



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, В. Н. Замков,
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, Ю. А. Стеренбоген,
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) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

Е. Н. Казарова, В. И. Котляр, Т. В. Юштина.
Электронная верстка:
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова,
И. В. Петушков, Т. Ю. Снегирева.

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов ссылка
на журнал обязательна.

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности
не несет.

Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ

Славный юбилей	3
Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций	7
Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Шумицкий О. И. Пятьдесят лет мосту им. Е. О. Патона	14
Семенов Ю. П. Космические технологии на рубеже веков: итоги и перспективы	23
Олсон Д. Л., Метцбауэр Э., Лиу С., Парк И. Д. Прогнозирование свойств металла шва повышенной прочности	32
Лякишев Н. П., Николаев А. В. Металлургия стали: особенности производства в XX в., проблемы и прогноз дальнейшего развития	40
Хофе фон Д., Шамбах Б. Новый стандарт ISO 3834: требования к качеству сварки плавлением и контактной сварки металлических материалов	48
Горынин И. В., Ильин А. В., Баранов А. В., Леонов В. П. Проблемы обеспечения прочности и ресурса морских ледостойких стационарных платформ шельфа Арктики	52
Кидзи Н., Кобаяси К., Исии Д., Ямаока Х. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение	59
Алешин Н. П. Новые информационные системы неразрушающего контроля и диагностики сварных конструкций	64
Пилярчик Я., Банасик М. Технологическое применение электронного и лазерного пучков	70
Гао Х., Ву Л., Донг Х. Исследование механизма проплавления при двухсторонней сварке ТИГ	77
Белоев М., Хартунг Ф., Лолов Н., Александров Б. Влияние структуры и фазового состава на коррозионную стойкость сварных соединений дуплексных нержавеющей сталей	82
Фролов К. В., Махутов Н. А., Гаденин М. М. Определение прочности, ресурса и живучести конструкций	89
Мэддокс С. Дж. Совершенствование правил расчета на усталость сварных конструкций	97
Панасюк В. В., Дмитрах І. М. Оцінка корозійно-втомної міцності зварних з'єднань як гетерогенних систем	105
Махненко В. И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации	112
Хоббахер А. Ф. Расчет на усталость сварных конструкций по напряжениям в зоне концентратора	122
Миллер К. Дж. Разрушение сварных алюминиевых труб	127
Зубченко А. С., Васильченко Г. С., Овчинников А. В. Прогноз разрушения сварных соединений пластичных сталей при наличии дефектов	133
Такано Г., Камо К. Полная автоматизация сварки сосудов и труб	138
Ларионов В. П., Слепцов О. И., Лепов В. В., Яковлева С. П. Исследования низкотемпературной прочности материалов и их сварных соединений для решения проблем российского Севера	145
Дилтай У., Штайн Л., Вёсте К., Райх Ф. Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий	151
Дехелян Д., Маркошан Н. Изготовление изделий из тугоплавких металлов способом газотермического напыления	158
Горбач В. Д., Соколов О. Г., Михайлов В. С. Современные проблемы сварки и долговечности сварных судостроительных конструкций	163
Кучук-Яценко С. И. Новые разработки технологий и оборудования для контактной сварки трубопроводов	170
Когурэ Х., Фудзита Ю. Системы аттестации и сертификации сварочного персонала в Японии	178
Герольд Г., Зинке М., Карпенко М. Перспективы применения гибридной сварки сплавов на основе никеля	183
Брукнер Й. Дуговая сварка стали с алюминием	185
Патон Б. Е., Медовар Л. Б. Новые электрошлаковые технологии и материалы	188
Шелег В. К., Рагунович С. П., Торпачев С. П. К вопросу об использовании акустического поля процесса сварки как фактора управления и диагностики качества сварного соединения	194
Окамото К., Хирано С., Инагаки М., Парк С. Х. К., Саго Ю. С., Кокава Х. Металлургические особенности и механические свойства соединений нержавеющей сталей, выполненных сваркой трением с перемешиванием	197
Усйо М., Сугитани Ю. Разработка высокопроизводительных комплексов для дуговой сварки в Японии	204

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, V. N. Zamkov,
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, Yu. A. Sterenbogen,
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. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
T. Eagar (USA)
K. Inoue (Japan)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
J. 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) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
T. V. Yushkina,
Electron galley:
I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, T. Yu. Snegiryova.

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

CURRENT PROBLEMS IN WELDING AND LIFE OF STRUCTURES

Glorious jubilee	3
Paton B. E. Current trends in research and developments in the field of welding and strength of structures	7
Lobanov L. M., Kiryan V. I., Shumitsky O. I. E. O. Paton bridge is 50	14
Semyonov Yu. P. Space technologies at the transition of centuries: results and prospects	23
Olson D. L., Metzbower E., Liu S., Park I. D. Developments in property predictions for weld metal	32
Lyakishev N. P., Nikolaev A. V. Metallurgy of steel: specifics of production in the XX century, problems and prediction of future development	40
Hofe D. von, Schambach B. The new ISO 3834 — Quality requirements for fusion and resistance welding of metallic materials	48
Gorynin I. V., Ijin A. V., Baranov A. V., Leonov V. P. Problems of assurance of strength and service life of sea ice-resistant stationary platforms of Arctic shelf	52
Kiji N., Kobayashi K., Ishii J., Yamaoka H. Development of high-efficiency arc welding methods and their application	59
Alyoshin N. P. New information system of non-destructive testing and diagnostics of welded structures	64
Pilarczyk J., Banasik M. Technological applications of electron and laser beam	70
Gao H., Wu L., Dong H. Preliminary study of penetration mechanism of double-sided GTAW process	77
Beloev M., Hartung F., Lolov N., Alexandrov B. Structure and corrosion resistance of welded joints of duplex stainless steel	82
Frolov K. V., Makhutov N. A., Gadenin M. M. Determination of strength, service life and survivability of structures	89
Maddox S. J. Review of fatigue design rules for welded structures	97
Panasyuk V. V., Dmitrakh I. M. Evaluation of corrosion-fatigue strength of welded joints as heterogeneous systems	105
Makhnenko V. I. Improvement of methods for evaluating residual life of welded joints in durable structures	112
Hobbacher A. F. Effective method of determination of stresses in notched specimens as compared with other methods of calculation of fatigue of welded joints	122
Miller K. J. The failure of welded aluminium tubes	127
Zubchenko A. S., Vasilchenko G. S., Ovchinnikov A. V. Problems of prediction of fracture of ductile steel welded joints having defects	133
Takano G., Kamo K. Development of fully automatic welding technique for vessel and pipe	138
Larionov V. P., Sleptsov O. I., Lepov V. V., Yakovleva S. P. Investigation of lowtemperature strength of materials and their welded joints to handle the problems of the Russian North	145
Dilthey U., Stein L., Woste K., Reich F. Latest developments and trends in high-efficient welding technologies	151
Dehelean D., Markocsan N. Rapid fabrication of refractory components by thermal spraying	158
Gorbach V. D., Sokolov O. G., Mikhailov V. S. Current problems in welding and life of welded shipbuilding structures	163
Kuchuk-Yatsenko S. I. New developments of technologies and equipment for flash-butt welding of pipelines	170
Kogure H., Fujita Y. Review of qualification and certification system for welding personnel in Japan	178
Herold H., Zinke M., Karpenko M. Application of modern hybrid welding technology for welding of high corrosion-resistant Ni-base alloys in environmental technology	183
Bruckner J. Arc joining of steel with aluminium	185
Paton B. E., Medovar L. B. New electroslag technologies and new materials	188
Sheleg V. K., Ragunovich S. P., Torpachev S. P. Towards the use of acoustic field of welding process as a factor of control and diagnostics of welded joint quality	194
Okamoto K., Hirano S., Inagaki M., Park S. H. C., Sato Y. S., Kokawa H. Feasibility study of metallurgical and mechanical properties of friction stir welded stainless steels	197
Ushio M., Sugitani Y. Recent development of high efficiency arc welding system in Japan	204

*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.*

СЛАВНЫЙ ЮБИЛЕЙ

Сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона сердечно поздравляют своего руководителя, выдающегося ученого в области электросварки, металлургии и технологии металлов, с 85-летием со дня рождения и 50-летием его деятельности на посту директора института. Борис Евгеньевич достойно продолжил и развил дело своего отца, основателя института — академика Евгения Оскаровича Патона, превратив институт в широко известный в мире научно-технический центр сварки и родственных технологий. Многочисленные технологии, разработанные в институте, нашли широкое применение не только в Украине, но и в разных странах мира.

Много сделал Борис Евгеньевич и для укрепления Национальной академии наук Украины, президентом которой он бессменно является с 1962 г. За прошедшие годы академия получила мощное развитие и стала авторитетным учреждением в самых различных областях современной науки.


Борис Евгеньевич проявил себя как талантливый исследователь и незаурядный организатор, способный управлять исследовательской работой больших коллективов. Для него главное — достижение весомых результатов по наиболее актуальным направлениям исследований и разработок. Он никогда не подчеркивает свою роль и стремится выдвигать талантливых и инициативных сотрудников, увлекая их новыми идеями. Такой стиль работы руководителя создает идеальные условия для продуктивного творчества и утверждения здорового климата в коллективе.

Свою научно-техническую деятельность Борис Евгеньевич начал во время Великой Отечественной войны в Институте электросварки, который активно включился в работу на нужды оборонной промышленности в Нижнем Тагиле на Уралвагонзаводе, где изготовлялись знаменитые танки Т-34. Там он начал исследования автоматического регулирования процессов сварки с непрерывной подачей в зону дуги присадочных материалов. В результате были определены основные требования к статическим и динамическим характеристикам приводов систем автоматического регулирования, положенные в основу при создании первого поколения полуавтоматов, использующих тонкую электродную проволоку в сочетании с защитными флюсами и газами. Позже Борис Евгеньевич занялся изучением физических процессов в дуге, определяющих перенос сварочного материала в расплавленную ванну с целью поиска способов снижения разбрызгивания. Им установлено существенное влияние на этот процесс внешних характеристик источников питания, в частности, показана целесообразность использования для полуавтоматической и автоматической сварки источников с жесткой внешней характеристикой. Эти результаты исследований стали основой для разработки способов сварки в углекислом газе и смесях газов, импульсно-дуговой сварки, которые до настоящего времени доминируют в технологических процессах сварочного производства. Первые работы Б. Е. Патона по сути стали научной основой для создания современной сварочной техники.

Занимаясь сварными мостами, Евгений Оскарович мечтал о способе механизированной сварки швов в различных пространственных положениях. Такой способ сварки с принудительным формированием металла был создан при участии Бориса Евгеньевича и первоначально применен на строительстве в Киеве моста, который носит имя Евгения Оскаровича Патона.

При выборе тематики для научных исследований Б. Е. Патон часто ориентируется на нужды той или иной отрасли с тем, чтобы результаты работы в дальнейшем нашли эффективное практическое применение. Так, он пришел к выводу, что развитие ряда отраслей машиностроения в Советском Союзе сдерживается отсутствием приемлемой технологии изготовления крупногабаритного оборудования. Для решения этой крупной научно-технической задачи необходимо было разработать дешевый и достаточно простой способ сварки толстостенных деталей. Выход был найден — создана технология электрошлаковой сварки, которая стала использоваться при изготовлении мощных гидротурбин, прессов, химических реакторов и других уникальных изделий.

Изучение различных способов сварки как объектов управления впервые было определено Борисом Евгеньевичем как одно из наиболее важных направлений в теории сварочных процессов и благодаря этому стало предметом исследований многих специалистов. Кроме проблем управления дуговой и электрошлаковой сваркой, он также занимался электро-



техническими методами совершенствования различных сварочных процессов. Значительный вклад Б. Е. Патон внес в развитие контактной стыковой и точечной сварки, где системы автоматического управления процессом являются ключевыми, определяющими технологические показатели и надежность сварочного оборудования. Под его руководством созданы поколения уникальных машин для контактной стыковой сварки деталей с большими поперечными сечениями из высокопрочных сталей и сплавов, в частности, для сварки узлов из высокопрочных алюминиевых сплавов, используемых в ракетно-космической технике и авиации, магистральных трубопроводов. Это оборудование применяется в различных отраслях промышленности и не имеет аналогов в мировой практике. Несомненен вклад Б. Е. Патона в изучение физических основ электронно-лучевой, микроплазменной сварки и в создание современного оборудования для этих способов.

Борис Евгеньевич Патон первым предложил применить сварку в космосе. Его идеи, горячо поддержанные С. П. Королевым в середине 1960-х годов, положили начало исследованиям в этой перспективной области современной техники, показавшим возможность строительства и последующей эксплуатации крупных обитаемых сооружений в космосе. Для первого эксперимента по сварке в космосе был создан при непосредственном участии и под руководством Бориса Евгеньевича специальный исследовательский аппарат «Вулкан». В ходе экспериментов в космосе в 1969 г. показана перспективность применения электронного пучка для сварки, резки, пайки и напыления металлических материалов в космических условиях. Создан и проверен в открытом космосе в 1984 г. космонавтами В. Джанибековым и С. Савицкой ручной универсальный аппарат «Универсал», пригодный для выполнения перечисленных технологических процессов. Значительно позже начались исследования сварки в космосе в США, Японии и Германии.

По инициативе Бориса Евгеньевича в институте были развернуты работы по сварке под водой, для чего создана и оборудована специальная лаборатория, в которой при различных давлениях можно производить подводную дуговую сварку. В результате разработаны самозащитная порошковая проволока и полуавтомат для сварки под водой при достаточно высоком давлении.

Борис Евгеньевич придавал большое значение сварке и резке взрывом. По его инициативе и с его участием был создан специальный полигон, на котором можно выполнять сварку и резку металла кумулятивными зарядами, а также организовано производство партий зарядов для сварки и резки в особых условиях, например, под водой.

Невозможно перечислить все направления исследовательской и изобретательской деятельности Бориса Евгеньевича, ставшие за полвека основой эффективной работы руководимого им большого научно-технического коллектива.

Из оригинальных исследований последних лет следует отметить работы, связанные с применением сварки в медицине. В первую очередь речь идет о соединении разрезов различных живых мягких тканей вместо сшивания их нитками. Доказано, что электрическая сварка токами высокой частоты в данном случае возможна и имеет преимущества по многим показателям по сравнению с традиционным способом сшивания. Созданы образцы оборудования с устройствами управления, обеспечивающими обратную связь с процессом образования соединения. Киевскими хирургами с помощью новой техники уже прооперировано с положительными результатами более тысячи больных. Есть все основания полагать, что сварка живых мягких тканей со временем станет применяться во многих клиниках как эффективная хирургическая технология.

Б. Е. Патон — генератор новых идей, у него исключительное чутье на все новое, что появляется в смежных областях науки и техники и может быть использовано в сварке. Он был инициатором использования плазмы и лучевых источников нагрева (электронный луч, лазер) для сварки. Благодаря его настойчивой поддержке электронно-лучевая сварка получила в нашей стране широкое применение с первых лет появления этого источника нагрева. Сейчас Борис Евгеньевич уделяет особое внимание поиску новых областей применения лазера и гибридных процессов.

Бориса Евгеньевича по праву можно считать основателем ряда новых специальных металлургических технологий. Металл сварного шва, прошедшего электрошлаковую обработку, как оказалось, обладает более высокими физическими свойствами, чем металл, полученный при обычных способах выплавки. Глубокое изучение этого явления увенчалось созданием технологии электрошлаковой металлургии. Созданы специальные цеха про-

изводительностью в тысячи тонн металла в год, идущего на изготовление изделий ответственного назначения. Работы Бориса Евгеньевича и его сотрудников в этой области были признаны во многих странах, в том числе США, Германии, Франции, Японии и др.

В основу других специальных электрометаллургических процессов производства сталей положены плазменная и электронно-лучевая сварка, для применения которых определены области, в которых они наиболее эффективны и полезны. В частности, удалось создать электронно-лучевую технологию получения композиционных материалов из металлов, не смешивающихся в расплавленном состоянии. Эта технология получила название парофазной благодаря тому, что образование конечного продукта получается осаждением паров и кристаллизацией их на подложке без образования жидкой ванны. Надо полагать, что эта новая технология найдет свое место в будущем.


По инициативе Бориса Евгеньевича в институте с начала 1980-х годов развернулись исследования по различным способам напыления покрытий. Результатом этих исследований стало совершенствование плазменных и газопламенных процессов напыления, разработка присадочных материалов, обеспечивающих получение покрытий с особыми высокими эксплуатационными свойствами. Работы в этом направлении успешно продолжаются. В связи с исчерпанием расчетного срока эксплуатации магистральных трубопроводов, реакторов (в том числе атомных), железнодорожных мостов, резервуаров большой емкости и других ответственных конструкций и сооружений особую важность приобрели техническая диагностика и неразрушающие методы контроля качества. Борис Евгеньевич принимает участие в разработке методов и средств для этой цели, а также методик оценки работоспособности ответственных изделий, продолжительное время бывших в эксплуатации. Он проводит огромную работу по координации программ и мероприятий, направленных на определение технического состояния и продление ресурса объектов повышенной опасности, являясь председателем Межведомственной комиссии по вопросам научно-технической безопасности при Совете Национальной безопасности и обороны Украины и Председателем научно-координационного и экспертного Совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин при президиуме Национальной академии наук Украины.

В 1958 г. по решению правительства ИЭС им. Е. О. Патона стал головной научно-исследовательской организацией по сварке в СССР. Борис Евгеньевич возглавил созданные при институте Координационный и Научный советы, в которые вошли наиболее авторитетные ученые и специалисты в области сварки. Наряду с координацией исследований и конструкторских разработок, головной институт разрабатывал и координировал выполнение утверждаемых правительством комплексных программ развития сварочной науки, техники и материально-технической базы сварочного производства в СССР. Переоценить деятельность в этом направлении Бориса Евгеньевича Патона просто невозможно — сварочное производство, наука и техника приобрели необходимый динамизм и по некоторым показателям превосходили мировой уровень.

Может создаться впечатление, что одному человеку, каким бы талантливым он не был, не под силу решение такого множества проблем, лишь отчасти перечисленных выше. Но это впечатление ошибочно. Бориса Евгеньевича отличает способность в каждой задаче увидеть главное, четко и ясно наметить пути ее решения, увлечь своих сотрудников настолько, насколько она волнует его самого. Борис Евгеньевич проявляет истинную страсть в поиске проблем, где бы он и его коллектив были бы полезны. Он автор многих патентов и уделяет большое внимание изобретательской деятельности. Многие изобретения рождались в его кабинете во время совещаний и обсуждений актуальных проблем в области сварки.

Сегодня институт, как и другие научно-исследовательские учреждения, переживает тяжелый переходный период, однако благодаря усилиям Бориса Евгеньевича он сохранился и активно работает. Неизменными остались традиции, продолжают плодотворно трудиться основные научные кадры. В последние годы на базе института возникли хозяйственные подразделения, занимающиеся совершенствованием разработок в соответствии с нуждами заказчиков, продвижением разработок института в промышленность и строительство. С их участием создан Научно-технический комплекс ИЭС им. Е. О. Патона.

Бесспорна огромная роль Бориса Евгеньевича Патона в организации работы Национальной академии наук Украины. Основную задачу он видит в сохранении в деятельном состоянии ее научных учреждений, кадрового состава, воспитании нового поколения ученых и по



возможности создания условий для их работы. При весьма ограниченном финансировании сделать все это трудно, но необходимо. Сотрудники академии наук, как и раньше, рассчитывают на энергию и боевой настрой Бориса Евгеньевича, необходимые для преодоления временных трудностей.

Б. Е. Патон является горячим поборником сохранения и укрепления творческих связей и деловых контактов между учеными и производственниками разных стран, развивает такие новые формы научно-технического сотрудничества, как комплексная реализация международных программ, организация совместных лабораторий и предприятий, широкий обмен информацией. Так, ИЭС им. Е. О. Патона является членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации.

Б. Е. Патон — член Международного комитета по научно-технологическому развитию стран СНГ, возглавляет Межгосударственный совет по сварке и родственным технологиям, является председателем Координационного совета межгосударственной программы «Высоконадежный трубопроводный транспорт», членом правления Международной топливно-энергетической ассоциации и членом попечительского совета Международного фонда ядерной безопасности.

О диапазоне международной и общественной деятельности Б. Е. Патона свидетельствует то, что он является Президентом Международной ассоциации академий наук, почетным Президентом Международной инженерной академии, членом Европейской академии и Международной академии технологических наук, почетным членом Международной академии наук, образования, индустрии и искусства, Международной академии астронавтики, Римского клуба, почетным доктором ряда крупнейших университетов и иностранным членом академий наук и научно-технических обществ многих стран.

Б. Е. Патон — лауреат Ленинской и Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки и техники УССР, заслуженный изобретатель СССР, дважды Герой Социалистического Труда, Герой Украины; среди его наград — ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, «За заслуги перед Отечеством», орден Князя Ярослава Мудрого и другие отечественные и зарубежные ордена и медали.

Он удостоен многочисленных научных наград и дипломов, среди которых золотая медаль М. В. Ломоносова АН СССР, золотая медаль Л. Лозанна Ассоциации металлургов Италии, медаль акад. С. И. Вавилова АН СССР, золотая медаль им. В. Г. Шухова Союза инженеров и научно-технических обществ России, золотая медаль Всемирной организации интеллектуальной собственности, премия им. В. Вернадского Фонда интеллектуального сотрудничества «Украина — XXI век» и др.

