кафедре технологии и оборудования сварочного производства КПИ. Здесь он творчески развивался в научно-педагогической школе под руководством И. П. Трогуна и В. И. Дятлова, прошел путь от ассистента до профессора кафедры, декана сварочного факультета. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию. Был одним из организаторов восстановления сварочного факультета в КПИ и в течение 26 лет его бесшумным деканом. Велика заслуга А. М. Сливинского в строительстве и оснащении 22-го (сварочного) корпуса КПИ. Им опубликовано более 100 печатных работ, под-

готовлено 9 кандидатов. С начала 1990-х гг. А. М. Сливинский был один из руководителей Украинского аттестационного комитета сварщиков. Он явился основателем украинско-немецкого факультета (Киев–Магдебург). А. М. Сливинский был известным в Украине и за рубежом педагогом. Его знали как мудрого, порядочного, рассудительного ученого, большого жизнелюба. 28 октября 2004 г. А. М. Сливинского не стало. Память о нем будет жить в сердцах сварщиков не одного поколения.

Затем присутствующие заслушали лекцию К. А. Ющенко, который отметил вначале, что ее проведение связано с обещанием А. М. Сливинскому помочь организовать ежегодное проведение для студентов сварочного факультета НТУУ «КПИ» лекций ведущих ученых ИЭС им. Е. О. Патона с целью ознакомления их с передовыми достижениями и путями развития сварочной науки и техники, рассказать им, какие задачи могут возникать перед ними в сфере науки и производства уже сегодня.

Лекция, длившаяся около двух часов, была выслушана с большим вниманием. В ней были взаимосвязано представлены следующие посылки:

- Россия и Украина — родина великих и славных имен, оставивших глубокий след в истории сварочной науки и техники;
- современные сварочные конструкции часто включают не только металлы, но и керамику, композиты, полимеры, наноматериалы и др.;
- нынешнему поколению сварщиков необходимо уметь решать проблемы соединения широкой гаммы материалов, в том числе несвариваемых (способами плавления) материалов;
- современная классификация способов соединения должна базироваться на трех агрегатных состояниях веществ, участвующих в соединении (сварка плавлением, сварка в твердой фазе, парогазовые технологии);





- с учетом современных взглядов на способы соединения должны быть пересмотрены воззрения на существовавшую оценку свариваемости (соединяемости) материалов (без учета взаимосвязи используемой технологии сварки);

- предложена новая формулировка свариваемости (соединяемости) материалов как свойства материала образовывать неразъемное соединение во взаимосвязи со степенью деградации свойств соединений в целом (как на стадии изготовления сварных конструкций, так и с учетом проведения их при эксплуатации). Это свойство необходимо учитывать при проектировании, отработке технологии соединения с учетом прогноза эксплуатации;

- современные подходы к выбору технологии соединения плавлением должны базироваться на минимальном тепловложении, максимальной концентрации энергии в зоне сварки (А-ТИГ, лазер+плазма, лазер+МИГ, лазер+микроплазма), возможностью управления дугой (импульсно-реверсивная сварка) плазменно-порошковая сварка на малых токах;

- хорошие перспективы более широкого применения способов сварки в твердой фазе (холодной, ударной, пресовой сварке с вращающейся в магнитном поле дугой, сварке взрывом, сварке трением с перемешиванием, линейной сварке трением, разрядно-импульсной сварке и др.);

- применение технологий соединения с использованием парогазового состояния веществ пока ограничено

в основном технологиями нанесения покрытий. Хорошие перспективы ее применения при получении термобарьерных покрытий;

- получены обнадеживающие результаты по широкому использованию сварки живых тканей в медицине;

- с новых позиций определения свариваемости (соединяемости) все материалы можно соединять. Нужно грамотно обосновать и выбрать способ сварки;

- существуют подходы к оценке термонапряженного состояния соединяемых материалов, компьютерные программы оценки тепловых и температурно-силовых полей, текущих и остаточных напряжений и деформаций, позволившие прогнозировать степень деградации соединений;

- хорошие перспективы использования при сварке систем интеллектуального управления (например, лазерных датчиков);

- важно в Украине обеспечить подготовку и аттестацию специалистов сварочного производства (выпускников вузов), соответствующую требованиям международной классификации.