Мы счастливы, что Борис Евгеньевич Патон полон сил, энергии, творческих замыслов и искренне желаем ему новых замечательных достижений в его многогранной титанической деятельности на благо науки и крепкого здоровья.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия журнала



СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СВАРКИ И ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Академик **Б. Е. ПАТОН** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен ряд разработок, выполненных в последние годы ИЭС им. Е. О. Патона. В частности, гибридные способы сварки, активация процессов в сварочной ванне микродозами химических элементов, электродуговая сварка закладным электродом, установки для контактной и электронно-лучевой сварки, новые припои и флюс для пайки, разработанные новые конструкционные материалы. Отмечено, что существенно возросла доля конструкций сооружений и оборудования, приближающихся к своему критическому возрасту. В этой связи актуальной является проблема достоверной оценки остаточного ресурса конструкций с привлечением средств неразрушающего контроля и технической диагностики. Рассмотрены технология и инструмент для сварки живых тканей.

Ключевые слова: сварные конструкции, новые процессы сварки, гибридная сварка, активация, контактная сварка, электронно-лучевая сварка и переплав, пайка, титан, остаточный ресурс, техническая диагностика, акустическая эмиссия, ширография, сварка живых тканей

Непрерывный рост наукоемкости сварочного производства способствует повышению качества продукции, ее эффективности и конкурентоспособности. Сегодня сварка применяется для неразъемного соединения широчайшей гаммы металлических, неметаллических и композиционных конструкционных материалов в обычных условиях земной атмосферы, Мировом океане и космосе. Объемы производства сварных конструкций во всем мире составляют сотни миллионов тонн.

Несмотря на непрерывно увеличивающееся применение в сварных конструкциях и изделиях легких сплавов, полимерных материалов, композитов, основным конструкционным материалом по-прежнему остается сталь. Мировые производители реально опровергли прогнозы футурологов о замене стали альтернативными материалами. Металлурги пока уверенно выигрывают конкурентную борьбу на рынке конструкционных материалов благодаря созданию и выпуску новых марок сталей (в первую очередь высокопрочных) и революционному изменению производственных процессов. Мировое производство и потребление стали, несмотря на отдельные спады, неуклонно растет. Так, если в

1995 г. было произведено 750 млн т, то по прогнозу Международного института стали к 2005 г. мировое производство стали превысит 900 млн т.

Известно, что до 70 % мирового потребления металлопроката приходится на производство сварных изделий, конструкций и сооружений. Это обусловлено тем, что сварные металлоконструкции благодаря хорошей способности к рециклингу сохраняют перспективы для широкого применения в ближайшем будущем. Отмеченные особенности определяют общую положительную тенденцию роста мирового производства сварных конструкций, динамичного развития мирового и региональных рынков сварочной техники, а также объемов научных исследований и разработок по совершенствованию сварки и родственных технологий.

Широкий комплекс работ в области сварки и прочности конструкций выполняет Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В последние годы сформировалось новое направление в создании наукоемких технологий — гибридные способы сварки. Предложен новый способ сварки алюминиевых сплавов малых толщин, заключающийся в одновременном использовании лазерного пучка и микроплазменной дуги, горящей в режиме разнополярных импульсов тока. Совместное воздействие на металл двух источников тепла дает возможность существенно повысить эффективность использования энергии каждого из

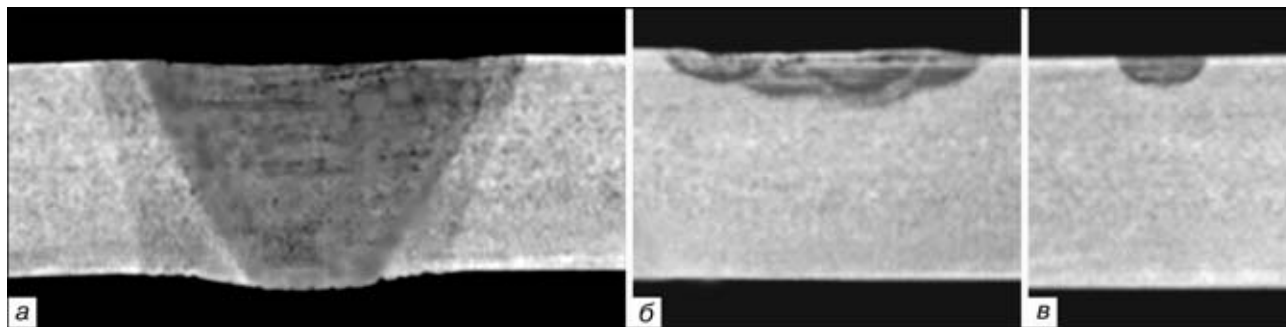


Рис. 1. Проплавление металла при гибридной (а), микроплазменной (б) и лазерной (в) сварке алюминиевого сплава АМгЗ



Рис. 2. Стыковое соединение рельсов из стали типа Р-65, выполненное электродуговой сваркой закладным электродом

них. В результате эффективность использования мощности микроплазменной дуги может возрастать с 50 (при обычной микроплазменной сварке) до 75 % (в гибридном процессе).

При гибридной сварке без присадки алюминиевого сплава АМг3 толщиной 3 мм и скорости 0,25 м/мин полное проплавление образца достигается при мощности лазера 1,2 кВт и токе дуги 35 А. Глубина проплавления при микроплазменной и лазерной сварке на тех же режимах составляет соответственно 0,7 и 0,4 мм. Площадь поперечного сечения шва при гибридной сварке в 4 раза превосходит сумму соответствующих площадей при лазерной и микроплазменной сварке (рис. 1).

Одним из перспективных направлений развития сварки является активация микродозами химических элементов и их соединений процессов в сварочной ванне и дуге, горящей в инертных газах. Достигнутый уровень понимания природы явления активации в настоящее время позволяет использовать его для повышения эффективности и со-

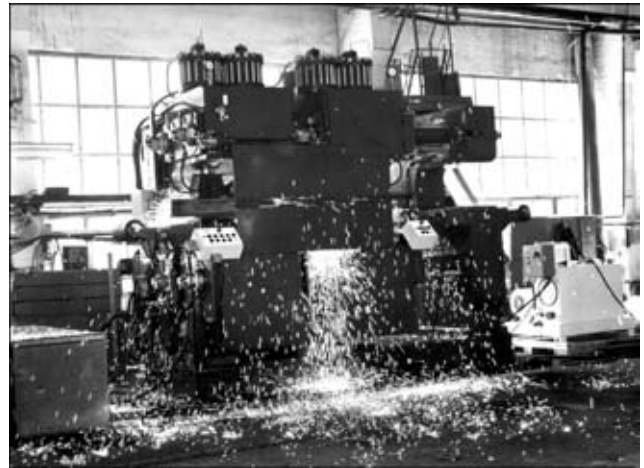


Рис. 3. Машина для контактной сварки рельсов железнодорожных крестовин

вершенствования плазменной и дуговой сварки плавящимся электродом. Исследования показали, что глубина проплавления при этом возрастает соответственно в 2 и 4 раза, т. е. активация создает предпосылки для осуществления сварки в инертных газах на пониженных погонных энергиях.

Для соединения деталей больших толщин разработан новый процесс электродуговой сварки с использованием специального закладного электрода, предварительно введенного в узкий зазор между свариваемыми деталями и покрытого тонким слоем (около 1 мм) изолирующего покрытия. Сварку выполняют в вертикальном положении за один проход. При этом не требуется применения устройств, обеспечивающих перемещение электрической дуги. Последняя движется самостоятельно по торцу плоского электрода в пределах всей ширины зазора, обеспечивая необходимое проплавление кромок. На рис. 2 показан стык на рельсах, выполненный этим способом. Сварка закладным электродом выполняется в автоматическом режиме, по сравнению с другими способами сварки толстого металла она имеет ряд преимуществ, в частности, возможность сварки в монтажных условиях и труднодоступных местах с обеспечением высокой производительности.

Контактная сварка оплавлением относится к числу наиболее эффективных способов соединения металлов. Это направление продолжает успешно развиваться и его возможности далеко не исчерпаны. Разработана новая разновидность способа сварки непрерывным оплавлением, получившая название сварки пульсирующим оплавлением. Этот процесс, запатентованный в ведущих странах мира, позволяет значительно улучшить показатели контактной стыковой сварки и расширить области ее применения. В частности, представляется возможным в 2...3 раза уменьшить время сварки, снизить потери металла и потребляемую мощность. При этом достигается высокотемпературный нагрев металла, необходимый при сварке высокопрочных сталей и сплавов. Реализация нового спо-



Рис. 4. Общий вид компьютеризированной установки КЛ-115 для электронно-лучевой сварки крупногабаритных изделий

соба обеспечена благодаря разработке систем управления процессом сварки с использованием современных средств автоматизации и вычислительной техники. Такие системы позволяют осуществлять не только многофакторное автоматическое управление процессом сварки, но и одновременно диагностировать качество соединений. На основе нового способа разработаны технологии соединения высокопрочных рельсов, разнородных материалов, в частности, соединений стали Гадфильда с рельсовой сталью, инструментальных сталей, заготовок проката с большой площадью поперечного сечения. Разработаны новые поколения машин для контактной сварки рельсов, железнодорожных крестовин (рис. 3), проката. Серийный выпуск такого оборудования освоен на Каховском заводе электросварочного оборудования, экспортирующем эти машины во многие страны мира.

Активно развивается электронно-лучевая сварка: совершенствуется оборудование и разрабатываются новые технологические приемы и решения. Главным направлением совершенствования оборудования является реализация возможности электронно-лучевой сварки изделий пространственно сложной формы благодаря компьютерному управлению всеми подсистемами установки и ходом технологического процесса.

В созданной электронно-лучевой сварочной установке КЛ-115 (рис. 4) осуществляется компьютерное управление перемещением пушки по семи осям: по трем линейным осям, поворотом и вращением пушки по двум осям, поворотом и вращением манипулятора изделия. Одновременно можно управлять перемещениями по любым четырем осям и всеми параметрами режима, что позволяет осуществлять сварку изделий практически любой пространственной конфигурации. В процессе сварки с помощью вторично-эмиссионной системы слежения «Растр» исключается уход пучка от стыка вследствие тепловых деформаций изделия.

Овладение процессом импульсного воздействия электронного луча на сварочную ванну дало возможность существенно улучшить форму швов. В частности, в результате применения продольной пилообразной развертки луча получены соединения стали толщиной 60 мм в нижнем положении с шириной расплавленной зоны около 1 мм и коэффициентом формы шва 40 (рис. 5). По сравнению с проплавлением статическим лучом коэффициент формы шва увеличен более чем в 2 раза. На несквозных швах получено благоприятное для предотвращения корневых дефектов закругление в корне шва (радиус 0,5 мм). Следует отметить, что эти швы практически не уступают по своей геометрии швам, выполненным на оборудовании с ускоряющим напряжением 150 кВ.

Разработанные технология и оборудование дают возможность с помощью электронного луча создавать конструкции различного назначения, как например, заготовки для крыла пассажирского самолета из высокопрочного алюминиевого сплава (рис. 6).

В связи с непрерывно увеличивающимся многообразием сочетаний трудносвариваемых разнород-

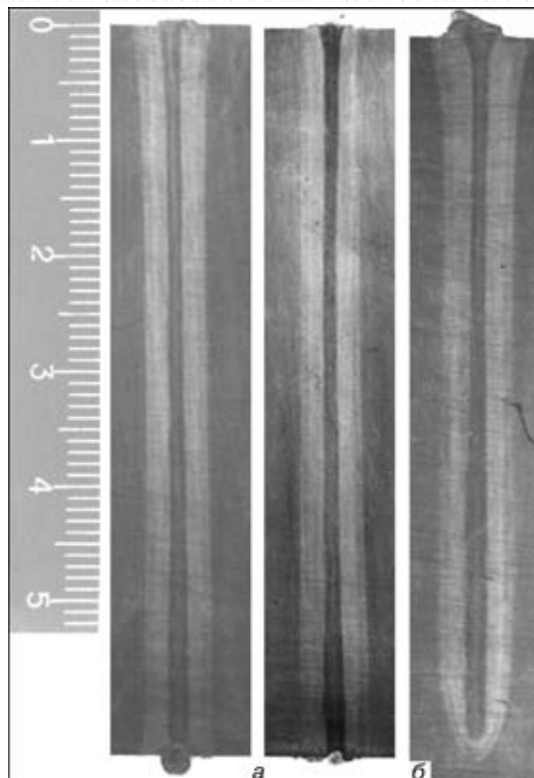


Рис. 5. Швы со сквозным (а) и несквозным (б) проплавлением на стали в нижнем положении ($U_{\text{иск}} = 60$ кВ, $I_{\text{н}} = 235$ мА, $v_{\text{св}} = 18$ м/ч, пилообразная развертка луча специальной формы)

ных материалов уделяется большое внимание фундаментальным и прикладным исследованиям в области пайки. Разработаны новые припои для высокотемпературной пайки высоколегированных никелевых сплавов (например, на основе системы Ni-Cr-Zr). Они имеют новый качественный уровень по сравнению с традиционными и позволяют значительно расширить объем применения конструкционной и ремонтной пайки в современном двигателестроении.

Большой шаг сделан в направлении создания пропоев и технологии пайки сплавов на основе интерметаллидов, в частности, γ -TiAl — альтернативы высоколегированным никелевым сплавам. Со-

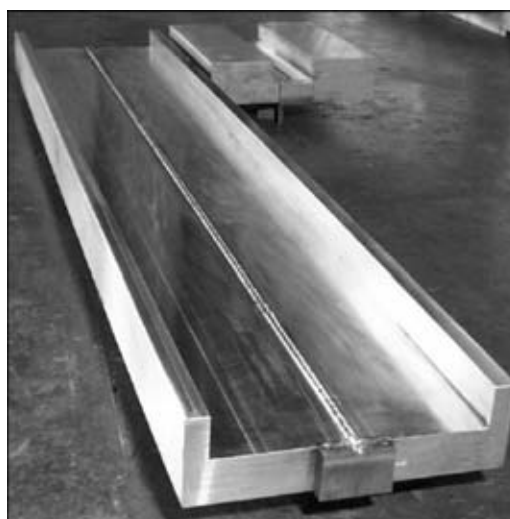


Рис. 6. Заготовка для крыла пассажирского самолета из высокопрочного алюминиевого сплава толщиной 100 мм, выполненная электронным лучом



Прочностные свойства интерметаллидного сплава γ -TiAl и его паяных соединений с применением припоя системы Ti-Zr

Объект исследования, материал	Прочность, МПа			
	при комнатной температуре	при 700 °С	Длительная при T = 700 °С	
			нагрузка 140 МПа	нагрузка 200 МПа
Сплав γ -TiAl	650...700	320...350	—	—
Паяное соединение	650...690	280...315	500 ч	300 ч

* Образец не разрушился.

единения, полученные с использованием разработанных припоев, близки к прочности основного материала при комнатной и высокой (700 °С) температурах, а также при испытании на длительную прочность (таблица).

Создан новый флюс для пайки алюминия. Его отличительной чертой является то, что пайка может проводиться без припоя, который образуется вследствие реакции компонентов флюса с алюминием. Новый флюс — хорошая основа для создания высокоэффективных технологий серийного производства алюминиевых радиаторов, излучающих антенн и других изделий различного назначения.

Рациональное использование новых конструкционных материалов с высокими показателями механических свойств позволяет эффективно решать проблемы снижения металлоемкости, повышения надежности и долговечности сварных конструкций. Для изготовления конструкций строительных сооружений созданы высокопрочные экономнолегированные стали марок 06Г2Б и 09Г2СЮч с пределом текучести более 440 МПа и пределом прочности 590 МПа, с высоким сопротивлением слоистому разрушению и высокой хладостойкостью при температурах до -70 °С, что установлено на образцах с острым надрезом типа Шарпи (KCV 150... 300 Дж/см²). Под воздействием термических циклов сварки в достаточно широком диапазоне скоростей охлаждения формируются высокие показатели прочности, пластичности и хладостойкости металла ЗТВ этих сталей. Установлено, что для снижения вероятности замедленного разрушения соединений сталей 06Г2Б и 09Г2СЮч условия их сварки должны выбираться таким образом, чтобы содержание диффузионного водорода в наплавленном металле $[H]_{диф} < 10$ мл/100 г, а скорость охлаждения металла ЗТВ — $w_{6/5} < 30$ °С/с.

Алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления занимают второе место после стали. Все более широкое применение находят высокопрочные алюминий-литиевые сплавы, сплавы с предельно высоким легированием, а также сплавы, которые содержат в своем составе эффективные модификаторы — скандий, цирконий и другие для одновременного улучшения свариваемости материалов и механических свойств сварных соединений.

Расширение областей применения алюминиевых сплавов в сварных конструкциях зависит от обеспечения требуемого сопротивления соединений усталостным разрушениям. Циклическая долговеч-

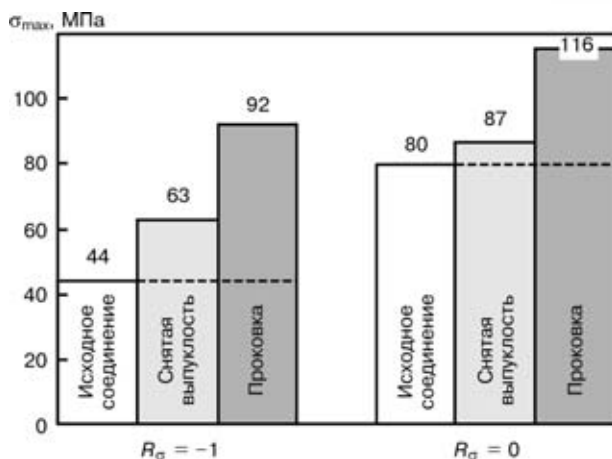


Рис. 7. Изменение значений предела ограниченной выносливости σ_{max} при $N = 1 \cdot 10^7$ циклов в зависимости от способа обработки сварного соединения сплава АМг6 и асимметрии цикла R_s переменных напряжений

ность сварных соединений алюминиевых сплавов составляет около 40 % соответствующего показателя соединений конструкционных сталей. Поэтому сварные алюминиевые конструкции в большей степени, чем стальные, нуждаются в послесварочной обработке. Исследования показали, что эффективным способом послесварочной обработки сварных соединений алюминиевых сплавов может стать поверхностное пластическое деформирование зоны перехода от шва к основному металлу высокочастотной механической проковкой. Иллюстрацией к этому служат приведенные на рис. 7 результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 в исходном состоянии, после механической зачистки выпуклости и после высокочастотной механической проковки с применением технологического оборудования сравнительно небольшой потребляемой мощности (до 0,3 кВт) с пьезокерамическим преобразователем. Повышение сопротивления усталости стыкового соединения алюминиевого сплава АМг6 после обработки по сравнению с исходным состоянием в зависимости от асимметрии цикла составило 45... 100 %.

Ведутся работы по созданию новых конструкционных хорошо свариваемых титановых сплавов для аэрокосмической техники, химического машиностроения, медицины и др. Создан опытный сплав Т-110 (Ti-5,5Al-1,2Mo-1,2V4Nb-1,8Fe), который по уровню прочности не уступает известному сплаву ВТ22, но обладает хорошей свариваемостью как дуговым, так и электронно-лучевым способами сварки. Сварные соединения сплава Т-110 после термической обработки имеют удовлетворительные характеристики пластичности при уровне прочности не менее 95 % этого показателя основного металла (1100 МПа), а долговечность сварных соединений при нагрузке 600 МПа составляет $5 \cdot 10^5$ циклов.

Стойкость в агрессивных средах является одной из важнейших характеристик титана, определяющих его широкое применение в химическом машиностроении. Наиболее высокая коррозионная стойкость у технического титана и его сплавов с палладием. Однако прочность этих сплавов не пре-



вышает 500 МПа. Коррозионная стойкость высокопрочных промышленных титановых сплавов уступает этому показателю технического титана.

Исследования показали, что повысить прочность титана без снижения его коррозионной стойкости можно, если в качестве легирующих элементов использовать изоморфные β -стабилизаторы, в частности, молибден, ванадий, ниобий. На этой основе разработан титановый сплав системы Ti-4,5Al-2,5V-2,5Mo-3,5Nb-1,5Zr. Прочность сплава (950 МПа) почти в 2 раза превышает прочность технического титана, а его коррозионная стойкость под напряжением не уступает этому показателю технического титана.

Теоретические и экспериментальные исследования в области химически чистых галогенидных флюсов для сварки титана и сплавов на его основе легли в основу создания принципиально новых (применительно к титану) способов сварки. К ним относится автоматическая сварка плавящимся электродом под флюсом, электрошлаковая сварка титана, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса (А-ТИГ), сварка в узкий зазор магнитоуправляемой дугой.

Разработаны порошковые титановые проволоки и технологии сварки титана вольфрамовым электродом в аргоне. Этот процесс позволяет выполнять однопроходные швы без разделки кромок на титане толщиной до 16 мм. Созданы технологии механизированной сварки титана неплавящимся электродом и соответствующее оборудование для сварки в заводских и монтажных условиях. Ведутся исследования по активации металлургических процессов при ЭЛС титана с помощью соответствующих флюсов.

Созданы технологии электронно-лучевого переплава и оборудование для производства тита-

новых слитков и полуфабрикатов (рис. 8) с использованием более дешевого исходного сырья — титановой губки. Установленное в НПЦ «Титан» оборудование позволяет выпускать промышленные партии титановых слитков до 1500 т в год.

Конечным продуктом сварочного производства являются сварные конструкции. Создание надежных и долговечных конструкций, работающих в различных условиях эксплуатации, остается важнейшей научно-технической проблемой.

Сегодня существенно возросла доля конструкций, сооружений и оборудования, приближающихся к своему критическому возрасту или уже отработавших свой нормативный срок. По оценкам специалистов, исчерпание ресурса оборудования и машин в странах СНГ превышает 50 %. В сложном положении оказался целый ряд отраслей промышленности (энергетика, транспорт, нефтехимическая, химическая и др.).

В сложившихся условиях первоочередным заданием является обеспечение безопасной эксплуатации сооружений и конструкций. Поэтому исключительно актуальной является проблема достоверной оценки остаточного ресурса конструкций и его гарантированное продление. За последние годы много сделано для развития прочностных расчетов сварных конструкций, достаточно интенсивно развивались методы и аппаратура технической диагностики сварных соединений не только с целью выявления формы и размеров дефектов, но и количественной оценки деградации прочностных свойств конструкционных материалов. На основании полученных знаний найдены новые подходы к оценке ресурса конструкций. Одним из таких подходов, базирующимся на вероятностно-экономической основе, является риск-анализ. Он позволяет получить достаточно обоснованную стратегию обеспечения безопасной работы конструкции длительного срока эксплуатации, когда усложнение условий их работы идет быстрее, чем исследование и нормирование работоспособности.

Большое внимание уделяется оценке ресурса конструкций и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности, к характерным особенностям которой относится разнообразие агрессивных сред, воздействующих на оборудование, а также многообразие эксплуатационных дефектов, начиная от коррозионно-эрозионных повреждений и заканчивая деградацией служебных свойств конструкцион-

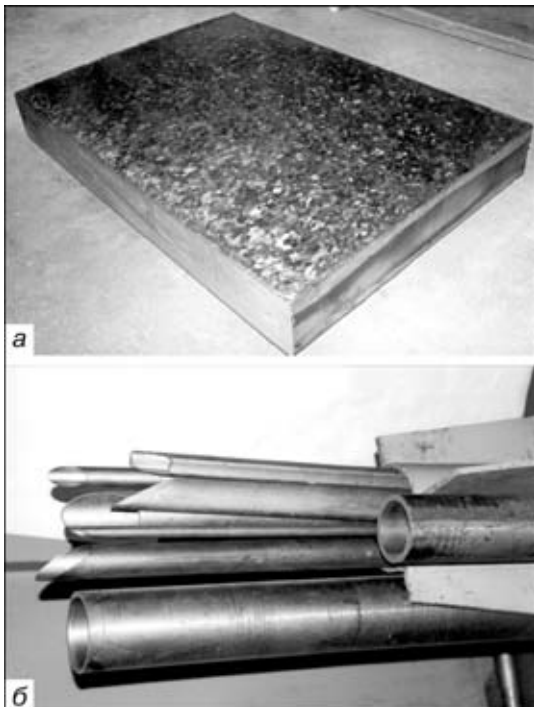


Рис. 8. Титановый слиток (а) и полуфабрикаты труб (б), полученные электронно-лучевым переплавом

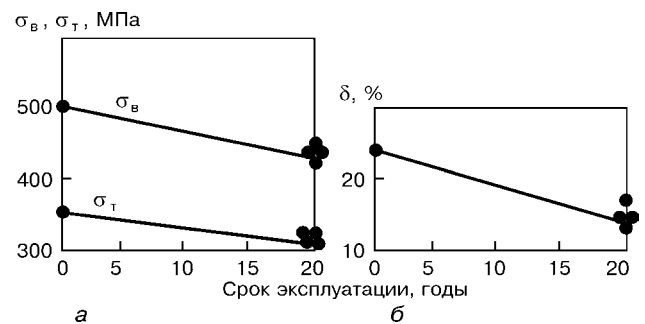


Рис. 9. Изменение прочностных свойств (а) и относительного удлинения (б) металла нефтеперерабатывающего оборудования (марки 17Г) за период эксплуатации

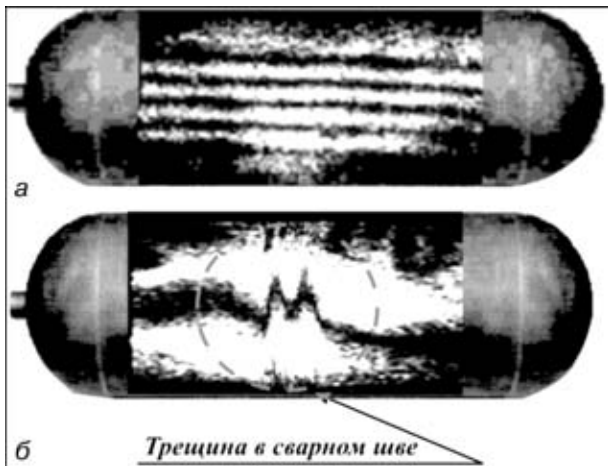


Рис. 10. Иллюстрация контроля качества сварных баллонов для сжатого газа методом электронной ширографии: *а* — изделие без дефектов; *б* — баллон с волосной трещиной в сварном шве

ных материалов. На рис. 9 приведены некоторые характерные примеры изменения прочностных характеристик металла сосудов, работающих на протяжении 20 лет в углеводородсодержащей среде. Прочностные характеристики за этот период снизились примерно на 11 %, а относительное удлинение — на 35 %. Дальнейшее развитие представлений о механизмах и скоростях развития типичных эксплуатационных дефектов и повреждений в связи с оценкой предельных состояний позволит обеспечить разработку более совершенных нормативных документов для оптимизации ремонтно-восстановительных мероприятий и повышения надежности сварных конструкций.

В настоящее время все более широкое применение находит технология акустоэмиссионной (АЭ) диагностики, основанной на анализе сигналов, возникающих при деформировании материалов конструкций. Она обеспечивает возможность эксплуатации конструкций по фактическому состоянию, минуя планово-предупредительные контрольные операции и ремонт. Широкое применение АЭ технологии объясняется возможностью осуществления 100 %-го контроля объектов сравнительно небольшим количеством датчиков и определения разрушающей нагрузки на ранних стадиях возникновения опасных ситуаций. Эти достоинства позволяют уже сейчас применять АЭ технологию для



Рис. 11. Решетчатые фермы перекрытия Международного выставочного центра в Киеве

мониторинга технического состояния конструкций в процессе эксплуатации. Например, система АЭ диагностики, установленная на Одесском припортовом заводе, призвана в течение 15 лет обеспечить непрерывный контроль 56-ю датчиками состояния изотермического хранилища аммиака, поверхность которого составляет 4500 м².

Ведутся работы по совершенствованию систем неразрушающего контроля магистральных трубопроводов. Для задач строительства и эксплуатации магистральных нефте-, газопроводов разработан электромагнитно-акустический дефектоскоп, который успешно прошел промышленные испытания. Возбуждение ультразвуковых волн осуществляется с помощью электромагнитно-акустического преобразователя, не требующего контактной жидкости. Этот метод контроля не критичен к качеству поверхности трубы и форме валика усиления шва. Сканирование преобразователя по поверхности трубы и ввод ультразвуковых волн в разных направлениях обеспечивает идентификацию типа, размеров и расположения внутренних дефектов в сварных соединениях и в материале трубы.

Разработаны методы лазерной интерферометрии для исследования напряженно-деформированных состояний и контроля качества сварных соединений и конструкций. Созданы компактные голографические приборы, с помощью которых осуществляется диагностика конструкций из неметаллических и композиционных материалов. Развитием методов оптической голографии является метод ширографии, основанный на электронной обработке оптической информации. Важным преимуществом этого метода является бесконтактность измерений и возможность наблюдения в реальном масштабе времени картины интерференционных полос на экране дисплея, исключая какую-либо фотозапись. Методом электронной ширографии эффективно осуществляется неразрушающий контроль качества сварных баллонов для сжатого газа, используемого в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания на автотранспорте (рис. 10).

Проектировать, строить и вводить в эксплуатацию в максимально короткие сроки — такова тенденция в строительстве гражданских и промышленных объектов с применением сварных конструкций. Яркий пример — строительство в Киеве Международного выставочного центра. Характерной особенностью инженерного решения конструкций (рис. 11) является система решетчатых ферм перекрытия с непосредственным примыканием трубчатых элементов в узле пролетом 24, 35 и 54 м.

Возможностям сварки, по-видимому, нет границ. Подтверждением тому является сварка тканей живых организмов. В СССР впервые этой проблемой заинтересовался академик Г. А. Николаев применительно к сварке костей. Известны работы украинских ученых по склеиванию хирургических ран и исследования, выполненные в Корнельском университете (США).

ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Институтом хирургии АМН и Минздрава Украины при участии на начальном этапе объединения «ОХМАДИТ»

Минздрава Украины, а позже с привлечением Главного госпиталя СБУ разработали новую медицинскую технологию соединения сваркой мягких тканей без использования ниток, металлических скоб, клеев-припоев или других инородных для организма веществ и изделий из них. Новая сварочная технология признана оригинальной, что засвидетельствовано патентами.

Установлено, что при определенных условиях можно осуществить соединение разрезов тканей в результате тепловой денатурации белков, приводящей к их коагуляции. При этом используются безопасные для организма токи высокой частоты.

Первые опыты по использованию этой технологии, проведенные на мелких лабораторных животных, подтвердили перспективность избранного направления и позволили создать образцы оборудования для дальнейших исследований. Опыты на животных были завершены сваркой разрезов различных органов у большой контрольной партии свиней с получением устойчивых положительных результатов. Это открывает возможность проверки этого способа на тканях человека. Первоначально в экспериментах использовались удаленные органы. Затем после получения положительных результатов начались постепенно усложняемые эксперименты по применению сварки непосредственно во время операций. Все это стало основанием для получения от Министерства охраны здоровья Украины разрешения на применение в клинической практике нового хирургического оборудования.

Аппарат для сварки мягких тканей состоит из источника питания и управляющего компьютера (рис. 12). Компьютер не только управляет источником питания, но и адаптирует процесс сварки к конкретным свойствам тканей соединяемых участков разреза. За прошедшие два года в двух киевских клиниках с использованием сварки было прооперировано около тысячи пациентов. Полученный опыт свидетельствует о перспективности применения сварки в общей хирургии, хирургической гинекологии, урологии, отоларингологии и других областях медицины, связанных с нарушением целостности тканей.

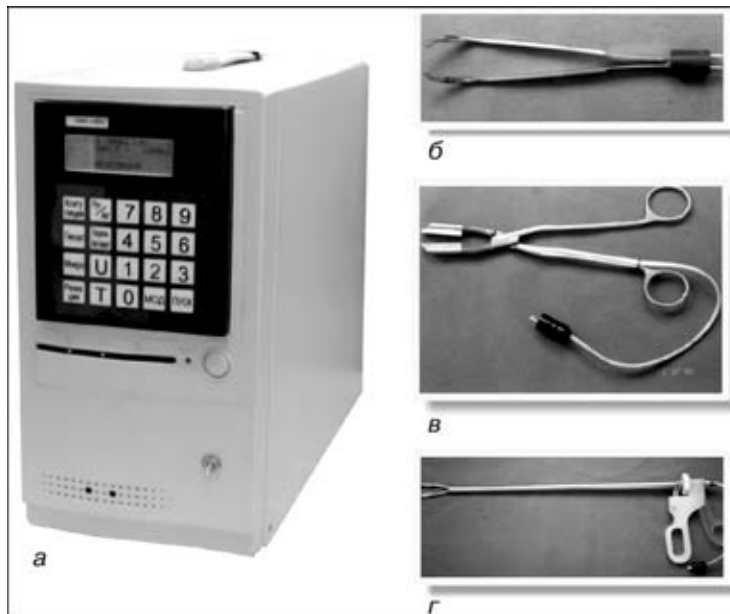


Рис. 12. Оборудование и инструмент для сварки живых тканей: а — высокочастотный сварочный источник питания; б — медицинский сварочный пинцет; в — медицинский сварочный зажим; з — медицинский сварочный лапароскопический зажим

Можно ожидать, что в дальнейшем сварка позволит создать новые хирургические приемы, изменить в лучшую сторону технику выполнения некоторых сложных операций. Впереди еще много интересных исследований в этом важном направлении. А пока нужно расширить круг клиник, в которых применяется сварка с тем, чтобы, опираясь на полученный опыт, довести экспериментальное оборудование до серийного производства и повсеместного применения.

Сварка и родственные технологии продолжают активно и всесторонне развиваться как вглубь, так и вширь. Создаются теоретические и технологические предпосылки для изготовления новых изделий в традиционных областях сварочного производства, а также для освоения все более широких сфер ее применения, которые раньше считались «экзотическими». На протяжении всего XXI века сварка и родственные технологии сохранит свою роль ведущей и массовой технологии во всех отраслях промышленного производства.

The paper presents some developments made lately by the E. O. Paton Electric Welding Institute, such as hybrid welding methods, activation of processes occurring in the weld pool under the effect of minor additions of chemicals, electric arc welding using an embedded electrode, machines for flash butt and electron beam welding, new filler alloys and fluxes for brazing, and new structural materials. It is noted that structures, constructions and equipment that approach their critical age have substantially increased in number. In this connection, the pressing problem is reliable estimation of residual life of structures using non-destructive testing and technical diagnostics methods, e.g. holography and shearography. Technology and instruments for welding of live tissues are considered.

Поступила в редакцию 11.06.2003



ПЯТЬДЕСЯТ ЛЕТ МОСТУ им. Е. О. ПАТОНА

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**

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

академик Академии стр-ва Украины **О. И. ШУМИЦКИЙ**, гл. инж. проекта (ОАО «УкрНИИПСК» им. В. Н. Шимановского)

Рассмотрены решенные под руководством Е. О. Патона проблемы сварного мостостроения на начальном этапе его становления, завершившегося 50 лет назад сооружением уникального цельносварного моста через р. Днепр в Киеве. На базе заложенных при проектировании моста им. Е. О. Патона основополагающих принципов конструирования и установленных главных причин раннего зарождения усталостных трещин в элементах типовых пролетных строений показаны пути обеспечения нормативного срока службы цельносварных мостов. Определяющими признаны конструктивные решения пролетного строения и сварных узлов, исключающие возникновение в них дополнительных напряжений и вибраций. Важную роль в предотвращении разрушений играет выбор стали, технологии сварки и обработки сварных соединений.

Ключевые слова: пролетное строение, сварное соединение, напряжение, вибрация, усталостная трещина, сталь, срок службы

50 лет надежно служит людям цельносварной мост им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве (рис. 1). В этом величественном уникальном сооружении воплощена давняя мечта его творца о «встрече электросварки с мостостроением». С окончанием строительства (открытие движения по мосту состоялось 5 ноября 1953 г.) завершился начальный и наиболее ответственный этап становления сварного мостостроения. Вскоре (18 декабря 1953 г.) мосту было присвоено имя Евгения Оскаровича Патона, а в 1995 г. он получил признание Американского общества сварщиков как выдающаяся сварная кон-

струкция с вручением ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины Памятного знака AWS (рис. 2).

Известно, что до сооружения моста им. Е. О. Патона как в СССР, так и в других странах многие попытки создания сварных мостов оканчивались неудачей. В них возникали трещины не только во время заводской и монтажной сварки, но и в процессе эксплуатации. Количество разрушений сварных пролетных строений возрастало. Из-за этого к сварным мостам во многих странах относились с большим недоверием. Проблема приобретала широкие масштабы, она становилась общей для всех металлических конструкций. Но все же это были только попытки и пробы, проверки или риск в расчете на удачу. Простая замена зак-



Рис. 1. Общий вид цельносварного моста им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве

лепочных соединений сварными швами (да еще при тогдашней технологии сварки и применяемых материалах) не могла гарантировать надежную работу конструкции, особенно мостов, работающих в условиях низких климатических температур и сложного переменного нагружения. Требовался полный пересмотр всех подходов и положений относительно проектирования, изготовления и монтажа металлических пролетных строений (а по сути, и сварных конструкций в целом), более экономичных по сравнению с клепаными, но далеко не всегда еще отвечающих требованиям прочности, долговечности и технологичности.

Это обстоятельство активно использовали оппоненты в качестве основного аргумента против реализации идеи сварного моста в Киеве. Только благодаря высокому авторитету Евгения Оскаровича Патона и его инженерной смелости удалось добиться положительного решения директивных органов.

В 1946–1951 гг. Евгений Оскарович — признанный лидер в области сварки и мостостроения — объединил и организовал совместную работу проектировщиков моста и сотрудников Института электросварки. Они провели большой комплекс исследований и проектно-конструкторских разработок с целью развития изложенных Е. О. Патоном еще в 1933 г. основных принципов проектирования сварных мостов [1]. В результате этой большой работы было сделано следующее:

- создана новая конструктивная форма моста. Вместо спроектированных до войны решетчатых главных ферм большой высоты разработаны двутавровые сплошнотенчатые неразрезные балки с поясами из толстолистового металла и экономичной тонкой стенкой. Их высота была в пределах железнодорожного габарита для возможности изготовления и перевозки крупными блоками. Для обеспечения местной устойчивости стенки применена система горизонтальных ребер жесткости, включенных в состав сечений главных балок, технологичных при изготовлении и сварке. Это позволило достичь рекордной тонкостенности главных балок 1/250 с минимальным расходом стали, которая сосредоточена в поясах. Последние экономно усилены вторыми листами в зоне опор и в середине пролетов в соответствии с распределением изгибающих моментов. Над опорами моста главные балки усилены снизу блоками в виде вут;

- создана специальная марка низкоуглеродистой стали «МСтЗ для сварных мостов», малочувствительной к термомеханическому циклу сварки. Достигли этого путем регулирования химического состава ($\leq 0,20\% \text{ C}$, $0,12...0,25\% \text{ Si}$, $0,36...0,60\% \text{ Mn}$, $\leq 0,05\% \text{ S}$, $\leq 0,045\% \text{ P}$). В качестве раскислителей использовали кремний и алюминий, а установленный термический режим прокатки обеспечивал мелкозернистую структуру. Из этой стали изготовлен ряд опытных сварных пролетных строений железнодорожных мостов;

- разработаны и опробованы в промышленных условиях улучшенные марки электродных прово-



Рис. 2. Памятный знак Американского общества сварщиков, врученный ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в 1995 г.

лок (марганцовистая марки А, Св-ІГА) и флюсов (АН-348, АН-348А, ОСЦ-45);

- усовершенствована и упрощена аппаратура для автоматической и механизированной сварки конструкций на заводе, обеспечивающая стабильность заданного режима сварки в производственных условиях и точность направления электрода по шву (сварочный трактор ТС-17-М, полуавтомат ПШ-5, держатель ДШ-27);

- разработаны применительно к монтажу пролетных строений новые способы и аппаратура для автоматической сварки вертикальных стыковых швов с их принудительным формированием;

- разработана технология заводской и монтажной сварки;

- определены конструктивные решения сварных узлов пролетного строения и порядок их сварки, критерием чего служило обеспечение заданного уровня прочности и пластичности сварных соединений. Определяли эти показатели по результатам испытаний крупномасштабных образцов реальных бездефектных сварных соединений при минимальной температуре эксплуатации (в данном случае $-40\text{ }^\circ\text{C}$) с записью диаграммы растяжения. Принимали, что удовлетворительная работа сварного соединения в условиях эксплуатации будет гарантирована, если разрушающие напряжения σ_p достигают уровня временного сопротивления σ_b ($\sigma_p = \sigma_b$), который не ниже, чем у основного материала. Другим важным требованием было развитие предшествующей разрушению образца значительной пластической деформации ($\sigma_b \gg \sigma_T$).

Оценивали склонность металла к деформационному старению и переходу в хрупкое состояние на оригинальных крупномасштабных образцах с естественным концентратором напряжений в зоне сварки (узкая щель в продольном составном ребре жесткости, привариваемом угловыми швами к пластине).

Эти и другие разработки послужили научной основой проектирования, изготовления и строительства первого крупного в Европе цельносварного моста [2, 3]. Заводское изготовление металлоконструкций моста общей массой около 10 тыс. т осуществляли с декабря 1951 г. по апрель 1953 г., а монтажные работы — с апреля 1952 г. по октябрь 1953 г. Общая длина моста составляет 1543 м. Он имеет

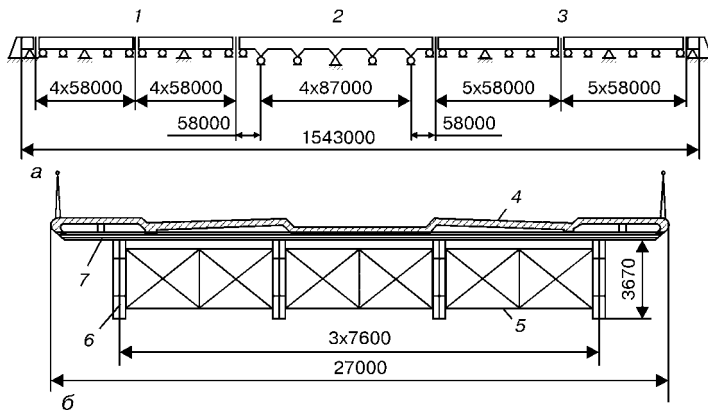


Рис. 3. Общая схема (а) и поперечное сечение (б) моста им. Е. О. Патона через р. Днепр в Киеве: 1 — левобережный участок (две неразрезные четырехпролетные балки жесткости); 2 — средний участок (то же, одна шести-пролетная); 3 — правобережный участок (то же, две шести-пролетные); 4 — железобетонная плита проезжей части; 5 — поперечные связи между главными балками; 6 — главная сварная двутавровая балка со сплошной стенкой; 7 — поперечная прокатная двутавровая балка

24 пролета — 20 по 58 м, а четыре судоходных — по 87 м (рис. 3, а). В поперечном сечении пролетное строение имеет четыре двутавровые главные балки со сплошной стенкой, расположенные друг от друга на расстоянии 7,6 м (рис. 3, б). Они объединены между собой поперечными связями. Продольные связи имеются только по нижнему поясу между средними главными балками по всей длине моста. Над опорами продольные связи устанавливались между всеми четырьмя главными балками. Верхние пояса объединены поперечными прокатными балками с включенной в их работу на изгиб железобетонной плитой проезжей части. Общая ширина моста 27 м (проезжая часть 21 м, два тротуара по 3 м). Посередине проезжей части проходят две трамвайные линии.