Присутствующие тепло поблагодарили докладчика и выразили надежду, что лекция будет опубликована в полном объеме в журнале «Автоматическая сварка».

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ЗАВОДА «ЭЛЕКТРИК»

Завод «Электрик» выпускает самую широкую номенклатуру сварочного оборудования из всех известных производителей сварочного оборудования. Понятно, что в годы промышленного спада был велик соблазн сократить номенклатуру, снизить издержки и перейти к выпуску только простого наиболее востребованного оборудования, снижая уровень требований к его конструкции. Однако такая стратегия привела бы к потере лица завода как многогранного универсального производителя качественного сварочного оборудования, полностью отвечающего требованиям пусть и непопулярных, но действующих ГОСТов.

Таким образом, мы возложили на себя тяжелую обязанность поддержки номенклатуры выпускаемого оборудования. Для этой цели практически все серийное оборудование регулярно подвергается модернизации. Сейчас, может быть, найдется 2–3 единицы в номенклатуре, которые сохранились в том же виде, что 10 лет назад.

С какой же целью проводится модернизация? В первую очередь для максимального удовлетворения желаний наших клиентов. С точки зрения функциональных свойств, с точки зрения замены комплектующих с низкой надежностью на их аналоги, снижения, там, где это необходимо, массогабаритных показателей, а также для повышения конструктивной надежности.

Если бы мы ограничились только этой работой, то наш завод не имел бы будущего, поэтому наряду с сопровождением наших, хорошо известных серийных изделий, мы постоянно занимаемся разработкой новых.

Каким же образом мы выбираем объекты для проектирования? Опять же в первую очередь с целью максимального удовлетворения потребностей наших клиентов по минимально возможной цене. Достигается это уменьшением размерного шага модельного ряда за счет создания новых образцов оборудования с промежуточным набором параметров. Такую работу можно хорошо проиллюстрировать на примере работы с модельным рядом контактных машин для шовной сварки на переменном токе. Известно, что практически все задачи, стоящие перед потребителями, разрешаются знаменитой парой



Рис. 1

МШ-3207 и МШ-3208 (рис. 1), много лет обеспечивавшей потребности отечественной промышленности за счет очень широкого диапазона возможных токов и усилий. Конечно, для сварки тонких материалов эта машина излишне сложна и дорога, но кто прежде об этом думал.

В последние же годы, когда соответствие технических характеристик, цены оборудования и решаемых задач стало для всех важнейшим критерием выбора, возросла актуальность формирования правильного типоряда.

Наши исследования показали, что лишь для небольшой части потребителей (по нашей оценке 10...15 %) необходимы предельные параметры, обеспечиваемые шовными машинами на 32 кА, а оставшиеся 85...90 % потребителей могут быть удовлетворены машинами с токами до 25 кА. Было принято решение о серьезном расширении номенклатуры шовных машин. В результате сегодня мы выпускаем:

МШ-2005	Макс. ток 20 кА	Поперечная шовная машина
МШ-2204	Макс. ток 25 кА	Продольная шовная машина
МШ-2207		Поперечная шовная машина
МШ-2501	Макс. ток 25 кА	Поперечная шовная машина
МШ-2502		Продольная шовная машина

Другим примером дополнения типоряда выпускаемого оборудования является появление в номенклатуре завода специальной настольной машины для контактной микросварки УК-0501 (рис. 2).