В связи с имевшимися ранее разрушениями сварных пролетных строений, кроме применения таких конструктивных решений сварных узлов, которые в наибольшей степени отвечали отмеченным выше требованиям прочности, огромное значение придавали качеству сварных швов. Поэтому

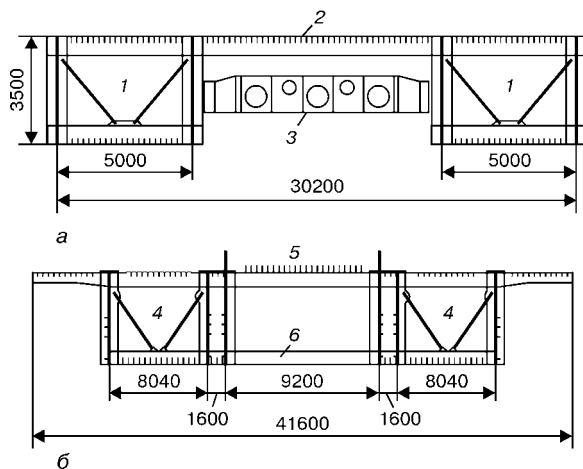


Рис. 4. Поперечное сечение металлических вантовых пролетных строений Московского (а) и Южного (б) мостов через р. Днепр в Киеве: 1 — корыччатые главные балки; 2 — ортотропная плита проезжей части; 3 — диафрагмы; 4 — трехстенчатые корыччатые главные балки с консолями; 5 — ортотропная плита специальной конструкции для проезда поездов метро; 6 — связи-распорки

в основу проектирования положен принцип максимального использования на заводе и монтаже автоматической и механизированной сварки под флюсом. С этой целью главные балки запроектированы в виде двутавра со сплошной стенкой, имеющей прямолинейные швы большой протяженности. Вертикальные ребра в основном были заменены горизонтальными. На заводе изготовление монтажных элементов главных балок осуществляли крупными блоками. Их длина составляла 27... 29 м, а масса — около 38 т. Кроме того, разработана специальная конструкция монтажного стыка со вставками вертикальной стенки, что дало возможность заварить автоматом стыки нижнего пояса с выводом шва на планки, их обрезкой и зачисткой заподлицо с листом нижнего пояса. Стыки вставки вертикальной стенки запроектированы для автоматической сварки способом принудительного формирования. Сварка стыков со вставками верхнего пояса также предусмотрена автоматами с выводом швов на планки, последующей их обрезкой и зачисткой заподлицо с поясом. Все это позволило выполнять 93 % всех заводских и 88 % монтажных швов главных балок автоматической и механизированной сваркой под флюсом, что гарантировало их высокое качество.

На протяжении пятидесяти лет мост им. Е. О. Патона интенсивно эксплуатируется без капитального ремонта. При этом важно подчеркнуть, что в последние десятилетия существенно возросли нагрузки на мост (до класса Н-30) и интенсивность движения (71 тыс. автомобилей в сутки) по сравнению с проектными значениями (класс Н-10, 10 тыс. автомобилей в сутки). При систематических осмотрах его сварных соединений и узлов трещины, надрывы и разрушения элементов не были обнаружены.

В то же время, как показывает опыт, в современных сварных пролетных строениях автомобильных и железнодорожных мостов, расчетный срок службы которых составляет 80... 100 лет, усталостные трещины зарождаются после незначительного срока эксплуатации [4, 5]. Как установлено в ходе исследований напряженно-деформированного состояния элементов пролетных строений, склонных к раннему зарождению усталостных трещин, основными причинами их возникновения являются местные дополнительные переменные напряжения и вибрация элементов пролетного строения, обусловленные главным образом несовершенством конструкции и оформления сварных узлов [6]. Поэтому конструктивный путь предупреждения усталостных разрушений пролетных строений мостов является одним из главных. При этом в нормах проектирования должны быть такие правила конструирования и оформления сварных узлов, применение которых позволило бы исключить появление недопустимых уровней вибраций и местных переменных напряжений, обеспечив, таким образом, заданную долговечность.

В этом отношении конструктивные решения балки жесткости моста им. Е. О. Патона являются



основополагающими и используются в современных подходах к проектированию сварных пролетных строений, не склонных к образованию усталостных трещин. Принципиальной конструктивной особенностью в данном случае является включение в совместную работу верхних поясов главных балок и поперечных балок, а также железобетонной плиты проезжей части.

Данный принцип получил существенное развитие в современных автодорожных мостах. Сплошностенчатые главные балки объединяются конструктивно и технологически с проезжей частью [7]. Наиболее перспективным здесь оказалось использование коробчатых пролетных строений. В этом случае система отдельных главных двутавровых балок со сплошной стенкой, объединяемых поперечными и продольными уголковыми связями, заменяется одной или несколькими (до трех) коробчатыми балками. Поперечные сечения двух киевских вантовых мостов через р. Днепр (Московского для автомобилей и Южного для автомобилей и поездов метро), которые вошли в сборник «Видатні мости світу», показаны на рис. 4 [8, 9]. В таких коробчатых пролетных строениях одним из основных элементов наряду с главными двутавровыми балками является стальная ортотропная плита. Современная конструкция ортотропной плиты представляет собой стальной лист, подкрепленный продольными ребрами жесткости и поперечными балками. Она используется в качестве проезжей части и одновременно служит расширенным верхним поясом главных балок. Подобной ортотропной плитой объединяются и нижние части главных балок (расширенный нижний пояс), образуя таким образом коробчатую балку жесткости.

В данных относительно жестких конструкциях напряжения в основных элементах распределяются более равномерно. Кроме того, отсутствуют главные причины возникновения значительных дополнительных напряжений и вибраций, приводящих к зарождению усталостных трещин. Детальное обследование металлической балки жесткости вантового пролетного строения Московского моста в 1999 г. (после 23 лет эксплуатации) и Южного в 2002 г. (после 12 лет эксплуатации) подтвердило, что в их элементах усталостные трещины не образовались.

Что касается пролетных строений железнодорожных мостов длиной 18,6...33,6 м, изготавливаемых и до настоящего времени по типовым проектам 1960–1970-х гг., то усталостные трещины возникают в них после 1–7 лет эксплуатации. Они поражают элементы, в которых их появление не ожидалось, расчету на усталость они не подлежат. Из наиболее распространенных следует отметить трещины в фасонках и элементах связей, сварных соединениях вертикальных ребер жесткости с поясами и горизонтальными ребрами, стенках главных балок в местах обрыва вертикальных ребер жесткости, зоне сплавления верхнего поясного шва в створе вертикальных ребер жесткости.

Одной из главных причин образования усталостных трещин являются дополнительные местные на-

пряжения и вибрация элементов пролетного строения из-за нецентрированной передачи обрабатываемой нагрузки от подвижного состава на главные балки. Принято, что расстояние между средними плоскостями стенок главных балок равно 2000 мм, а ширина железнодорожного пути — 1530 мм. При проектировании под руководством Е. О. Патоны в 1950-х гг. делалось все возможное для того, чтобы снизить влияние эксцентрисности приложения нагрузки. В этих цельносварных пролетных строениях внешние листы верхних поясов, на которых закрепляются мостовые брусья, имели ширину 200 мм, связи размещались в уровне поясов, а вертикальные ребра жесткости приваривались к поясам с полным проваром. Долговечность таких пролетных строений в 15...20 раз выше по сравнению с типовыми 1960–1970-х гг. Такое существенное снижение долговечности пролетных строений 1960–1970-х гг. произошло в результате незначительных, на первый взгляд, изменений в проекте. Они заключались в увеличении ширины верхних поясных листов до 420 мм, в некоторых случаях в зависимости от длины пролета (18,2...33,6 м) — до 520 мм и даже до 620 мм, перенесении прикрепления связей с поясов на стенку балки и сопряжении вертикальных ребер жесткости с верхними поясами через сухарики. При наличии зазора в соединении вертикальных ребер жесткости и поясов (на практике он достигает 0,5...1,0 мм) проезд каждой тележки (даже оси) подвижного состава вызывает поворот пояса и выгиб стенки с ее плоскости в зоне выреза вертикальных ребер жесткости, а на участке между ребрами жесткости — изгиб стенки отсека по всей ее высоте. Последнее порождает поворот нижнего пояса и способствует возникновению колебаний отсека стенки. Значительно вибрируют и прикрепленные к стенкам связи. При определенных скоростях подвижного состава такие колебания могут быть резонансными. В случае увеличения ширины верхних поясов (420...620 мм) существенно возрастает односторонность опирания на них мостовых брусьев и соответственно эксцентрисность передачи нагружения от рельсового пути на главные балки. При этом в поясах возникают дополнительные переменные напряжения от скручивания, а в связях и верхних участках стенки — от изгиба.

По уровню дополнительные напряжения незначительны и сами по себе не могут вызвать появление усталостных трещин. Однако они накладываются на основные поезда и, кроме того, к ним добавляются напряжения, возникающие в результате колебания системы пролетное строение–поезд, а также вибрации элементов пролетного строения. В этом случае долговечность элементов пролетного строения определяется амплитудными и частотными соотношениями складываемых напряжений [6]. Негативное влияние вибрации увеличивается с повышением относительных значений ее амплитуды и частоты.

Кроме того, здесь важно подчеркнуть, что пролетные строения 1960–1970-х гг. (типовые проекты) стали болтосварными. Первые болты появились в них в 1960-х гг. С их помощью при-



репляли продольные и поперечные связи к фасонкам. Затем болтами стали прикреплять и фасонки связей. В последнее время прикрепление вертикальных ребер жесткости к стенкам главных балок также осуществляют высокопрочными болтами. Сварными остались только стыки листов главных балок и поясные швы.

Между тем, опыт эксплуатации показал, что замена сварных швов соединениями на высокопрочных болтах не гарантирует исключения усталостных разрушений, поскольку остается главный источник их возникновения — нецентрированная передача нагружения на главные балки и другие причины, порождающие дополнительные местные переменные напряжения и вибрацию. При этом значительно выросла трудоемкость изготовления и монтажа болтосварных пролетных строений по сравнению с цельносварными, которые полностью сваривали на заводе и в готовом виде перевозили железной дорогой к месту установки.

Таким образом, применяемые конструктивные решения должны быть направлены в первую очередь на уменьшение эксцентрисности передачи нагружения от подвижного состава на главные балки. Это может быть достигнуто, например, с помощью специальных центраторов, привариваемых к верхним поясам главных балок, которые соприкасаются с мостовыми брусьями по небольшой площади. Ее центральная ось должна совпадать со средней плоскостью стенки главной балки. Известны, например, случаи прикрепления рельсов непосредственно к верхним поясам главных балок без брусьев. В этом случае расстояние между главными балками уменьшается до ширины железнодорожного пути. Достаточно эффективным способом является устройство мостового полотна на балласте [10]. Балластное корыто, изготавливаемое из железобетона, включается в работу верхних поясов главных балок.

Для удлинения срока службы эксплуатируемых сплошностенчатых пролетных строений предлагается ряд новых способов их усиления, снижающих уровень вибрации элементов [11]. Они основаны на применении ортотропной плиты (с ездой на балласте, поперечинах) или усилении верхних поясов главных балок продольными ребрами.

Рассмотренные методы усовершенствования типовых проектов и реконструкции эксплуатируемых строений позволяют увеличить их долговечность. Однако, чтобы гарантировать нормативный срок эксплуатации 80–100 лет не трудоемких в изготовлении сварных пролетных строений железнодорожных мостов, необходимы принципиально новые конструктивные решения, исключающие основные причины раннего зарождения усталостных трещин.

С этой целью в условиях эксплуатации (на полигоне) проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов и сварных узлов пролетных строений, изготовленных по типовым проектам и с предложенными новыми конструктивными решениями. При их выборе определяющим был заложенный еще в 1950-е гг. Е. О. Патонам главный принцип

о совместной работе основных элементов пролетного строения.

На базе этих данных сформулированы исходные положения создания цельносварных пролетных строений железнодорожных мостов нового типа, не склонных к образованию усталостных трещин [6, 12, 13], основным из которых является объединение главных балок на уровне верхних поясов системой таких связей, которые улучшили бы пространственную работу пролетного строения за счет более равномерного распределения усилий между элементами и снижения в них уровня вибрации.

Для этого предложена замена продольных и поперечных связей уголкового профиля соответственно листами-вставками и листовыми диафрагмами закрытого или открытого типа. Важное значение при этом имеет способ приварки рассматриваемых элементов, состоящий в том, что листы-вставки, диафрагмы и ребра жесткости привариваются к верхним поясам главных балок с полным проваром. Вертикальные ребра жесткости и диафрагмы привариваются к верхней части стенок главных балок на расстоянии 200 мм от поясов также с полным проваром, в других местах — угловыми швами.

Предложенные листы-вставки и диафрагмы, образуя совместно со стенками главных балок жесткие клетки, исключают взаимные перемещения главных балок, повышают жесткость пролетного строения на изгиб (в горизонтальном и вертикальном направлениях) и кручение, способствуют равномерному распределению эксплуатационных напряжений. Это существенно снижает местное кручение верхнего пояса и связанные с ним дополнительные переменные напряжения в элементах пролетного строения, что приводит к снижению вибрации элементов.

Натурные испытания предложенного пролетного строения на экспериментальном кольце, по времени соответствующие примерно 60 годам эксплуатации на ветке железной дороги, показали его высокую сопротивляемость усталостным разрушениям. В его сварных узлах усталостные трещины не образовались. Предложенная конструкция пролетного строения может служить надежной основой для создания типовых проектов цельносварных сплошностенчатых пролетных строений нового типа, стойких против усталостных повреждений.

ОАО «УкрНИИПСК» им. В. Н. Шимановского и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан проект опытного цельносварного пролетного строения железнодорожного моста (расчетная длина 23,6 м), который планируется в этом году установить на одной из веток железных дорог Украины.

Наряду с усовершенствованием конструкции пролетных строений мостов необходимо проводить обработку сварных соединений с целью повышения их циклической долговечности. Здесь важно подчеркнуть, что конструктивные меры являются первоочередными, поскольку обработка сварных соединений при неблагоприятных условиях (наличие дополнительных напряжений и вибраций)



не всегда может привести к желаемым результатам. Из большого количества способов повышения сопротивления усталости сварных соединений (механический, ТИГ-переплав, поверхностное пластическое деформирование — ППД) наиболее перспективными следует признать способы обработки, положительное влияние которых основывается на снижении коэффициента концентрации напряжений в зоне перехода от основного материала к металлу шва, где чаще всего и зарождаются усталостные трещины, и создании там благоприятных остаточных напряжений сжатия [6, 14, 15]. Такой способ ППД, как ультразвуковая ударная обработка (УУО) с магнитострикционным преобразователем электрических колебаний в механические, разработан в 1980-х гг. [16, 17]. В последнее время ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины перешел на компактное оборудование для ППД — высокочастотную механическую проковку (ВМП) с преобразователем на основе обратного пьезоэлектрического эффекта [18, 19]. В первом случае выходная мощность ультразвукового генератора, инициирующего колебания, составляет 1 кВт и более, а во втором — достигает 0,4 кВт.

Известна общая тенденция повышения эффективности высокочастотной механической проковки с возрастанием прочности стали при условии использования одного и того же режима ВМП. Данные об эффективности ВМП основных типов сварных соединений конструкционных сталей относительно низкой прочности, в том числе и материалов, рекомендованных для мостостроения (15ХСНД, 09Г2СЮч), приведены в таблице. Они показывают возможность получения значительного повышения предела выносливости (до 100 %) и для указанных сталей. Важным при этом является установление оптимального режима ВМП в зависимости от класса прочности стали и типа сварного соединения.

Таким образом, полученные данные об эффективности ВМП, ее высокая производительность и относительно низкая потребляемая мощность оборудования позволяют считать ВМП наиболее перспективным способом повышения сопротивления усталости сварных соединений. ВМП проста в реализации, ее стоимость ниже по сравнению с другими способами обработки (механическим, ТИГ-переплавом, дробеструйной).

Влияние высокочастотной механической проковки на свойства сталей различной прочности

Исследуемые материалы и соединения				Условия нагружения	
Марка стали	Временное сопротивление, МПа	Толщина, мм	Тип соединения	Вид нагружения	Коэффициент асимметрии
СтЗсп	458	20	Стыковое	Растяжение	0
E460	589	10	Тавровое	Изгиб	0,1
WELDOX 420	573	20	Поперечное ребро, приваренное угловыми швами		0,1
	573	20			0,1
TMCP	560	20			0,1
СтЗсп	460	30		Растяжение	0
	460	30	0		
	460	30	0		
09Г2СЮч	550	14	Продольное ребро	0	
15ХСНД	520	14		0	
G235B	436	8	Стыковое	Изгиб четырехточечный	0,1
	436	8	Крестообразное		0,25
	436	8			-0,5

Продолжение таблицы

Марка стали	Предел выносливости при $N = 2 \cdot 10^6$ цикл, МПа,		Повышение предела выносливости,		Примечание
	в исходном состоянии	после обработки	МПа	%	
СтЗсп	140	220	80	57	[17]
E460	168	290	122	73	[20]
WELDOX 420	198	327	129	65	[21] (различные технологии обработки)
	198	341	143	72	
TMCP	178	351	173	97	[22]
СтЗсп	113	167	54	49	Данные ИЭС
	113	164	51	48	Данные ИЭС (различные технологии обработки)*
	113	226	113	100	
09Г2СЮч	96	156	60	62	Данные ИЭС
15ХСНД	86	180	94	110	
G235B	148	234	86	57	[23]*
	142	234	92	64	
	165	282	117	71	

* Инструмент с пьезокерамическим преобразователем.

Кроме рассмотренных конструктивных и технологических путей обеспечения долговечности пролетных строений мостов, существенное значение имеет выбор стали для их изготовления. Уровень служебных свойств конструкционных материалов для мостов должен быть достаточным для исключения хрупких, вязких и слоистых (ламельных) разрушений. В настоящее время в мостостроении применяются стали весьма ограниченного перечня с максимальным нормативным сопротивлением (пределом текучести) — до 390 МПа [24, 25]. Несомненно, этот перечень сталей следует расширять в части повышения прочности и других служебных свойств металлопроката.

Новые составы и технологии изготовления конструкционных материалов открыли для этого ши-

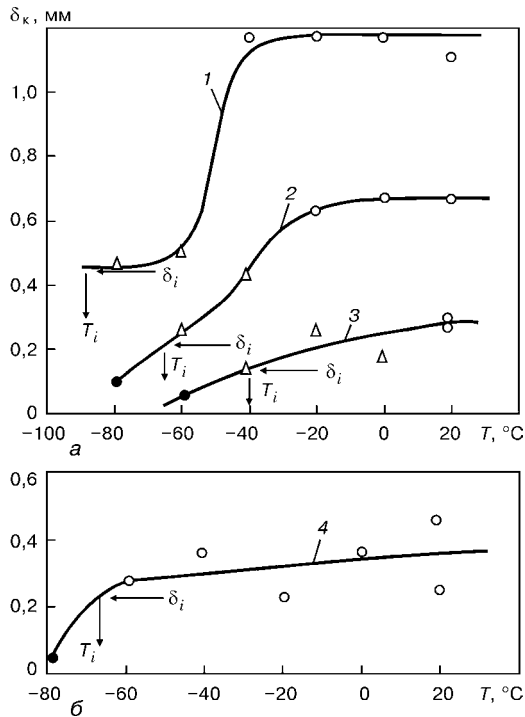


Рис. 5. Температурная зависимость вязкости разрушения δ_k (δ_c , δ_i , δ_u , δ_m) стали 09Г2СЮч в исходном состоянии (1) и после деформационного старения (2), металла шва (3) и зоны термического влияния (4); ● — δ_i ; Δ — δ_u ; ○ — δ_m

рокие возможности. В то же время необходимо иметь в виду, что экономнолегированные стали повышенной и высокой прочности более чувствительны к технологическому переделу. Это требует проведения на стадии их освоения всесторонних исследований основного материала и металла сварных соединений с использованием современных методов, включая критерии механики разрушения [26].

В зарубежной практике есть примеры использования материалов с пределом текучести 600...800 МПа [27, 28]. В последнее время для изготовления автомобильных, городских и пешеходных мостов применяется отечественная сталь 09Г2СЮч ($\sigma_{0,2} \geq$

≥ 450 МПа) [24], разработанная на базе широко используемой стали 09Г2С. Удачное сочетание повышенного содержания марганца, микролегирования (алюминий, церий) и внепечных обработок обеспечивает высокие стабильные служебные свойства. Так, при гарантированном значении предела текучести 450 МПа и временного сопротивления 580 МПа ударная вязкость стали 09Г2СЮч на образцах с острым надрезом KCV при температуре -70°C равна 55...69 Дж/см².

Обоснование требований к сталям для мостостроения и их сварным соединениям, призванных исключить хрупкие, вязкие и слоистые разрушения, следует основывать на современных подходах и критериях механики разрушения с использованием концепции «соответствие назначению». Для контроля за выполнением этих требований в заводских условиях при изготовлении материалов и металлоконструкций определяют показатели KCV, необходимые уровни которых устанавливаются в соответствии с корреляционными зависимостями KCV- δ_{1c} (δ_{1c} — критическое раскрытие вершины трещины) [29].