Рис. 2

Создание новой техники в области контактных сеточных машин, которые завод «Электрик» выпускает уже многие годы, было обусловлено также и тем, что в последнее время заказчики все более настойчиво требовали предоставлять им не просто сварочную машину, а весь комплект оборудования, необходимого для выпуска готовой товарной сетки. Таким образом, в номенклатуре завода, кроме отдельных многоэлектродных машин, появились комплектные линии для производства сетки КТС-051 (рис. 3) на базе хорошо известной машины МТМ-166 и КТС-052 на базе не менее известной машины МТМ-307. В настоящее время на выходе находится линия КТС-053 для производства

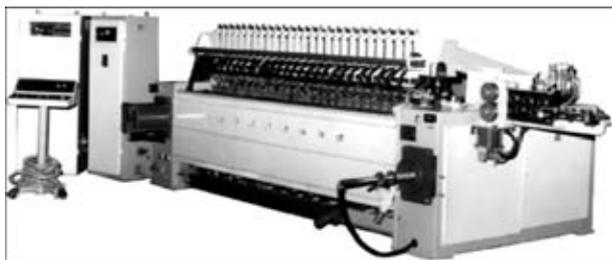


Рис. 3

рулонной сетки из проволоки диаметром от 1,8 до 3,0 мм и КТС-054 для производства кладочной и мебельной сетки на основе новой многоэлектродной машины типа МТМ-319 с шириной сетки до 1 м и размером ячейки 50×50 мм. Эта линия за час работы позволит получить до 240 м готовой сетки с указанными параметрами.

Все линии оснащены необходимым количеством размоточных и правильных устройств, собственно многоэлектродной машиной, гильотиной и штабелером. Естественно, что все машины прошли модернизацию и выполнены на основе современных электроприводов, пневмоаппаратуры и силовой электроники и управляются микропроцессорными промышленными контроллерами.

По аналогичной причине была разработана 2-х электродная контактная машина типа МТМ-316 на базе точечной машины МТ-1928. Этот комплекс по сути дела представляет собой полностью автоматизированный станок по выпуску двухвильевых каркасов для различных диаметров прутков с автоматической подачей и программируемым шагом сварки.

В области дуговой сварки тоже есть немало примеров аналогичных подходов к построению номенклатуры, здесь имели место и модернизация, и дополнение типоря-

дов, и комплексная механизация, и автоматизация как серийного, так и специального оборудования.

Еще один мотив при формировании номенклатуры, который особенно ярко проявляется именно в области дуговой сварки. Известно отставание отечественной дуговой техники в области инверторных источников питания и импульсных регуляторов и связанных с ними технологий сварки, что было обусловлено отставанием отечественной силовой электротехники, а вовсе не отсутствием идей. Наоборот, по большинству реализованных ныне решений можно установить приоритет наших инженеров и ученых. Сейчас, когда мы имеем открытый доступ к любым изделиям мировой силовой электроники, настало время наверстать упущенное.

В настоящее время на заводе принята программа создания инверторных источников питания и импульсных регуляторов. К настоящему моменту разработаны и запущены в производство:

- «Прогресс-130» — инверторный источник для сварки штучным электродом (сварочный ток до 130 А);
- «Прогресс-350» — инверторный источник питания класса ВДУ для аргонодуговой сварки на постоянном токе, сварки штучным электродом и полуавтоматической сварки (сварочный ток до 350 А);
- «ИР-350» — импульсный регулятор для многопостовой сварки штучным электродом (сварочный ток до 350 А);
- «ПРС-501» — пост аргонодуговой сварки на основе импульсного регулятора (сварочный ток до 500 А).

На очереди новые разработки. Завод «Электрик» всегда готов откликнуться на нужды потребителей.

Ю. Е. Иоффе, генеральный директор  
А. Я. Яшунский, главный конструктор

## «УКРСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ» СЕГОДНЯ

ОАО «Укрстальконструкция» является крупнейшей компанией на территории Украины в области организации проектирования и изготовления металлических конструкций для различных отраслей народного хозяйства Украины и ее зарубежных партнеров.

ОАО «Укрстальконструкция» является лидером среди предприятий, занимающихся вопросами производства металлоконструкций первой группы сложности на территории Украины (сосуды, работающие под давлением, котлы, грузоподъемное оборудование, мосты), а также при организации выпуска продукции, к которой предъявляются повышенные требования к надежности и безопасности ее эксплуатации (объекты электроэнергетики).

По состоянию на текущий момент собственные производственные мощности предприятий ОАО «Укрстальконструкция» составляют около 70 тыс. т конструкций в год.