На примере стали 09Г2СЮч рассмотрены принципиальные положения установления требований к основному материалу и металлу сварных соединений, направленных на исключение хрупких и вязких разрушений. Оценку вязкости разрушения стали 09Г2СЮч (толщина листа 12 мм) и ее сварного стыкового соединения (заводская механизированная сварка в углекислом газе, проволока Св-08Г2С) осуществляли при различных температурах на основе деформационного критерия механики разрушения δ_k (рис. 5). В зависимости от характера и стадии разрушения приняты следующие обозначения: δ_c — зарождение хрупкого или квазихрупкого разрушения ($T < T_i$, T_i — температура перехода от квазихрупкого к вязкому разрушению); δ_u — то же, после инициирования и стабильного подрастания вязкой трещины ($T \geq T_i$); δ_i — зарождение вязкого разрушения ($T \geq T_i$); δ_m — переход стабильно развивающейся вязкой трещины в неустойчивое состояние ($T > T_i$).

Величину δ_i определяли с помощью δ_R -кривых (рис. 6). Исследования показали, что δ_i не зависит от температуры и скорости нагружения [30, 31]. Кроме того, при выполнении условия плоской деформации

$$t > \delta_i E / \lambda \sigma_T$$

(E — модуль упругости; λ — коэффициент, равный 4...5) величина δ_i становится независимой от толщины металла t . Иными словами, ее можно рассматривать в качестве характеристики материала и использовать для оценки «соответствия назначению» элементов сварных конструкций.

Для предупреждения наиболее опасных хрупких разрушений температура перехода от квазихрупкого к вязкому инициированию трещины T_i основного материала и металла сварных соединений должна быть ниже минималь-

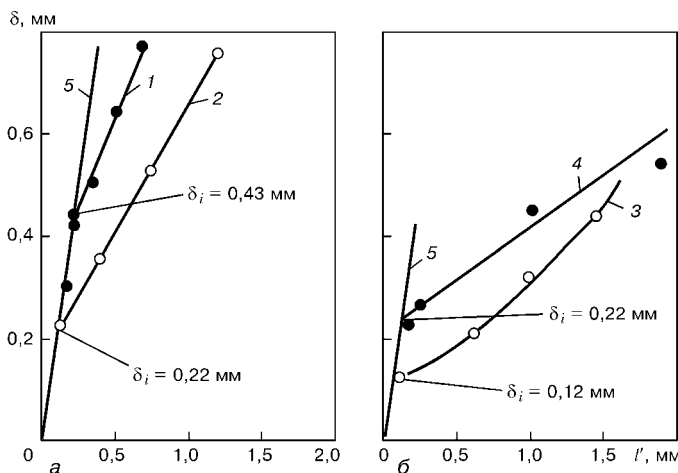


Рис. 6. Зависимость раскрытия вершины трещины δ от стабильного приращения ее длины l' в вязком состоянии (δ_R -кривые) для стали 09Г2СЮч: 1 — исходное состояние; 2 — после деформационного старения; 3 — металл шва; 4 — зона термического влияния; 5 — линия затупления вершины трещины ($\delta = 2l'$); точки — экспериментальные данные

ной температуры эксплуатации $T_э$ ($T_i < T_э$). При этом важно, чтобы в лабораторных испытаниях по определению T_i воспроизводили условия работы металла в реальной конструкции. Принципиальное значение в данном случае имеет скорость нагружения и степень объемности напряженно-деформированного состояния, которая главным образом определяется толщиной образца и размером исходного трещинообразного дефекта. С учетом этого приемлемые для большинства практических случаев значения T_i могут быть получены при испытании стандартных образцов полной толщины со скоростью деформирования металла в вершине дефекта, отвечающего условиям эксплуатации. Такие данные в зависимости от скорости раскрытия вершины трещины δ' для некоторых конструкционных материалов и сварных соединений представлены на рис. 7.

Условие работы металла в вязком состоянии ($T_i < T_э$) следует рассматривать как определяющее. Обусловливается это принципиальным изменением в характере развития трещины. Ниже T_i она нестабильна с момента инициирования, а в температурном интервале выше T_i разрушению предшествует стадия стабильного развития трещины после ее зарождения.

Кроме неравенства $T_i < T_э$, вполне очевидна необходимость введения еще одного дополнительного условия, которое относится к уровню вязкости разрушения δ_i на стадии зарождения вязкой трещины с целью ограничения ее размера заданным значением. Оно записывается $\delta_i > \delta_i^*$, где δ_i^* — необходимый (минимальный) уровень вязкости разрушения, призванный гарантировать неразрушимость конструкции при наличии в ней предполагаемого (гипотетического) трещинообразного дефекта. Значение δ_i^* устанавливается исходя из концепции «соответствие назначению».

Таким образом, выбор стали и технологии сварки в соответствии с условиями

$$T_i < T_э, \quad \delta_i > \delta_i^*$$

будет гарантировать надежную эксплуатацию металлоконструкции, исключая возникновение хрупких и вязких разрушений.

Кроме того, сталь для мостостроения должна иметь достаточный уровень сопротивления зарождению слоистых разрушений. Известно, что служебные свойства металлопроката, включая пластичность и вязкость, заметно снижаются при переходе от продольного к поперечному направлению и могут достигать весьма низких значений в направлении толщины (направление Z). В результате появляется угроза возникновения слоистых (ламельных) трещин под действием незначительных напряжений, направленных перпендикулярно плоскости листа. В дальнейшем такие трещины могут служить началом развития в элементах конструкции хрупких, вязких и усталостных разрушений под воздействием основных напряжений [32].

В настоящее время для оценки склонности сталей к слоистому разрушению наиболее широко

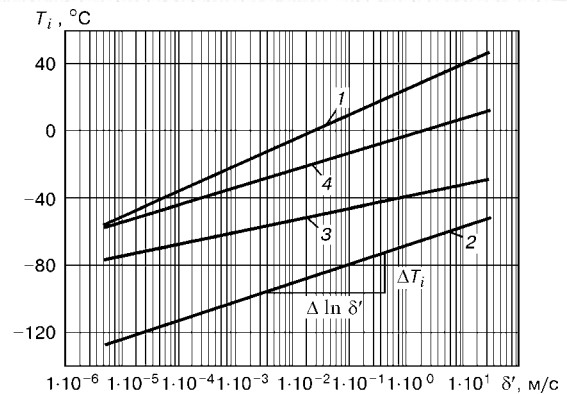


Рис. 7. Зависимость переходной температуры T_i от скорости раскрытия вершины трещины δ' в полулогарифмической системе координат: 1 — сталь 09Г2С; 2 — микролегированная (Mn-Ni-Mo-Nb) сталь контролируемой прокатки; 3 — то же (Mn-Ti); 4 — металл шва стали контролируемой прокатки (Mn-Ti)

используется показатель относительного сужения ψ_Z гладкого стандартного образца с осью, ориентированной в направлении Z . Что касается его уровня, то в соответствии с техническими условиями на толстолистовой прокат для мостостроения ψ_Z при комнатной температуре должно составлять более 20 %. Практика показала, что это значение ψ_Z является оптимальным с точки зрения предупреждения образования слоистых трещин в процессе технологических операций (сварка, наплавка и др.) при изготовлении металлоконструкций, когда температура равна комнатной и выше.

С понижением температуры характеристики пластичности и вязкости разрушения металла в направлении Z могут резко ухудшаться. Это связано не только с обычным температурным охрупчиванием металла, но и с его склонностью к «низкотемпературному» слоистому разрушению, обусловливаемому кристаллографической текстурой и ослаблением границ субзерен [33]. В значительной мере это касается современных сталей с незначительным содержанием неметаллических включений и достаточно высоким уровнем изотропности свойств при нормальных и повышенных температурах. Поэтому высокие значения ψ_Z при положительных температурах являются необходимым условием, но далеко не достаточным для предупреждения слоистых разрушений при эксплуатации сварных металлоконструкций.

В этой связи наряду с определением ψ_Z при комнатной температуре необходимо введение испытаний конструкционных сталей в направлении Z при минимальной расчетной температуре с использованием критериев механики разрушения. При этом оптимальные требования к вязкости разрушения должны устанавливаться на основе концепции «соответствие назначению». Эти требования могут приводиться непосредственно нормативными значениями характеристик механики разрушения или в соответствующих показателях стандартных ударных испытаний образцов с острым надрезом KCV .

В заключение необходимо подчеркнуть, что создание полвека назад первого крупного цельносварного моста с выполнением целого комплекса



исследовательских и проектно-конструкторских работ для обеспечения его надежной эксплуатации открыло дорогу электросварке в мостостроение и вышло далеко за рамки решения частной задачи отдельного объекта. Тогда был выработан ряд принципиальных подходов и конструктивно-технологических решений для широкого использования электросварки в металлостроительстве вообще.

В результате опыта совместной работы проектировщиков, ученых, исследователей и технологов создана школа сварных строительных конструкций Е. О. Патона, значительным результатом которой было создание ряда выдающихся сооружений, а также дальнейшее развитие науки в этой области.

1. Патон Е. О., Горбунов Б. Н. Принципы проектирования сварных мостов // Автоген. дело. — 1933. — № 4. — С. 2–5.
2. Статическая прочность сварных соединений из малоуглеродистой стали / В. В. Шеверницкий, В. И. Новиков, Г. В. Жемчужников, В. И. Труфяков; Под общ. ред. Е. О. Патона. — Киев: Изд-во АН УССР, 1951. — 88 с.
3. Применение автоматической сварки при строительстве большого городского цельносварного моста / Е. О. Патон, Д. П. Лебедь, Е. Н. Радзевич и др. — Киев: Изд-во АН УССР, 1954. — 57 с.
4. Усталостные трещины в сплошностенчатых пролетных строениях / Ю. П. Миролюбов, Е. М. Панин, В. В. Фролов и др. // Вопросы проектирования и эксплуатации искусственных сооружений: Сб. тр. НИИ мостов. — Л.: Ин-т инж. ж.-д. транспорта им. В. Н. Образцова, 1983. — С. 62–69.
5. Фишер Дж., Мерц Д. Трещинообразование в стальных мостах // Гражд. стр.-во. — 1985. — № 2. — С. 9–13.
6. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
7. Сварные строительные конструкции: В 3 т. Т. 2. Типы конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. — 680 с.
8. Фукс Г. Б., Корнеев М. М. Вантовые мосты по украинским проектам. Настоящее и перспектива // Сучасні проблеми проектування будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення: Зб. доп. Другого засідання укр. міжгалуз. наук.-прак. сем. (30 черв. — 1 липн. 1998 р., м. Київ). — Киев: ОПВТД ОАО ПТИ «Киеворгстрой», 1998. — С. 208–217.
9. Юхані Віррала. Видатні мости світу / Під ред. проф. А. І. Лантух-Лещенко. — К.: НТУ, 2001. — 56 с.
10. Металлические конструкции. Спец. курс / Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Г. С. Ведеников и др.; Под ред. Е. И. Беленя. — М.: Стройиздат, 1991. — 687 с.
11. Орлов В. Г., Дорошкевич А. А., Зенкин А. И. Новые способы усиления сплошностенчатых пролетных строений // Путь и путевое хоз-во. — 1997. — № 8. — С. 9–10.
12. Trufiakov V. I., Dvoretzky V. I., Lobanov L. M. Fatigue failures of welded bridges in CIS: Results of inspection, investigation and experimental tests // Welded structures in particular welded bridges: Intern. conf. (Hungary, 2–3 Sept., 1996). — Budapest, 1996. — P. 321–327.
13. New approach to the creation of solid-walled welded span structures of railway bridges / V. I. Trufiakov, V. I. Dvoretzky, V. G. Orlov, A. A. Doroshkevich // Welded Structures. — 1995. — 8, № 1. — P. 249–255.
14. Кудрявцев И. В., Наумченков И. Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 271 с.
15. Trufiakov V. I., Mikheev P., Kudryavtsev Yu. Fatigue strength of weld structures. Residual stresses and strengthening treatments // Welding and Surfacing Reviews. — 1995. — 3, № 2. — P. 100.
16. Статников Е. Ш., Шевцов Е. М., Куликов В. Ф. Ультразвуковой ударный инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных напряжений // Новые физические методы интенсификации технологических процессов. — М.: Металлургия, 1977. — С. 27–29.
17. Эффективность применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений / П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 4–7.
18. А. с. 601143 СССР, МПК В 24 В 39/04. Ультразвуковой многобойковый инструмент / Г. И. Прокопенко, В. П. Кривко. — Оpubл. 05.03.78; Бюл. № 13.
19. Применение высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, В. А. Шонин, В. С. Машин, Д. С. Романовский // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 7–11.
20. Improvement of fatigue strength in welded joints (in HSS and in aluminium alloy) by ultrasonic hammer peening / I. I. Yanosch, N. Koneczny, S. Debiez et al. — S. l., [1995]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1594–95).
21. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods / E. Sh. Statnikov, V. O. Muktepaev, V. I. Trufiakov et al. — S. l., [2000]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1870–00).
22. The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints / V. I. Trufiakov, E. Sh. Statnikov, P. P. Mikheev, A. Z. Kuzmenko. — S. l., [1998]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1745–98).
23. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method / X. Lixing, W. Dongpo, Z. Yufeng, C. Yunmei. — S. l., [2000]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1812–00).
24. СНУП 2.05.03–84*. Мосты и трубы / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 200 с.
25. ГОСТ 6713–91. Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 11 с.
26. Кирьян В. И., Муходуй Л. И. Проблемы использования новых сталей повышенной и высокой прочности в сварных конструкциях // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 10–17.
27. Fisher J. W., Dexter R. I. High-performance steel for american bridges // Welding J. — 1994. — № 1. — P. 35–43.
28. Recently developed structure steel for use in civil engineering and constructions / S. Tani, V. Kaneko, M. Ishiguro, M. Ohama // NKK Technical Review. — 1996. — № 74. — P. 17–25.
29. Гиренко В. С., Дядин В. П. Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Автомат. сварка. — 1986. — № 10. — С. 61–62.
30. Кирьян В. И. Методика оценки сопротивления конструкционных сталей вязким разрушениям // Там же. — 1984. — № 11. — С. 1–6.
31. Оценка вязкости разрушения конструкционных сталей в условиях высокоскоростного деформирования / В. И. Кирьян, А. П. Ващенко, Л. А. Волгин, С. В. Шамаповский // Пробл. прочности. — 1993. — № 5. — С. 51–59.
32. Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Там же. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
33. Сварные строительные конструкции: В 3 т. Т. 1. Основы проектирования конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.

Problems of welded bridge construction, solved under supervision of E. O. Paton, are considered at initial stage of its establishment and, finally, 50 years ago by the construction of unique all-welded bridge across the Dnieper river in Kiev. The ways of assurance of a design service life of all-welded bridges are shown on the basis of basic principles of designing and established main causes of earlier initiation of fatigue cracks in elements of standardized spans, which were used in designing of E.O.Paton bridge. Design solutions of spans and welded connections, eliminating occurrence of secondary stresses and vibrations in them, were recognized determinant. Selection of steel, technology of welding and treatment of welded joints plays an important role in prevention of fractures.

Поступила в редакцию 19.03.2003



КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Академик РАН **Ю. П. СЕМЕНОВ** (РКК «Энергия» им. С. П. Королева, г. Королев, РФ)

Представлены основные научно-технические достижения РКК «Энергия» им. С. П. Королева за последнее десятилетие как иллюстрация успехов ракетно-космической отрасли на международном рынке передовых наукоемких технологий в интересах освоения космического пространства в XXI веке. Эти достижения были бы немыслимы без решения многообразных проблем сварки вместе с ведущей организацией в этой области — ИЭС им. Е. О. Патона.

Ключевые слова: космические технологии, проекты и программа, орбитальные станции, международная космическая станция, комплекс морского базирования, телекоммуникационные спутники, солнечные отражатели, крупногабаритные околоземные платформы, сварные конструкции

Несмотря на все экономические и политические трудности последнего десятилетия XX века РКК «Энергия» им. С. П. Королева удалось не только сохранить тематическую направленность предприятия, основы научно-технического потенциала ракетно-космической отрасли России, но и выступить инициатором создания совершенно новых направлений и технологий в этой области. Остановимся только на крупномасштабных проектах, которые без преувеличения являются новейшими прорывными наукоемкими технологиями XXI века: пилотируемые орбитальные комплексы «Мир» и международные космические станции (МКС), ракетно-космический комплекс «Морской старт», спутники связи «Ямал», крупногабаритные космические конструкции, проект пилотируемой экспедиции на Марс, энергетические установки для подводных лодок и автомобилей.

Все упомянутые работы были проведены в РКК «Энергия» им. С. П. Королева совместно с другими организациями, в том числе с привлечением научно-исследовательских институтов РАН и стран СНГ. И, безусловно, одним из примеров плодотворного сотрудничества является взаимодействие коллектива, созданного С. П. Королевым в середине 1950-х годов прошлого столетия, с коллективом ИЭС им. Е. О. Патона. Еще в 1958–1959 гг. совместно с ИЭС им. Е. О. Патона на нашем предприятии была внедрена технология электронно-лучевой сварки двигателей в вакууме. Эта установка еще до сих пор работоспособна, на ней свариваются жаропрочные бронзовые и титановые сплавы. Наше сотрудничество, которое за почти полувековой срок распространилось и на другие области создания изделий ракетно-космической техники (например, разработку крупногабаритных трансформируемых конструкций), и сегодня продолжает приносить свои плоды.

Беспрецедентной по многообразию и сложности выполненных работ явилась программа пилотируемой орбитальной станции «Мир» (рис. 1). Этот проект сконцентрировал в себе высочайшие достижения российской (советской) науки и техники

XX века. При его осуществлении был накоплен бесценный опыт решения разнообразных прикладных задач в условиях космоса, что обеспечило всему мировому сообществу дальнейшее развитие и наращивание имеющегося космического потенциала на рубеже нового тысячелетия.

Программа станции «Мир» (1986–2001 гг.), вобравшая опыт эксплуатации орбитальных станций серии «Салют», заложила основы классического подхода к созданию будущих долговременных пилотируемых комплексов на околоземной орбите: модульность и поэтапное строительство, ремонтопригодность бортовых систем и конструкций, регулярность транспортно-технического снабжения, безопасность непрерывной работы экипажа, адаптивность к изменениям программы полета, технология периодического обслуживания свободнолетающих аппаратов, многоплановость целевого использования и управляемый сход с орбиты.

В процессе эксплуатации станция постоянно совершенствовалась и развивалась. Всего на околоземную орбиту было выведено семь модулей, общая масса которых составляла 135 т. Благодаря модульности конструкции стало возможным оперативно менять направления исследований в ходе полета по требованию постановщиков экспериментов, а за счет поэтапности строительства — рационально распределять финансовые и материальные ресурсы. Еще на стадии проектирования была предусмотрена возможность выполнения оперативных ремонтно-профилактических работ, что позволяло устранять в ходе полета самые сложные, в том числе и непредвиденные, отказы. Сверхдли-



Рис. 1. Пилотируемая орбитальная станция «Мир»



Рис. 2. Три транспортных корабля, «причаливших» к станции «Мир»

тельный пятнадцатилетний полет космической станции (что в 3 раза превысило проектный ресурс), а также преодоление ряда серьезных нештатных и аварийных ситуаций дали бесценный опыт эксплуатации космических орбитальных комплексов.

При создании практически всех бортовых систем использованы принципиально новые научно-технические решения, перспективные для дальнейшего развития космической техники. Разработано и применено свыше 100 новых уникальных конструкционных материалов, освоены передовые технологические процессы.

О высокой эффективности системы транспортно-технического снабжения станции «Мир» свидетельствует тот факт, что общий грузопоток «Земля-борт» составил более 150 т топлива и полезных грузов. К станции были запущены 31 корабль «Союз» и 64 корабля «Прогресс», проведено девять стыковок кораблей «Спейс Шаттл». Система телеоператорного управления транспортными грузовыми кораблями при их стыковке со станцией стала неотъемлемой частью всех взаимодействующих с орбитальным комплексом беспилотных космических аппаратов (КА), благодаря этому повысилась надежность выполнения орбитальных маневров сближения и стыковки (рис. 2).

Главным достижением можно по праву считать опыт многолетнего широкомасштабного сотрудничества в космосе. На борту станции «Мир» работали 104 космонавта и астронавта из России, США, стран Европы и Азии, проведено более 31200 сеансов экспериментов по различным научным программам.



Рис. 3. Интернациональный экипаж станции «Мир» в составе десяти человек

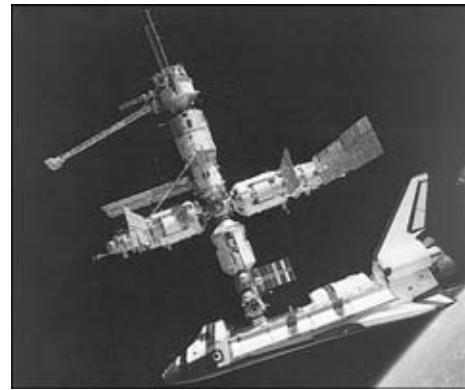


Рис. 4. Стыковка корабля «Спейс Шаттл» со станцией «Мир»

Станция «Мир» практически стала первой международной орбитальной научной лабораторией, а также своеобразным летным полигоном для испытаний в реальных условиях многих технических решений и технологических процессов, используемых на международной космической станции (МКС) (рис. 3):

впервые в мировой практике реализован модульный принцип строительства на орбите космических сооружений больших габаритов и массы (до 240 т); апробированы корабли «Союз», «Прогресс», «Спейс Шаттл» как транспортные средства для доставки экипажей, а также материально-технического снабжения пилотируемых комплексов (рис. 4);

отработана технология поддержания станции в работоспособном состоянии в течение длительного (15 лет) полета и приобретен опыт ликвидации нештатных ситуаций, обеспечения безопасности экипажа и живучести станции;

отработано взаимодействие международных экипажей в длительных полетах и технология совместного управления пилотируемыми космическими объектами из двух центров управления, расположенных в г. Королев (Россия) и г. Хьюстон (США). Все это позволило успешно выполнить начальный этап развертывания МКС массой свыше 180 т на околоземной орбите (рис. 5).

Говоря об орбитальных пилотируемых станциях «Салют», «Мир», МКС следует подчеркнуть принципиальную важность накопленного опыта проведения на орбите около 200 автоматических стыковок КА и модулей различных масс и размеров. Это открывает новые перспективы для создания орбитальных ракетно-космических комплексов с



Рис. 5. МКС (конфигурация 2003 г.)

громадными энергетическими возможностями, которые могут рассматриваться как серьезная альтернатива разрабатываемым сегодня ракетам «тяжелого» класса типа «Ариан-5». Благодаря использованию технологии стыковки на орбите можно по двухпусковой схеме с помощью надежной ракеты-носителя «Протон-М» доставить на геостационарную орбиту (ГСО) КА суммарной массой около 5,5 т (рис. 6). Следует отметить, что к работе над проблемой доставки на орбиту аппаратов указанной массы ученые в Европе только приступили. При использовании двухпусковой схемы эта задача решается значительно надежнее, чем в случае проведения однократного запуска с помощью недостаточно отработанной ракеты-носителя тяжелого класса. Печальным подтверждением тому стала авария ракеты «Ариан-5» 12 декабря 2002 г., когда во время запуска был «потерян» спутник стоимостью более 500 млн дол. США.

Освоение предлагаемой принципиально новой технологии выведения тяжелых КА по частям с последующей сборкой на любых рабочих орбитах, включая геостационарную, в настоящее время под силу только РКК «Энергия» им. С. П. Королева. Работа может быть проведена в короткие сроки с минимальным риском для решения практически любой целевой задачи в ближайшем десятилетии.

Еще одним успешно реализованным проектом, признанным в мире самым амбициозным проектом конца XX века, стало создание ракетно-космического комплекса морского базирования «Морской старт» (рис. 7).

Традиционно комплексы космического назначения, масса которых достигает, как правило, нескольких сотен тонн, а линейные размеры — десятки метров, базируются на наземных космодромах. Те из них, которые расположены в глубине материков, должны иметь значительные площади отчуждения земли. Сегодня Россия, например, отводит для падения первых ступеней из землепользования более 13 млн га площади, а Казахстан — более 5 млн га. Кроме того, космодромы должны иметь еще и серьезную социальную инфраструктуру. На сегодня страны мира располагают 15 наземными космодромами. В некоторых из них созданы стартовые площадки для ракет-носителей ближе к экватору и океану: космодромы Куру в Гвиане (Франция), на мысе Канаверал (США), Танегасима (Япония), Шрихарикота (Индия). Но полностью перенести стартовую площадку в акваторию Мирового океана никто не рисковал, поскольку пугали проблемы, возникающие при размещении космодрома на плавучем средстве.

Использование в качестве стартовых площадок для ракет-носителей плавучих платформ в акватории Мирового океана дает большие преимущества: можно осуществлять запуски КА в различных направлениях, в том числе на ГСО и сол-



Рис. 6. Стыковка двух разгонных блоков для создания на ГСО космического аппарата массой 5,5 т



Рис. 7. Ракетно-космический комплекс «Морской старт»

нечно-синхронную орбиты, при этом не надо отводить площади для «укладывания» первых ступеней. Качественно улучшается «энергетика запуска» за счет вращения Земли. В этих условиях ракета среднего класса «Зенит», способная вывести при запуске с космодрома Байконур на геостационарную орбиту КА массой 1 т, с плавучей платформы выводит почти трехтонный аппарат, т. е. возможности при запуске с экватора повышаются почти в 3 раза. А если использовать двухпусковую схему, то можно будет вывести на ГСО спутник массой 6 т, как и в случае применения такой же схемы для ракеты-носителя тяжелого класса «Протон», запускаемой с космодрома Байконур (рис. 8).

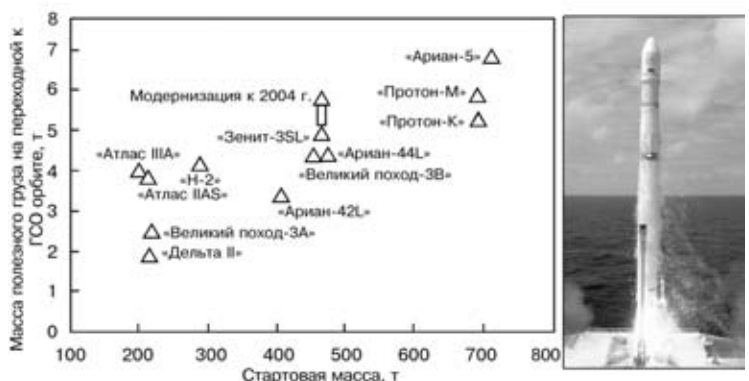


Рис. 8. Диаграмма средств выведения



Рис. 9. Запуск ракеты «Зенит-3SL»

Основной проблемой при этом являлась необходимость адаптации уже существующих наземных и ракетных комплексов к ограниченному по площади плавучим средствам, а также к эксплуатации в морских условиях (наличие влажности и соли). Надо уметь осуществлять запуск ракеты с колеблющейся на водной поверхности платформы, точно прицеливаться и определять координаты точки старта. Недопустимо, чтобы на плавучем средстве, где происходит запуск, в момент его выполнения находилась стартовая команда. Поэтому появляется еще одно обязательное требование: следует исполнять все в автоматическом режиме по командам, подающимся с другого судна. После проработки реализации этой заманчивой идеи всегда делалось одно и то же заключение: «... идея хороша, но труднореализуема из-за множества технических проблем, которые надо решить».

Когда в начале 1990-х годов в связи с распадом Советского Союза мы оказались перед реальной угрозой потери космодрома Байконур, коллектив РКК «Энергия» им. С. П. Королева вновь возвратился к идее создания плавучего стартового комплекса. В 1993 г. был выпущен концептуальный проект комплекса, который получил название «Морской старт». В период с 1993 по 1995 гг. высшему руководству страны неоднократно докладывалось о целесообразности начала таких работ в России. Не найдя поддержки в своем Отечестве, мы приложили усилия для организации международной кооперации для выполнения проекта. В результате многочисленных встреч, острых дискуссий мы смогли убедить наших будущих партнеров в правильности и целесообразности принятия концепции построения комплекса «Морской старт». В 1995 г. создана международная компания, куда вошли РКК «Энергия» им. С. П. Королева (РФ), «Боинг» (США), «Кварнер» (Норвегия) и ПО «Южное» (Украина).

Платформа, построенная в Норвегии и оснащенная стартовым оборудованием, изготовленным на Выборгском судостроительном заводе, в июне 1998 г. вышла в порт базирования Лонг-Бич. Всего на платформу было установлено около 2000 т стартового оборудования и электронной аппаратуры. Ответственность за его установку возлагалась на

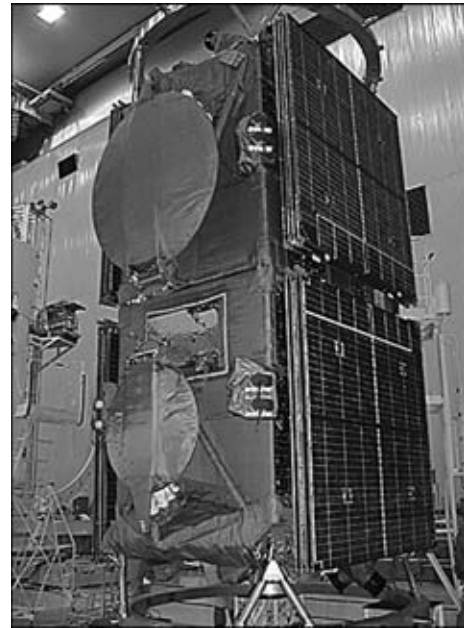


Рис. 10. Два спутника «Ямал-100»

РКК «Энергия» им. С. П. Королева. В нашей кооперации работало также около 30 организаций.

В состав комплекса также входит сборочно-командное судно (СКС), которое в порту служит плавучим сборочно-испытательным комплексом, а в районе старта — центром дистанционного управления подготовкой к запуску и осуществлению старта. Технический комплекс на СКС обеспечивает прием ракетных ступеней, разгонных блоков и КА, их стыковку и испытания, перегрузку собранной ракеты «Зенит-3SL» на стартовую платформу.

Строительство судна проводилось на верфи в г. Глазго (Шотландия), а оснащение ракетным оборудованием общей массой около 1500 т — в г. Санкт-Петербурге на Канонерском судостроительном заводе. На СКС размещены первоклассный монтажно-сборочный и испытательный комплекс подготовки трех ракет-носителей «Зенит-3SL» к запуску. В монтажно-испытательном корпусе (МИК) есть залы для подготовки КА, разгонных блоков, заправочная станция. Здесь же расположен центр управления полетом, который прекрасно оборудован, имеет современные средства отображения и все необходимое для подготовки к пуску. В рамках этого проекта, по сути, была создана совершенно новая трехступенчатая экологически чистая ракета-носитель «Зенит-3SL». После завершения подготовки ракетно-космического комплекса СКС и платформа переходят в район старта на экваторе с долготой $0^{\circ} 1'54''$ з. д. (вблизи о. Рождества).

По объему решенных задач проект «Морской старт» можно сравнить лишь с комплексом «Энергия-Буран», созданным в СССР в 1978–1988 гг.

28 марта 1999 г. был осуществлен демонстрационный запуск и выведение космического объекта «Демосат» на рабочую орбиту. Все прошло без каких-либо серьезных замечаний с высочайшей точностью и положило начало введению комплекса в эксплуатацию. Сегодня с ракетно-космического



Рис. 11. Примеры использования трехслойных композиционных материалов

комплекса «Морской старт» осуществлено уже восемь запусков КА (рис. 9). Этот комплекс занял достойное место в ряду эффективных современных средств выведения.

Не менее ярким примером проекта с внедрением новых технологических решений, реализованных в последние годы, безусловно, является создание телекоммуникационных платформ нового поколения «Ямал».

В начале 1990-х годов РКК «Энергия» им. С. П. Королева после тридцатилетнего перерыва со времени создания первого спутника связи «Молния-1» вновь вернулась к этой сфере производства. Мы сразу попытались выйти на современный технический уровень разработок спутников связи, а по некоторым конструктивным решениям, воплощенным в КА «Ямал-100» (рис. 10), даже превзошли зарубежные образцы. На это ушло более шести лет напряженной работы. При создании новых КА мы отошли от классического подхода, в том числе американского — осуществлять обновление аппарата не более чем на 30 %. В данном случае спутник был новым на все 100 %, т. е. мы шли на большой риск.

Что сегодня подразумевается под понятием новые технологии в области создания телекоммуникационных спутников? Прежде всего, это агрегатирование, которое позволяет нам автономно отрабатывать отдельные элементы и добиться высокой надежности и технологичности в сборочных операциях.

Мы полностью отказались от герметичных отсеков и связанных с этим систем терморегулирования с гидроблоками, прокачивающими жидкость (теплоноситель). Это продлило ресурс спутника с 2 до 10...15 лет, поскольку гидроблоки — это механизмы, которые имеют предельный срок службы 3...5 лет. Для конструкции корпуса и солнечных батарей мы стали использовать трехслойные композиционные материалы (рис. 11), причем



Рис. 12. Спутник «Ямал-200»

в корпусные панели были встроены тепловые трубы. Где нельзя было применить легкие и прочные композиты — применяли высокопрочный легкий металл.

Внедрение этих новых конструкторско-технологических процессов позволило на массе каждого аппарата получить выигрыш до 120 кг. С учетом того, что за один запуск ракеты-носителя «Протон» выводятся два аппарата «Ямал-100», суммарный выигрыш составил 240 кг. На основе уже созданной платформы «Ямал-100» разрабатываются более мощные версии этого аппарата — два КА «Ямал-200» (рис. 12). Аппараты такого класса вполне реально выводить на ГСО самой дешевой, надежной и экологически чистой ракетой-носителем типа «Союз», разработанной еще в 1950-е гг. За прошедшие 40 лет произведено около 2 тысяч запусков ракет этого типа. Пригодная для выполнения поставленной задачи модификация этой знаменитой ракеты-носителя получила название «Аврора». Сейчас идет выпуск документации на эту ракету, но пока за счет собственных средств РКК «Энергия» им. С. П. Королева (рис. 13).

Следует отметить также работы по созданию на околоземной орбите крупногабаритных солнечных отражателей. Это чисто российская технология, которая, безусловно, впишет яркую страницу в историю космонавтики XXI века. Эффективное использование таких отражателей для освещения отдельных участков Земли возможно, если их площадь составляет 5000... 10000 кв. м. Главные проблемы при создании этих отражателей — минимизация их массы и обеспечение автоматического развертывания из транспортного положения в рабочее. До недавнего времени решение этой задачи относили к области фантастики. Однако технологические достижения в материаловедении привели к созданию таких зеркал из полимерной металлизированной пленки, развертываемой в рабочее положение и поддерживающей необходимую форму с помощью центробежных сил, возникающих при вращении отражателя вокруг оси, перпендикулярной его плоскости.

В начале 1990-х годов коллектив РКК «Энергия» им. С. П. Королева приступил к практической реализации этой идеи. В 1993 г. в рамках демонстрационного эксперимента «Знамя-2» на ко-



Рис. 13. Ракетно-космический комплекс «Аврора»

рабле «Прогресс М-15» (рис. 14) был развернут двадцатиметровый тонкопленочный отражатель, с помощью которого осуществлялась подсветка выбранных участков Земли перед восходом Солнца. Анализ переданной на Землю телевизионной и телеметрической информации подтвердил правильность принятых технических решений и разработанных расчетных методик. В 1999 г. космический эксперимент с пленочным отражателем был повторен. Сегодня коллектив РКК «Энергия» им. С. П. Королева работает уже над созданием отражателей диаметром 60 и 200 м. Реализация задачи переотражения солнечного света на отдельные участки Земли имеет огромное практическое значение для высокоширотных районов Земли, а также при проведении работ в чрезвычайных ситуациях.

Еще одним ярким примером использования уникальных космических технологий, отработанных в составе пилотируемых комплексов, является создание тяжелых крупногабаритных платформ на ГСО как для решения телекоммуникационных задач, так и для всестороннего изучения Земли.

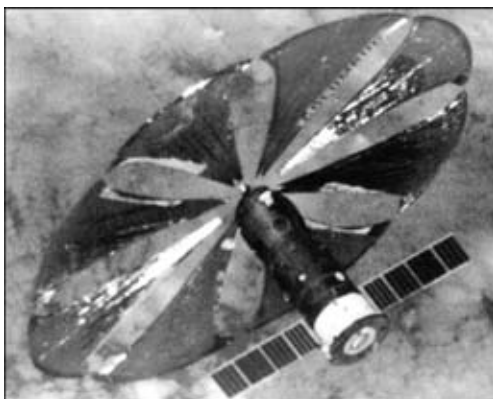


Рис. 14. Эксперимент «Знамя-2»

По своему назначению такие КА должны включать большие антенны диаметром до 30 м и протяженные ферменные конструкции длиной до 100 м. Разработка технических предложений, а по ряду аппаратов этого класса — эскизных проектов стали возможными только благодаря большому опыту создания совместно с ИЭС им. Е. О. Патона на станциях «Салют-7» и «Мир» трансформируемых ферменных конструкций шарнирно-рычажного типа длиной 15 м (рис. 15). Успешно проведенные работы по раскрытию и складыванию таких конструкций, в том числе и в автоматическом режиме, вселяют уверенность в правильности выбранных конструкторско-технологических решений и осуществимости пока еще кажущихся экзотическими проектов.

Получены обнадеживающие результаты в области создания разворачиваемых антенн большого диаметра от 6 до 30 м, не имеющих аналогов в мире (рис. 16). Так, например, размер упаковки антенны диаметром 30 м составляет в транспортном



Рис. 15. Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона шарнирно-рычажная ферма в составе многоразовой солнечной батареи станции «Мир»



Рис. 16. Разворачивание космического рефлектора на станции «Мир»

положении всего лишь 1500 (диаметр) на 2000 мм (длина), ее масса при этом не превышает 200 кг.

Эта совместная работа с грузинскими коллегами, завершившаяся в 1999 г. космическим экспериментом «Рефлектор» на станции «Мир» (рис. 17), открыла грандиозную перспективу для создания не только различных антенн, работающих в радио- и субмиллиметровом диапазонах длин волн, но и зеркал-концентраторов большого диаметра солнечных газотурбинных установок для крупных орбитальных комплексов, таких, например, как МКС.

Накапливая уникальный опыт создания крупных орбитальных комплексов, мы в течение многих лет проводили работы по исследованию концепций полета человека на Марс. Подобного опыта пока еще нет ни в одной стране. Главной проблемой при осуществлении пилотируемой экспедиции на Марс (рис. 18) является обеспечение приемлемого уровня безопасности экипажа как за счет высокого уровня резервирования систем и агрегатов, так и многократной отработки, в том числе в условиях Марса.

Высокая эффективность электрореактивных двигателей позволяет реализовать еще одно очень ценное преимущество проекта — на Землю возвращается не только экипаж в капсуле, но и весь корабль выходит на околоземную орбиту для пов-



Рис. 17. Антенна диаметром 6 м в свободном полете

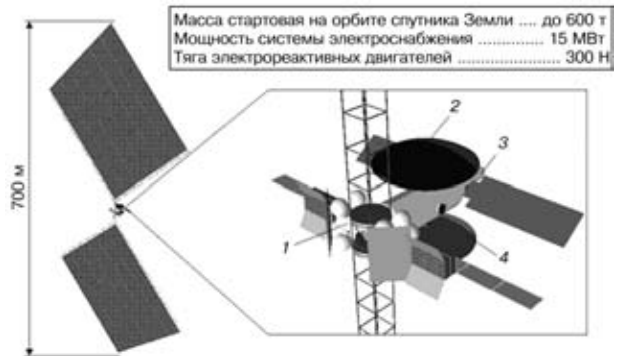


Рис. 18. Схема компоновки межпланетного экспедиционного комплекса для полета на Марс: 1 — солнечный буксир; 2 — взлетно-посадочный корабль; 3 — межпланетный орбитальный корабль; 4 — посадочный корабль

торного использования. Ресурс корабля составляет 15 лет. Корабль расходует за одну экспедицию только 15 % своего ресурса и после необходимых профилактических замен оборудования снова будет готов к полету.

Значительный путь к осуществлению экспедиции на Марс уже пройден. Технические решения будущей экспедиции отработывались при полетах станций «Салют» и «Мир» (рис. 19). Проведен огромный объем экспериментов по изучению поведения человеческого организма в условиях длительного космического полета. Почти полтора года работал на орбите космонавт-врач Валерий Поляков. Примерно столько же времени займет полет к Марсу.

Создана и прекрасно работает система автоматической стыковки, необходимая для последовательной сборки отдельных частей этого корабля по многопусковой схеме. На орбитальных станциях исследовались различные варианты разворачиваемых ферм («Маяк», «Опора», «Софора», «Рапана», «Тополь»), прообразов ферменных конструкций солнечного буксира (рис. 20).

Отработаны системы жизнеобеспечения замкнутого цикла по воде и кислороду. Эти важные компоненты теперь можно получать из воды и углекислого газа, выделяемых человеком, а не везти их с собой с Земли. Иными словами, техническая готовность к созданию межпланетного корабля очень высока и привлекательна с точки зрения, как безопасности экипажа, так и стоимости.

Необходимо отметить и те новые наукоемкие космические прорывные технологии, которые мы сегодня активно «опускаем на Землю». И таких случаев много. Например, с КБ «Рубин», возглавляемым академиком И. Д. Спасским, у нас есть совместные работы по созданию энергетической установки для дизельных подводных лодок, при этом в качестве основы был использован электрохимический генератор (ЭХГ) (рис. 21), разработанный нами для многофазовой космической системы «Энергия-Буран»; с коллективом «Автоваз» проведена работа по созданию электромобиля (рис. 22) на базе ЭХГ, что является очень перспективным направлением.