В 2004 г. в ОАО «Укрстальконструкция» разработана и внедрена система управления качеством ISO-9001.

Специалисты ОАО «Укрстальконструкция» располагают уникальными знаниями и опытом по организации изготовления металлоконструкций из низколегированных

и высокопрочных сталей с пределом текучести  $\tau_r = 600$  МПа и выше.

Производство оснащено наряду с хорошо зарекомендовавшим себя в прошлом и современным сварочным оборудованием отечественного и зарубежного производства.

Договорные обязательства как внутренние, так и внешние ОАО «Укрстальконструкция» выполняет качественно и в обусловленные сроки. Претензий и рекламаций от заказчиков организация не имеет.

В 2001–2002 гг. осуществлены работы по поставке металлоконструкций и монтажу каркаса Киевского железнодорожного вокзала «Южный», Храма Георгия Победоносца, изготовлены конструкции Монумента на Площади Незалежности, пешеходного мостика через ул. Институтскую, металлоконструкции выходов на Площадь Незалежности в г. Киеве, конструкции каркаса здания Международного выставочного центра в г. Киеве, опор для канистр временного хранилища отработанного ядерного топлива и металлоконструкции каркаса здания картриджей на Чернобыльской АЭС и другие объекты.

Так, например, в 2003–2005 гг. выполнены работы по организации проектирования, изготовлению конструкций и их монтажу при строительстве резервуарного парка из 11 резервуаров объемом по 20,0 тыс. м<sup>3</sup> каждый Надворнянского НПЗ общим объемом около 6500 т.

В 2003–2004 гг. изготовлены и поставлены на монтаж около 2500 т конструкций крупнейшего в Украине двухстенного резервуара  $V = 75,0$  тыс. м<sup>3</sup> диаметром 80 м. При этом, по нашему предложению, наиболее нагруженные элементы конструкций (окрайки и нижние пояса) общим объемом 1000 т впервые были изготовлены из экономнолегированной стали повышенной прочности класса С-440.

В 2004 г. построен лабораторный корпус фармацевтической фирмы «Дарница» в г. Киеве.

Выполнены работы по изготовлению конструкций и монтажу стеклотарного корпуса стеклозавода в г. Гостомель.

Осуществлено изготовление конструкции и выполнены строительно-монтажные работы по сооружению железно-

дорожной станции «Караваявы Дачи» в г. Киеве (800 тн), а также продолжаются работы по реконструкции Алчевского металлургического комбината, для которого изготовлено и смонтировано в 2004–2005 гг. свыше 20,0 тыс. тн конструкций отделения непрерывного литья заготовок.

В 2005 г. начаты работы по организации производства металлоконструкций для реконструкции металлургического комбината «Азовсталь» с изготовлением трех воздухонагревателей доменных печей, мостового перехода через р. Днепр в г. Запорожье.

По своим возможностям коллектив ОАО «Укрстальконструкция» способен организовать работы по изготовлению и монтажу металлоконструкций различной группы сложности, надежных и полностью отвечающих требованиям нормативно-технической документации, осуществить работы по обследованию технического состояния металлоконструкций действующих объектов, разработать проекты выполнения работ по их ремонту, реконструкции или модернизации, а также их осуществить.

Редакция журнала

## ЗАВОДУ АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ «ДОНМЕТ» — 15 ЛЕТ!

Завод автогенного оборудования «ДОНМЕТ» (г. Краматорск), основанный в 1990 г., на базе собственных запатентованных конструкторских разработок серийно выпускает 52 наименования оборудования для резки, сварки и пайки металлов, а также 15 наименований продукции специального назначения. Продукция с торговой маркой «ДОНМЕТ» хорошо известна как в Украине, так и за ее пределами: в России, Беларуси, Молдове, Казахстане и странах Балтии. Газосварочное оборудование и система управления качеством сертифицированы в системе УкрСЕПРО по ДСТУ ISO 9001–2001, сертификат № UA2.021.433. Испытательная научно-исследовательская лаборатория аккредитована в системе сертификации УкрСЕПРО.

Завод автогенного оборудования «ДОНМЕТ» стал лауреатом конкурса качества продукции «100 лучших товаров Украины 2003» и награжден памятным призом статуэткой и дипломом Государственного комитета Украины по вопросам технического регулирования и потребительской политики за производство качественной продукции. На конкурсе в номинации «Продукция производственно-технического назначения» был представлен резак типа Р I «ДОНМЕТ» 142.

Изданный каталог оборудования «ДОНМЕТ» (2005 г.) для газокислородной резки, пайки и сварки включает перечень основной продукции, выпускаемой заводом, а также запасных частей к ней. Содержит изображение каждого изделия с описанием и технической характеристикой.



Современное высокоточное оборудование и квалифицированные кадры, использование систем автоматизированного проектирования и управления производством позволяют создавать современную конкурентоспособную продукцию, отличающуюся надежностью и экономичностью в эксплуатации. Предприятие гарантирует высокое качество продукции по конкурентным ценам и поставку в кратчайшие сроки.

Подробнее с содержанием каталога можно ознакомиться на сайте фирмы <http://www.donmet.com.ua>

## КАФЕДРЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПАЙКИ ТОЛЬЯТТИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА — 35 ЛЕТ

В 1968 г. на базе Куйбышевского индустриального института был создан Тольяттинский политехнический институт, задачей которого должно было стать обеспечение высококвалифицированными специалистами Поволжья — индустриального региона с большим количеством крупных машиностроительных предприятий союзного значения. Спустя два года в связи с задачами, стоящими перед авиационной, космической, машиностроительной, инструментальной, автомобильной и другими отраслями промышленности, назрела необходимость в создании первой в СССР кафедры пайки металлов и неметаллических материалов. Решение об образовании кафедры технологии и оборудования пайки 18 мая 1970 г. было подписано Министром высшего и среднего специального образования РСФСР В. Н. Столетовым и объявлено приказом ректора Тольяттинского политехнического института А. Н. Резниковым 29 мая 1970 г.

Для организации и заведования кафедрой из Москвы была приглашена доктор технических наук, профессор, ведущий ученый и специалист в области пайки, автор многочисленных научных трудов и монографий С. В. Лашко. Ей по праву принадлежат заслуги по формированию и становлению преподавательского коллектива кафедры в лице Б. Н. Перевезенцева, О. П. Бондарчук, А. М. Соколовой и в более позднее время — А. В. Шашкина и Д. П. Селиванова.

С 1974 по 1999 гг. кафедрой руководил Б. Н. Перевезенцев, в 1999 г. он защитил докторскую диссертацию. Большая заслуга Б. Н. Перевезенцева как руководителя кафедры состояла в обеспечении тесной научно-технической и производственной связи кафедры с ведущими предприятиями Поволжья: НПО «Прогресс», КМПО «Труд», Куйбышевским моторостроительным объединением им. Фрунзе, Куйбышевским авиационным заводом, Долотным заводом, объединением «АвтоВАЗ», Заводом им. Масленникова и многими предприятиями других регионов страны.

В 1999 г. кафедру возглавил профессор А. В. Краснощеков, который унаследовал лучшие традиции предшественников.

За 35 лет кафедра подготовила свыше 700 специалистов по пайке для предприятий Самары, Тольятти, Казани, Москвы и Подмоскovie, Санкт-Петербурга, Воронежа, Нижнего Новгорода, Киева и многих других городов СССР и стран СНГ. Пятнадцать выпускников кафедры за этот период защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, а двое стали докторами технических наук (Б. Н. Перевезенцев и Р. С. Лучкин).

В связи с возрождением в России высокотехнологичных отраслей промышленности в последние годы заметно возрос спрос на специалистов паяльщиков и потребность в создании новых высокоэффективных технологий пайки.