Было бы несправедливым не отметить давнее и плодотворное сотрудничество между РКК «Энер-

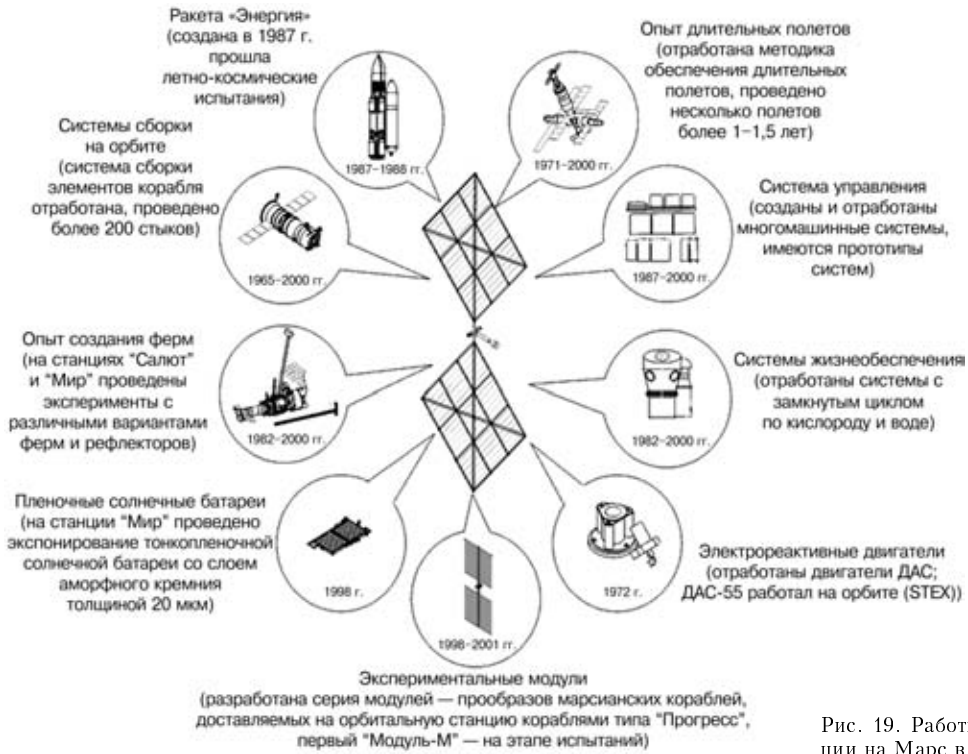


Рис. 19. Работы по подготовке экспедиции на Марс в России

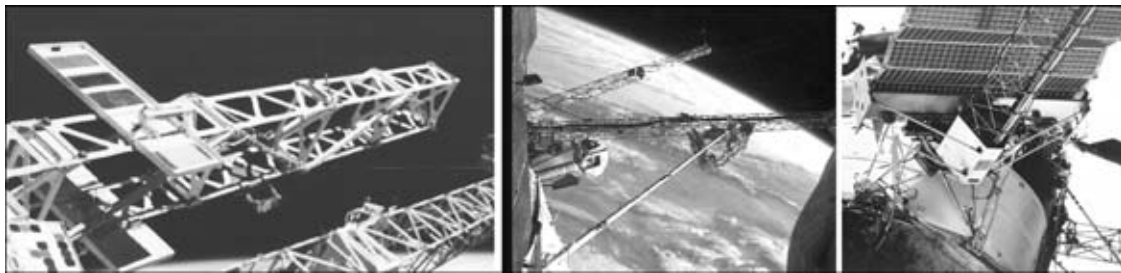


Рис. 20. Прообразы разворачиваемых ферменных конструкций для солнечного буксира, испытанные на станции «Мир»

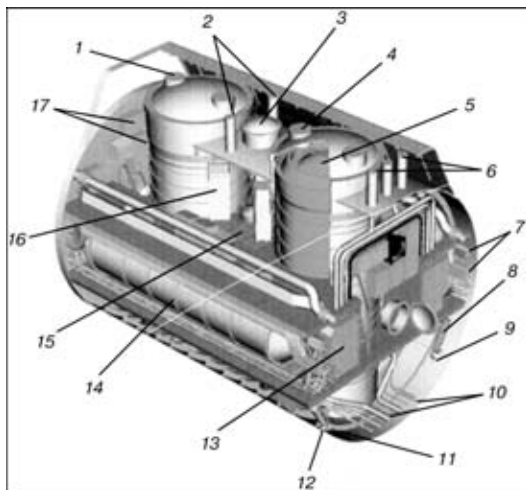


Рис. 21. Электрохимический генератор для дизельной подводной лодки: 1 — технологический люк; 2 — люки вентиляции выгородок; 3 — погрузочный люк; 4 — люк заправки водородом; 5 — блок хранения водорода; 6 — люки заправки кислородом; 7 — транзитные кабели; 8 — блок аварийного дренажа водорода; 9 — блок управляемого дренажа водорода; 10 — транзитные трубопроводы; 11 — блок управляемого дренажа кислорода; 12 — блок аварийного дренажа кислорода; 13 — блок кислородной арматуры; 14 — блок хранения кислорода; 15 — энергоблок ЭХГ; 16 — блок управления ЭХГ; 17 — стойки системы управления

гия» им. С. П. Королева и ИЭС им. Е. О. Патона в области главной темы данной международной конференции — сварки и ресурса конструкций. О первой в мире установке «Вулкан», испытанной в 1969 г., а также о других пионерских экспериментах по отработке технологий электронно-лучевой сварки с использованием ручного универсального инструмента на станции «Салют-7» широко известно всем специалистам. Результаты неоднократно и подробно докладывались на многих конференциях. Очень жаль, что на станции «Мир» нам так и не удалось провести впечатляющий по



Рис. 22. Презентация электромобиля с ЭХГ

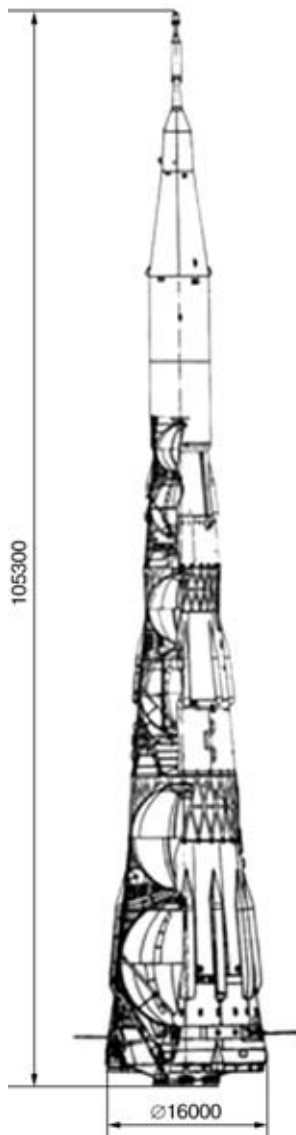


Рис. 23. Ракета-носитель Н-1

сложности и поставленным задачам эксперимент «Флагман» со сварочным инструментом нового поколения «Универсал».

Особо следует отметить исключительно важную роль ИЭС им. Е. О. Патона в разработке технологических процессов сварки топливных баков толщиной 10,6 мм и диаметром 12,8 м для ракеты-носителя Н-1, созданной на нашем пред-

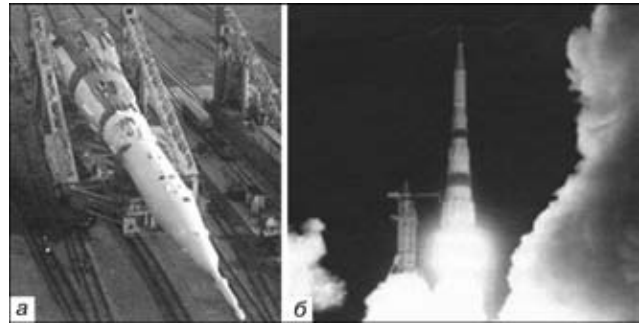


Рис. 24. Ракетно-космический комплекс Н1-Л3 в пути на стартовый комплекс (а) и в полете (б)

приятию (рис. 23 и 24). Эта уникальная работа была проведена в 1965 г. и с тех пор, благодаря сотрудничеству со специалистами ИЭС им. Е. О. Патона, у нас больше не возникает проблем по сварке как в космосе, так и на Земле.

Сегодня на заводе внедрены и широко применяются следующие сварки: лазерным лучом для герметичных корпусов приборов и арматуры; аргонодуговая в инертных газах с контролируемой атмосферой; автоматическая в вакуумной камере баллонов высокого давления из титановых сплавов; трением разнородных биметаллических материалов. Для изготовления баков пилотируемых и грузовых транспортных кораблей, разгонных блоков и других изделий из алюминиевых сплавов используется аргонодуговая сварка.

В заключение следует особо отметить, что все рассмотренные проекты реализованы и реализуются не в экономически стабильной стране при всесторонней поддержке государства, а в условиях экономического кризиса. Это стало возможным только благодаря высокому потенциалу производственной базы, созданной еще в Советском Союзе, сохраненной и развивающейся благодаря самоотверженному труду коллективов, работающих в условиях, близких к экстремальным. Сегодня ракетно-космическая отрасль является одной из немногих (если не единственной), которая демонстрирует примеры не только выживаемости в сложившихся экономических условиях в России и сохранения традиционных связей с организациями, оказавшимися в настоящее время за рубежом, но и закладывает основы для развития новейших космических наукоемких технологий XXI века.

The paper presents the scientific-technical achievements of S. P. Korolyev RSC «Energia» over the last decade as an illustration of the advances of the aerospace industry in the international market of advanced science-intensive technologies with the view to space mastering in the XXI century. These achievements would be unthinkable without solving the multi-faceted problems of welding in cooperation with the E. O. Paton Electric Welding Institute as the leading organization in this field.

Поступила в редакцию 21.03.2003



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ШВА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

Д. Л. ОЛСОН, Э. МЕТЦБАУЭР (Исследовательская лаборатория ВМФ США, г. Вашингтон, США),
С. ЛИУ, И. Д. ПАРК (Горная школа Колорадо, г. Голден, шт. Колорадо, США)

Рассмотрены особенности фазовых превращений в низкоуглеродистых и низколегированных швах повышенной прочности. При прогнозе свойств металла швов важен не только учет их химического состава, но и скорости охлаждения $\Delta t_{9/5}$, содержания кислорода, особенностей кристаллизации, а также включений. Предложены эмпирические выражения для прогнозирования механических свойств металла швов, в том числе полученных в условиях многопроходной сварки. Обсуждается аналитический подход, позволяющий быстро выбрать состав расходного материала для сварки определенных сталей.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные стали, металл шва, углеродный эквивалент, кислород, кристаллизация, термическое влияние, многопроходные швы, изотермические диаграммы, прогнозирование свойств

Первые аналитические выражения, связанные с прогнозированием свойств швов и выбором сварочных параметров, базировались, главным образом, на их химическом составе. Они являлись приближенными и использовались при выборе параметров предварительной и/или последующей термообработки, необходимой для улучшения свариваемости и получения необходимых свойств [1, 2]. Эти математические средства, связанные с химическим составом, коррелировали только с результатами для одного и того же класса углеродистых сталей, одинаковой толщины листа и определенных сварочных параметров (обычно для сварки МИГ). Появление низкоуглеродистых сталей повышенной прочности, обладающих свойствами, основанными на механизмах упрочнения, отличных от обычного распада аустенита, обусловило необходимость в новых предикативных выражениях. Поскольку производительность новых сварочных процессов повышается, возникает необходимость включения в них такого технологического параметра, как скорость охлаждения [3].

Благодаря новому пониманию взаимосвязи между параметрами сварочного процесса, химическим составом, микроструктурой и свойствами металла шва (МШ), а также наличию новых статистических и нейросетевых аналитических подходов [4–6], выбор расходных сварочных материалов может основываться на количественном (расчетном) подходе. Желательна возможность быстрого выбора химического состава расходных сварочных материалов для сварки определенных сталей с определенной термической предисторией.

Для улучшения понимания процесса совершенствования прогнозирования свойств описаны особенности этих аналитических методов.

Углеродный эквивалент. Уравнения углеродного эквивалента являются выражениями для определения прокаливаемости и изначально были предложены для среднеуглеродистых сталей, у ко-

торых эвтектоидный распад является превращением первичной фазы с образованием мартенсита в качестве основного продукта в процессе быстрого охлаждения. Эти уравнения являются эмпирическими и объясняют влияние легирующих элементов на превращения в сталях, а также успешно используются для прогнозирования свариваемости различных типов сталей. Это объясняется имеющей корреляцией между содержанием легирующих элементов и склонностью сварных соединений к образованию трещин в процессе сварки. С целью иллюстрации уравнения прогнозирования свариваемости приведем уравнение углеродного эквивалента (формула МИС):

$$C_{\text{экр}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}. \quad (1)$$

Сварка сталей, в которых углеродный эквивалент больше 0,45 мас. % обычно выполняется с предварительным подогревом. Если он более 0,55 мас. %, для получения качественного шва рекомендованы как предварительная, так и последующая термообработка. Еще одно выражение углеродного эквивалента, определяющее связь между склонностью к образованию трещин и химическим составом стали, — уравнение индекса склонности к образованию холодных трещин $P_{\text{см}}$ (Ито–Бессю). Оно включено в Стандарты по сварке строительных конструкций D1.1. Американского сварочного общества [1, 2] в качестве средства для контроля содержания водорода и имеет вид

$$P_{\text{см}} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5B. \quad (2)$$

Уравнение (2) хорошо подходит к сталям с низким содержанием углерода (обычно < 0,1 мас. %). Стали с $P_{\text{см}} = 0,2$ мас. % или ниже обладают хорошим сопротивлением к образованию трещин в шве.

Несмотря на то что приведенные выше уравнения обычно применяют по отношению к металлу ЗТВ деформируемых материалов, неясно, можно ли с помощью этих формул прогнозировать свойства и поведение при превращениях в МШ. Ожидается, что пластинчатый мартенсит с высоким



содержанием углерода не будет преобладать в микроструктуре МШ, а в процессе термического цикла сварки могут формироваться выделения, обусловленные микролегированием стали. Кроме того, кристаллизация и частицы вторичной фазы (включения) также будут влиять на реакции превращения в твердом состоянии МШ. Известно, что оксидные включения способствуют зарождению внутризеренных центров феррита и снижают прокаливаемость. Существующие выражения углеродного эквивалента не учитывают должным образом роль оксидных включений в МШ, что необходимо исправить, прежде чем уравнения углеродного эквивалента можно будет использовать для надежного прогнозирования микроструктуры и свойств МШ. Кроме того, если уравнения углеродного эквивалента должны быть усовершенствованы для прогнозирования свойств МШ, они также должны учитывать влияние параметров сварки (например, скорость охлаждения в температурном интервале 800...500 °С).

Выведенные фундаментально предикативные уравнения [7–9] учли как термодинамический, так и кинетический подходы. Для термических превращений (таких, как образование феррита, где фазовое равновесие можно выразить как $\Delta G_{\gamma-\alpha}$) влияние микроструктуры на $C_{\text{экв}}$ может быть выражено следующим образом:

$$C_{\text{экв}} = K_0 [C + K_{\text{Mn}} \text{Mn} + K_{\text{Si}} \text{Si} + \dots + K_{\text{C}} \text{ClnC} + K_{\text{Mn}} \text{MnlnMn} + K_{\text{Si}} \text{SilnSi} + \dots], \quad (3)$$

где K_0 — коэффициент пропорциональности; K_i — коэффициенты различных легирующих добавок, подлежащие фундаментальной интерпретации; Mn, Si, C, ... — концентрации различных элементов, мас. %.

Данное выражение основано на предположении, что роль микроструктуры непосредственно связана с количеством легирующих элементов, присутствующих в начальной и превращенной фазах. В уравнении (3) присутствуют как линейные, так и нелинейные члены. Если пренебречь нелинейными членами, уравнение упрощается до формы, подобной уравнению углеродного эквивалента МИС. Для низколегированных сталей пренебрежение нелинейными членами может быть приемлемым, поскольку коэффициенты можно подбирать с целью компенсации пренебрежения нелинейными членами. Однако очевидно, что для более легированных систем при отсутствии нелинейных членов некоторые данные о влиянии микроструктур и при легировании могут быть утрачены.

Если предположить, что углеродный эквивалент может быть непосредственно связан с термодинамической движущей силой, действующей на перенос углерода, уравнение для $C_{\text{экв}}$ приобретает вид

$$C_{\text{экв}} = K'_0 C [1 + K'_C C + K'_{\text{Mn}} \text{Mn} + K'_{\text{Si}} \text{Si} + \dots]. \quad (4)$$

Следует отметить, что данное уравнение в отличие от (3) представлено в виде мультипликативного соотношения и учитывает взаимодействие

между углеродом и другими легирующими элементами. Наличие членов, описывающих взаимодействие, обоснованно, поскольку каждая легирующая добавка влияет на поведение углерода и, таким образом, должна быть представлена в виде произведения с углеродом. Эта форма уравнения углеродного эквивалента лучше подходит для низкоуглеродистых микролегированных сталей, в которых происходит выделение карбонитридов. Для паравывесного состояния, при котором происходит перераспределение углерода, выведено выражение вида

$$C_{\text{экв}} = K''_0 C \left[1 + K''_C C + K''_{\text{Mn}} \text{Mn} + K''_{\text{Si}} \text{Si} + \dots + K''_{\text{C}} \text{lnC} + K''_{\text{LC}} \text{ClnC} + K''_{\text{LMn}} \text{MnlnMn} + K''_{\text{LSi}} \text{SilnSi} + \dots \right]. \quad (5)$$

Это уравнение также отличается от обычно используемой формы выражений углеродного эквивалента (3) и (4). Члены, выражающие взаимодействие между элементами, содержат натуральный логарифм концентрации элементов. Последние три члена наиболее важны, когда имеются изменения в значениях легирующих микродобавок. Отсутствие этих членов может вызвать трудности при установлении соотношения между свойствами микролегированных сталей повышенной прочности и химическим составом.

Несмотря на то что приведенные выше уравнения обычно применяются по отношению к металлу ЗТВ деформируемых материалов, неясно, можно ли с помощью этих формул прогнозировать свойства и поведение при превращении в МШ. Кристаллизация и частицы вторичной фазы, такие, как включения, также будут влиять на реакции превращения в твердом состоянии МШ. Помимо элементов, учтенных в уравнениях (1), (5), в эти формулы также необходимо включить содержание кислорода для повышения их эффективности при прогнозировании свойств МШ.

Роль кислорода в МШ. Швы обычно усваивают кислород до уровней нескольких сотен млн^{-1} , а затем раскисляются до уровней содержания кислорода около 200млн^{-1} , при этом формируются оксидные включения. Включения в МШ, которые образуются в результате окисления легирующих элементов, являются важным фактором влияния их на микроструктуру МШ на низкоуглеродистых сталях высокой прочности. Для получения желаемой микроструктуры и свойств МШ необходимо контролировать тип, гранулометрическое распределение и плотность включений в МШ. В выражения углеродного эквивалента должен быть включен кислородный член (или члены), при этом значения коэффициентов будут зависеть от типа формирующихся включений (типа расходуемого материала). Откорректированный коэффициент P_{cm} [10], называемый в данном случае P_{cm_0} , имеет вид

$$P_{\text{cm}_0} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cr} + \text{Cu}}{20} + \frac{\text{V}}{10} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{Ni}}{60} + 5\text{B} - \frac{3}{4}\text{O}. \quad (6)$$



По сравнению с исходным уравнением P_{cm} уравнение (6) включает кислородный член, который равен $-0,75$ концентрации кислорода в МШ.

Предполагают [7–9], что для МШ на низкоуглеродистых микролегированных сталях желаемое гранулометрическое распределение включений должно быть таким, при котором максимум гранулометрического распределения превышает диаметр зереневских частиц. Что касается МШ сталей с высокой прочностью, обнаружено [11], что бимодальное гранулометрическое распределение включений является наилучшим для получения наименьшего размера аустенитного зерна и наименьших пакетов пластинчатого мартенсита. Это условие обеспечило бы оптимальную вязкость МШ при данном уровне прочности. Важно понимание принципов регулирования химического состава металла сварочной ванны, если необходимо обеспечить стабильное получение нужного типа, гранулометрического распределения и количества включений в определенном диапазоне погонной энергии.

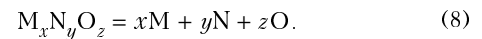
Роль кристаллизации при формировании включений. В процессе ячеистой или дендритной кристаллизации, которая обычно наблюдается в швах сварных соединений на стали, растворенные элементы ликвируют в жидкую фазу на поверхности раздела жидкость–твердое тело, при этом концентрация жидкой фазы обогащенной растворенными элементами может достигать высоких уровней в междендритных пространствах (рис. 1). При дендритной кристаллизации можно предположить, что диффузия в жидкой фазе происходит в полном объеме в междендритных пространствах, а диффузия в твердой фазе происходит только в твердорастворном веществе с высоким коэффициентом диффузии. Если пренебречь диффузией в твердой фазе, химический состав в жидкой фазе на поверхности раздела жидкость–твердое тело можно моделировать [12] с помощью неравновесного правила рычага или уравнения Шейла:

$$C_L = C_0 f_L^{K-1}, \quad (7)$$

где C_L — концентрация в жидкой фазе на поверхности раздела; C_0 — объемная концентрация в сварочной ванне; K — коэффициент равновесного распределения.

При необходимости уравнение можно преобразовать таким образом, чтобы оно учитывало диффузию в твердой фазе. Коэффициент равновесного распределения K контролирует направление и степень ликвации. Для большинства легирующих элементов в стали коэффициент распределения составляет меньше единицы и элемент ликвирует в междендритную жидкую фазу. Некоторые приблизительные значения K различных растворенных элементов в низколегированных сталях [13] приведены ниже: С — 0,17; Si — 0,80; Mn — 0,70; Al — 0,95; Ti — 0,50; В — 0,001; O — 0,01; S — 0,20; N — 0,04.

Рассмотрим равновесие в условиях раскисления, как представлено реакцией растворения оксида:



Изменение свободной энергии, связанное с растворением оксида $M_x N_y O_z$, можно записать в виде

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[M]^x [N]^y [O]^z}{[M_x N_y O_x]}, \quad (9)$$

где $[M]$, $[N]$, $[O]$ — активность растворенных элементов в жидкой фазе; x , y , z — стехиометрические постоянные из уравнения (8); $[M_x N_y O_x]$ — активность определенных включений (можно предположить, что она равна единице).