Учебный план кафедры технологии и оборудования пайки сегодня, кроме сварочных дисциплин, предусмат-

ривает изучение таких курсов, как теоретические основы пайки; технология сварки, пайки и склеивания материалов; технология производства паяных конструкций; оборудование и автоматизация процессов пайки; приспособления для сварки и пайки; модернизация и автоматизация проектирования паяных соединений; прочность и надежность паяных соединений. Производственные, технологические и преддипломные практики студенты кафедры проходят непосредственно на предприятиях региона с участием их в отработке и внедрении процессов пайки в сферу изготовления изделий.

Основные научные направления деятельности кафедры — высокотемпературная пайка активных металлов и сплавов. Признание научной общественности и производственников получили результаты многолетних систематических исследований специалистов кафедры в области пайки титановых и комбинированных титано-алюминиевых конструкций (научный руководитель д-р техн. наук Б. Н. Перевезенцев), алюминиевых конструкций (научный руководитель канд. техн. наук Г. П. Уполовникова), нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов (научный руководитель канд. техн. наук Ю. Н. Тюнин), контейнерной пайки (научный руководитель канд. техн. наук А. Ю. Краснопевцев), пайки стекла с металлами (научный руководитель канд. техн. наук Е. И. Лунев), пайки в вакууме запорной арматуры (научный руководитель канд. техн. наук Ю. Н. Уполовников), пайки электросопротивлением алмазного инструмента (научный руководитель канд. техн. наук Г. В. Ревин), нанесения покрытий (научный руководитель д-р техн. наук Б. Н. Перевезенцев) и в других направлениях, востребованных промышленностью.

В канун юбилея кафедры вышел в свет двухтомный сборник избранных докладов, прочитанных на разных научно-технических конференциях по пайке за период 1967–2002 гг. «Пайка: опыт, искусство, наука» (составители В. П. Фролов, В. П. Плаунов, И. Ю. Маркова и И. И. Ильина. — М.: Альфа-Доминанта, 2005. — Т. 1. — 240 с., Т. 2. — 244 с.). В сборнике представлены результаты теоретических, экспериментальных и аналитических исследований и расчетов в области пайки, выполненных в различных организациях СССР, РФ и стран СНГ. Рассмотрены исторические аспекты, проблемные, теоретические и прикладные задачи, связанные с разработкой и созданием паяных соединений при производстве и ремонте гражданской и специальной техники.

В первом томе сборника в разделе «История развития и проблемы пайки» приведены интересные в историческом и научном плане статьи С. Н. Лоцманова, В. П. Фролова, И. Ю. Марковой, С. В. Лашко, Г. А. Николаева, И. Е. Петрунина, И. Л. Чекунова, А. Я. Куфайкина и других, в которых рассматриваются состояние, достижения, проблемы современного этапа развития и перспективы будущего пайки. В этом же разделе помещены три статьи о научно-педагогической деятельности С. Н. Лоцманова,

талантливого ученого и воспитателя молодежи, основателя научной школы паяльщиков в области производства и ремонта аэрокосмической техники.

Во втором разделе сборника, посвященном теории пайки, приведены результаты теоретических исследований различных видов пайки, включая кинетику процесса, активирование поверхности и термический цикл пайки. Заслуживают внимания включенные в сборник статьи Ю. В. Найдича, В. С. Журавлева, Б. Д. Костюка «Смачивание и пайка нитридо-кремниевыми металлическими расплавами» и В. Ф. Хорунова, В. С. Кучука-Яценко, В. И. Швеца, О. М. Сабадаша «Пайка дисперсно-упрочненных (частицами Si и C) композиционных материалов», в которой предложена технология пайки комбинированного корпуса двигателя внутреннего сгорания с повышенным ресурсом работы.

Третья глава содержит работы по припоям, паяльным пастам и технологическим материалам, по созданию материалов для пайки различных изделий и конструкций, а также даны рекомендации по повышению их технологических свойств. В статье В. Ф. Хорунова, О. М. Сабадаша, А. А. Андрейко «Высокотемпературная пайка алюминия с использованием флюса системы K,Al,Si/F» показаны перспективы использования флюсов ФАФ 540 и ФАФ 550, порошкового припоя ПАК-12П, порошковой измельченной ленты ППА-12 для пайки большой номенклатуры алюминиевых изделий различного назначения.

Во втором томе сборника в главе «Технология и оборудование» приведены результаты разработки технологии

и специального оборудования для пайки различных изделий из металлов и сплавов, в том числе создания неразъемных соединений в современном двигателестроении, а также при ремонте горячего тракта гидротурбинных двигателей. В статье В. Ф. Хорунова, С. В. Максимовой, И. В. Зволинского и др. «Пайка нержавеющей сталей серебряными припоями без никелевого покрытия» приведены результаты разработки специального припоя, позволяющего осуществлять пайку нержавеющей стали в аргоне без никелевого покрытия и обеспечивающего снижение затрат на выполнение технологического процесса при одновременном повышении стабильности и качества паяных соединений.

В пятой главе сборника рассматриваются пути повышения качества, надежности и свойств паяных соединений. В статье С. В. Максимовой, В. Ф. Хорунова, В. А. Шонина «Сопротивление усталости паяных соединений из меди и сплавов» даны результаты проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона исследований бессеребряных припоев на меднофосфорной основе (ПМ90 и ПМ90Ц), которые обеспечивают хорошую работоспособность паяных соединений из меди для холодильного и теплообменного оборудования при циклических нагрузках.

В шестой–восьмой главах содержатся материалы по разработке САПР и применению ЭВМ в области пайки, организации работ, экономике, стандартизации, экологии, патентовании, лицензировании, что будет интересно для специалистов в области пайки и может быть использовано в практической работе.

А. М. Жадкевич, инж.

## ОТДЕЛУ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА — 20 ЛЕТ

1 ноября 1985 г. в Институте электросварки им. Е.О.Патона был создан структурный базовый отдел защитных покрытий. В качестве основной тематики отдела была предусмотрена разработка материалов для нанесения покрытий и технологии их нанесения методами газотермического напыления (электродуговым, газопламенным, плазменным, детонационным, лазерным). В соответствии с этим были установлены следующие основные научные направления отдела:

- разработка высокоэффективных технологических процессов и промышленных технологий нанесения защитных покрытий электродуговым, газопламенным, плазменным, детонационным, лазерным методами и способов повышения их качества;

- разработка материалов для нанесения газотермических покрытий с композиционной, аморфной и микрокристаллической структурой с заданными свойствами, оборудование и технологии их получения.

За прошедшие 20 лет отдел выполнил целый ряд работ в области теории и практики газотермического напыления, создания новых процессов и оборудования для их проведения, новых материалов для газотермического напыления, полученные результаты находили практическое применение в различных отраслях промышленности.

Примером фундаментальных разработок, выполненных коллективом отдела, служит математическая модель формирования аморфного состояния в газотермическом покрытии. На ее основе впервые были развиты технологические основы напыления аморфизированных покрытий, выбраны составы материалов для напыления таких покрытий в виде порошков, порошковых проволок и гибких шнуров серии «АМОТЕК», разработаны технологические условия их производства.

Разработанная совместно с отделом физики газового разряда и техники плазмы компьютерная модель плазменного напыления CASPSP впервые объединила условия работы плазматрона и формирование плазменной струи с процессами движения и нагрева частиц напыляемого материала. CASPSP получила широкое признание среди специалистов по газотермическому напылению за рубежом.

К достижениям отдела в части разработки покрытий с новыми типами структур относится также развитие технологии нанесения газотермических покрытий с квазикристаллической структурой, обладающих необычными свойствами, присущими таким металлическим сплавам, в частности низкой теплопроводностью.

На протяжении этих лет в отделе получили развитие новые оригинальные процессы газотермического напыления с разработкой оборудования для их реализации такие, как сверхзвуковое воздушно-газовое плазменное

напыление (установка «Киев-С»), микроплазменное напыление (установки МПН-003, МПН-004), а также процесс плазменно-детонационного упрочнения поверхности.

В процессе выполнения технологических разработок отделом созданы покрытия для защиты от износа поршневых колец, деталей и узлов теплоэлектростанций; теплозащитные покрытия поршней ДВС; каталитические покрытия для систем очистки воды и выхлопных газов двигателей; покрытия для замены гальванических хромовых и кадмиевых покрытий, для защиты графитовых электродов сталеплавильных печей и др.

В настоящее время одним из основных направлений отдела является разработка покрытий медицинского назначения. С использованием разработанного оборудования микроплазменного напыления была создана оригинальная технология напыления биокерамических и титановых покрытий на эндопротезы и другие изделия, которая отличается высокой экономичностью (малое потребление энергии, снижение потери напыляемого материала). Развитие этой технологии и расширение ее применения ведется в рамках Европейской программы КРАФТ по проекту «МикроСпрейМед» с участием 12 организаций и фирм Испании, Германии, Нидерландов, Франции, Великобритании и Греции.

Существенный вклад коллектив отдела внес в практическое применение газотермического напыления в промышленности. Разработанный пакет руководящих технических материалов, охватывающий основные разновидности газотермического напыления (газоплазменное, плазменное, детонационное), и все этапы технологического процесса получили широкое распространение среди специалистов в СССР, а затем в странах СНГ и послужили основой для разработки и освоения практических технологий разными предприятиями и организациями.

Сотрудниками отдела был создан ряд участков газотермического напыления, в том числе, Центр газотермического напыления при ПО «Югрыбсудоремонт» для восстановления и упрочнения судовой техники, г. Севастополь; участки газотермического напыления в НПО «Маяк», г. Киев; Управление нефтепровода «Дружба», г. Ровно; Ольшанском РТП, Черкасская обл., на ПО «Лакокраска», г. Лида, Беларусь и др., где результаты разработок отдела реализовались на практике с целью упрочнения и восстановления различных деталей и узлов оборудования.

Под руководством сотрудников отдела были проведены работы по нанесению антикоррозионных покрытий на металлоконструкции телевизионной башни в г. Киеве.

По лицензионным соглашениям поставлено оборудование и технология детонационного напыления «Перун» в Россию, Эстонию, Финляндию, Литву, Чехословакию. Оборудование микроплазменного напыления поставлено в Германию, США, Испанию, Индию, Тайвань.

Отдел активно участвовал в международном сотрудничестве в области газотермического напыления. В конце 1980-х годов ему была поручена роль координатора среди организаций стран-членов СЭВ при выполнении программы 4.3.6 «Применение плазменных вакуумных и детонационных технологий нанесения упрочняющих износостойких и антикоррозионных покрытий» (СССР, Чехословакия, Польша, ГДР, Венгрия, Куба). Отдел участвовал в программах межгосударственного научно-технического сотрудничества с Финляндией и Нидерландами, выполнял ряд проектов в рамках европейских программ ИНТАС и КОСТ.

Осуществляется постоянное сотрудничество с ведущими организациями в области газотермического напыления России (ВНИИАвтогенмаш), Беларуси (БРНПО порошковой металлургии).

В период 1985–2005 гг. сотрудниками отдела успешно защищено 11 кандидатских и 3 докторских диссертации (Ю. Н. Тюрин, В. Н. Коржик, Е. А. Астахов), опубликовано более 300 статей, 3 монографии («Плазменные порошковые покрытия», «Газотермические покрытия из порошковых материалов», «Некристаллические материалы и покрытия») и 2 учебника («Фізико-хімічні основи інженерії поверхні», «Нанесення покриття»), выпущено 10 различных брошюр и репринтов, получено 55 авторских свидетельств и патентов.

В настоящее время усилия отдела направлены на дальнейшие разработки новых типов покрытий, в частности с нанокompозитной структурой, развитие новых процессов газотермического напыления таких, как гибридный лазерно-дуговой, позволяющих объединить газотермическое напыление с газофазным синтезом материала покрытия; напыление покрытий с использованием суспензий и жидких прекурсоров.

Успешная работа отдела связана с поддержанием тесного взаимодействия и плодотворного сотрудничества с другими отделами института такими, как отдел физико-химических исследований материалов, физики газового разряда и техники плазмы и др.

Редакция журнала