Свободная энергия зависит от оставшейся жидкой фракции

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[\gamma_M M_0 f_L^{K_M-1}]^x [\gamma_N N_0 f_L^{K_N-1}]^y [\gamma_O O_0 f_L^{K_O-1}]^z}{[M_x N_y O_x]}, \quad (10)$$

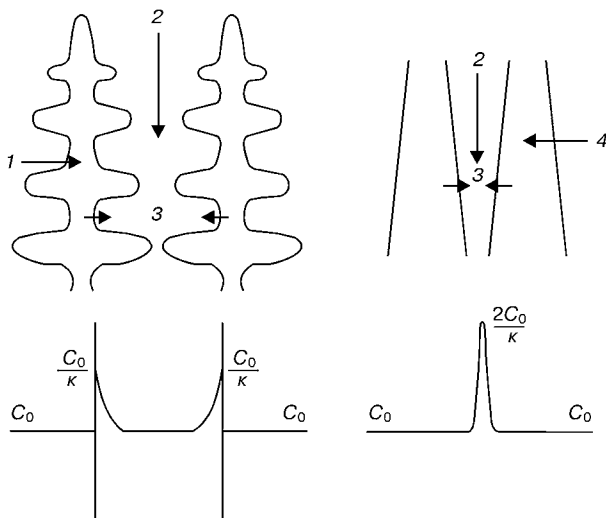


Рис. 1. Схема повышения концентрации растворенных элементов в междендритных участках сварочной ванны: 1 — ось первичного дендрита; 2 — междендритное пространство; 3 — уплотнение дендрита; 4 — ось дендрита

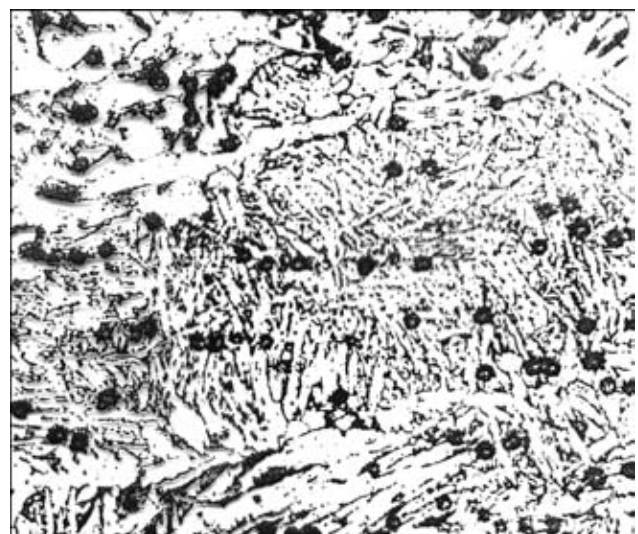


Рис. 2. Микроструктура металла шва с неметаллическими включениями в междендритных участках [14]

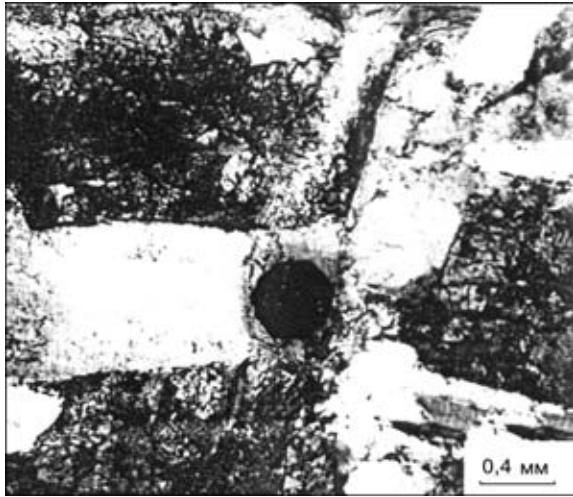


Рис. 3. Микроструктура металла шва в сварных соединениях низколегированных сталей высокой прочности с оксидами, сформировавшимися в жидкой фазе, и зародышами игольчатого феррита

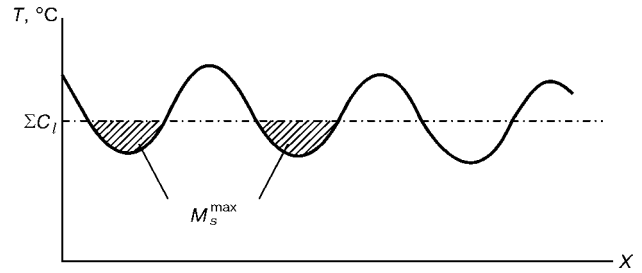


Рис. 4. Изменения температуры начала образования мартенсита M_s вследствие локального изменения концентрации растворенных элементов (M_s^{max} – самое высокое значение)

высоким содержанием кислорода, выраженное в формировании рядов внутризеренных оксидных включений, которые сформировались в растворенном веществе в междендритных пространствах. Сформировавшиеся в последнюю очередь оксиды способствуют образованию мелкоигольчатого феррита в МШ (рис. 3). Эту микроликвацию необходимо учесть в будущих предикативных выражениях, учитывающих микроструктуру и свойства МШ.

Изменения химического состава вследствие микросегрегации в низколегированных сталях

Химический элемент	K	Доля твердой фазы при кристаллизации, %							
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	
Al	0,95	0,040	0,040	0,041	0,043	0,043	0,045	0,047	
Ti	0,50	0,030	0,034	0,039	0,067	0,067	0,095	0,134	
Si	0,80	0,500	0,523	0,554	0,690	0,690	0,797	0,910	
B	0,001	0,005	0,006	0,008	0,025	0,025	0,050	0,100	
Mn	0,70	0,150	1,600	1,750	2,430	0,243	2,990	3,680	
O	0,01	0,0006	0,0008	0,0015	0,0030	0,0030	0,0059	0,0117	

где $[M_0]$, $[N_0]$, $[O_0]$ – объемная концентрация M, N и O в расплаве; $[\gamma_M]$, $[\gamma_N]$ и $[\gamma_O]$ – коэффициенты активности растворенных элементов.

Именно это выражение свободной энергии (10) позволяет прогнозировать образование внутризеренных включений в МШ.

На рис. 2 показано влияние ликвации в МШ сварных соединений низкоуглеродистых сталей с

Последовательность реакций раскисления можно прогнозировать исходя из допущений, что сварочная ванна достигает равновесия при наличии наиболее сильного раскислителя и что внутридентритные концентрации кислорода и раскислителей повышаются за счет микросегрегации в процессе кристаллизации до точки превышения предела растворимости. По мере кристаллизации от 0 до 95 % (жидкая фракция от 1,0 до 0,05) междендритная концентрация кремния увеличивается на 50, марганца – на 100 %, кислорода – в 8 раз, концентрация алюминия практически не увеличивается. Резкое повышение междендритной концентрации кислорода по мере кристаллизации должно вызвать выделение в МШ дополнительных оксидов [15]. В таблице приведены изменения химического состава вследствие ликвации, определенные с помощью уравнения Шейла.

На рис. 4 схематически показаны внутризеренные изменения содержания легирующей добавки в

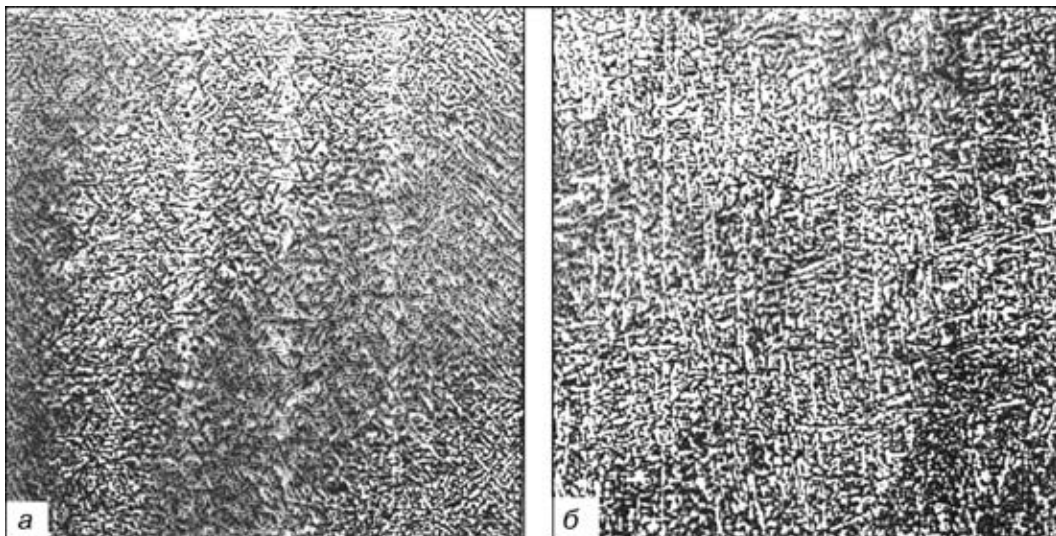


Рис. 5. Микроструктура металла шва в соединениях неотпущенной (а) и отпущенной (б) стали марки AISI 4340 с использованием флюса $40SiO_2-20MnO-40CaO$ [17], X500



МШ. Выражение для начала образования мартенсита в МШ [16] имеет следующий вид: $M_s(C) = 521 - 14,3Cr - 17,5Ni - 28,9Mn - 37,6Si - 350C - 39,5Mo - 1,19(CrNi) + 23,1(Cr + Mo)C$. Изменение химического состава по зерну в МШ должно коррелировать с поведением мартенсита. На рис. 5 показаны микроснимки, на которых видны полоски мартенсита отпуски и неотпущенного мартенсита в междендритных пространствах МШ на стали марки AISI 4340. Эти особенности свидетельствуют о микросегрегации растворенных элементов в МШ на сталях высокой прочности.

Термическое влияние. Большинство выражений углеродного эквивалента зависят только от химического состава и не учитывают термообработку и «вид» закалки. Толщина пластины, подготовка кромок, предварительный подогрев и значение погонной энергии процесса влияют на скорость охлаждения. Время охлаждения от 800 до 500 °С ($\Delta t_{8/5}$) является дополнительным способом описания скорости охлаждения сварного соединения и используется для сравнения термического цикла сварки с приемлемой термической «предысторией», за счет которой достигаются определенные свойства. Были введены выражения для прогнозирования свойств, учитывающих $\Delta t_{8/5}$.

Формула расчета твердости металла ЗТВ, учитывающая химический состав легирования и скорость охлаждения [18], имеет вид

$$HV = 2019[(1 - 0,5\log \Delta t_{8/5})C + 0,3(C_{\text{экрВ}} - C)] + 66(1 - 0,8\log \Delta t_{8/5}). \quad (11)$$

Выражение углеродного эквивалента, описывающее свариваемость низкоуглеродистых сталей и включающее $\Delta t_{8/5}$ в качестве дополняющего члена, приведено в работе [19]. Максимальная твердость металла ЗТВ связана с химическим составом легирования и скоростью охлаждения следующим образом:

$$H_{\text{max}} = 442C + 99C_{\text{экрВ}} + 206 - (402C - 90C_{\text{экрВ}} + 80)\arctg(x), \quad (12)$$

где

$$x = \frac{(\log \Delta t_{8/5} - 2,30C_{\text{экрВ}} + 1,35C_{\text{экрВ}} + 0,882)}{(1,15C_{\text{экрВ}} - 0,673C_{\text{экрВ}} - 0,601)}, \quad (13)$$

$$C_{\text{экрВ}} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr}{8} + \frac{Mo}{4} + \Delta H,$$

$$C_{\text{экрВ}} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2,5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3},$$

$$C_{\text{экрВ}} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4},$$

$$\Delta H = 0 \quad \text{при } B \leq 1 \text{ млн}^{-1},$$

$$\Delta H = 0,03f_n \quad \text{при } B = 2 \text{ млн}^{-1},$$

$$\Delta H = 0,06f_n \quad \text{при } B = 3 \text{ млн}^{-1},$$

$$\Delta H = 0,09f_n \quad \text{при } B \geq 4 \text{ млн}^{-1},$$

$$f_n = (0,02 - N)/0,02; \quad N - \text{содержание азота, мас. \%}$$

Приведенная выше система уравнений из [19] наилучшим образом подходила для оценки свойств металла ЗТВ при комплексных исследованиях, включавших более 25 зависимостей углеродного эквивалента [3, 20]. При прогнозировании механических свойств МШ были рассмотрены как прокаливаемость, так и участок термического цикла сварки в диапазоне $\Delta t_{8/5}$.

Приближенно определить $\Delta t_{8/5}$ можно с помощью решения Розенталя для условий нагрева при сварке [21]. Величина $\Delta t_{8/5}$ связана с погонной энергией H с помощью уравнений

$$\Delta t_{8/5} = 8,149 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\eta H}{2\pi k_{\text{тп}}} \right), \quad (14)$$

$$\Delta t_{8/5} = 2,767 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\eta H^2}{4h^2 \pi k_{\text{тп}} \rho C_p} \right), \quad (15)$$

где η и H — КПД и погонная энергия процесса сварки; $k_{\text{тп}}$, ρ и C_p — соответственно теплопроводность, удельный вес и удельная теплоемкость материала; h — толщина листа.

Уравнение (14) рассчитано на условия трехмерной теплопередачи (как при сварке толстых листов), в отличие от уравнения (15), рассчитанного для двумерного теплового потока при сварке тонких пластин. Очевидно, что для оценки микроструктуры и механических свойств низколегированных сталей высокой прочности необходимо учитывать влияние легирующих элементов, кислорода, параметров сварки и скорости охлаждения.

Многопроходные швы. Значительную часть швов ответственного назначения составляют многопроходные швы. При этом процесс сварки включает наплавление валика на предварительно наплавленный металл, ЗТВ образуется в предварительно наплавленном металле. Образующаяся макроструктура наиболее характерна для сварки металла больших сечений, таких как биметаллы. Изменения химического состава и микроструктуры не существенно влияют на свойства между проходами сталей меньшей прочности, а полученные свойства, несмотря на то, что они изменяются, остаются на уровне приемлемых значений по всему металлу многопроходного шва. Ситуация изменяется в случае сварных изделий, выполненных многопроходной сваркой на сталях повышенной и высокой прочности, где происходят потенциально значительные изменения в твердости по всему металлу многопроходного шва.

Для низколегированных сталей высокой прочности тщательный подбор легирующих элементов, добавляемых в расходные сварочные материалы, обуславливает возможность формирования фазовых выделений в наплавленных валиках при различных термических циклах [22]. Таким образом, когда одна выделившаяся фаза перестраивается под влиянием последующего прохода, другая находится в начальном состоянии формирования. Такой механизм выделения фаз способствует сохранению достаточной концентрации и необходимого гранулометрического распределения выделений, за счет чего по всему изделию, выполненному

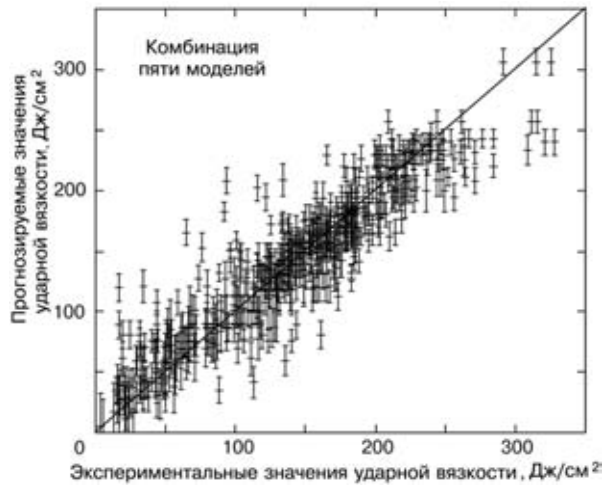


Рис. 6. Сопоставление прогнозируемых и измеренных значений ударной вязкости по Шарпи при температуре -51°C

многопроходной сваркой, достигается уровень довольно однородной твердости и соответственно прочности. Создана широкая база данных свойств наплавленных многопроходной сваркой швов на сталях с систематическими изменениями определенных легирующих добавок [23–25]. Разработка методик прогнозирования свойств МШ должна учитывать поведение неоднородной микроструктуры по всему многопроходному шву. В связи с необходимостью во введении и применении биметаллических материалов требуется разработка концепции для выбора химического состава расходных сварочных материалов, благодаря чему МШ обладает практически однородными свойствами.

Численный анализ. Интернациональные исследования включали разработку численного детерминированного анализа и расчетов, которые позволяют моделировать различные атомарные механические процессы, протекающие при сварке (пирохимия, кристаллизация, превращения в твердой фазе): от поведения сварочной ванны до превращений в твердой фазе [26]. Эти исследования расширили понимание происходящих на атомном

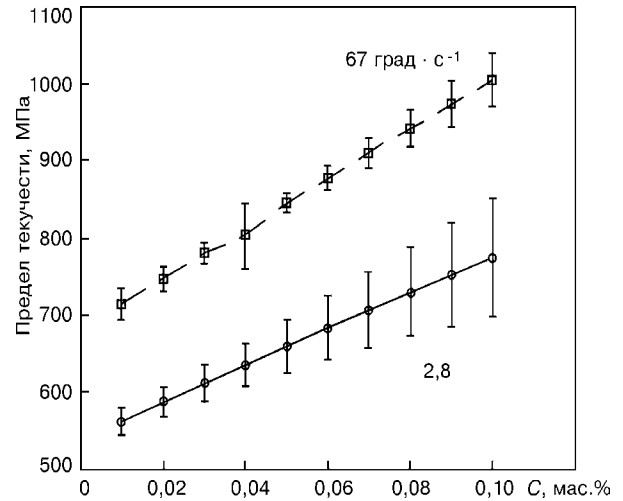


Рис. 7. Изменения предела текучести в зависимости от содержания углерода при двух различных скоростях охлаждения

уровне процессов и со временем приведут к более комплексным методам прогнозирования микроструктуры и свойств. Однако этот фундаментальный подход все еще имеет ограничения, связанные с недостатком информации, касающейся химического и физического аспектов свойств швов различных составов и свойств сталей, и комплексной вычислительной методики, слишком сложной для передачи ее сварщику-практику. Использование усовершенствованных экспериментальных корреляционных методик прогнозирования микроструктуры и свойств МШ по-прежнему является наиболее рациональным подходом. При наличии достаточной совокупности экспериментальных коррелируемых данных использование нейросетевого регрессивного анализа способствовало значительному усовершенствованию прогнозируемости свойств. Необходимы специальные исследования для получения большего количества экспериментальных коррелируемых данных по МШ на сталях высокой прочности.

Свойства металла шва. Разработаны эмпирические выражения для прогнозирования твердости

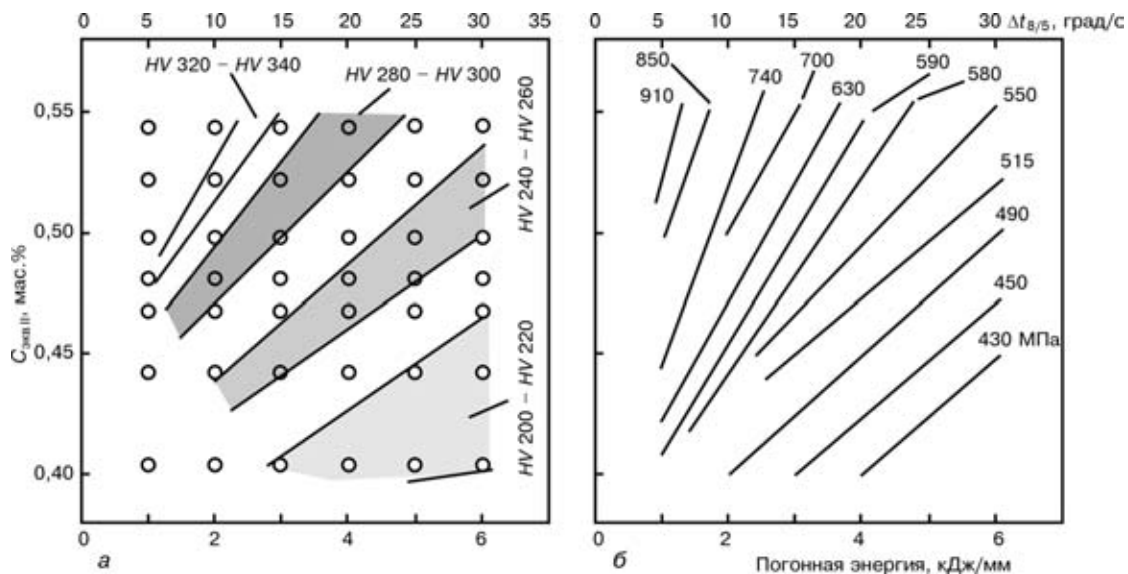


Рис. 8. Диаграмма изотвердости (а) и изопрочности (б) для низколегированных сталей



[27], предела текучести и предела прочности при растяжении [6, 28], пластичности и вязкости [4, 5] МШ на низкоуглеродистых и низколегированных сталях повышенной прочности. Были использованы и сравнены различные подходы, включая статистический и нейросетевой анализ.

В работах [4, 5] использовано большое количество экспериментальных данных по сварке сталей высокой прочности, применяемых при изготовлении морских платформ стратегического назначения, для разработки искусственных нейронных сетей для прогнозирования прочности и вязкости. Эти данные обеспечили возможность создания количественной модели для оценки механических свойств МШ. Нейронная сеть способна реализовать множество нелинейных соотношений. Данные в нее вводятся в форме параметров ввода (химический состав и скорость охлаждения) и вывода (желаемое качество), оптимальное нелинейное соотношение находится путем минимизации разницы между измеренным и прогнозированным значением. Как и при регрессионном анализе, результаты содержат ряд весовых коэффициентов и спецификации рода функции, которая в сочетании с весом сопоставляет входы и выходы. Прогнозируемость нейросетевого анализа повышается благодаря использованию комбинаций наилучших моделей для прогнозирования. Затем лучшие модели ранжируются с использованием значений погрешностей испытания. Пример прогнозирования с помощью лучшей модели показан на рис. 6, где прогнозируемые и экспериментальные данные ударной вязкости по Шарпи образцов с V-образным надрезом были измерены при -51°C в МШ на низкоуглеродистых сталях [4, 5]. При задании нейронной сети прогнозирование определенного свойства может выполняться в зависимости от каждого параметра ввода в отдельности или в комбинации с другими параметрами ввода. Например, рис. 7 иллюстрирует изменение предела текучести в зависимости от содержания углерода при двух различных скоростях охлаждения и четко показывает нелинейность прогнозирования и взаимозависимость переменных.

Изотермические диаграммы. Использование изодиаграммы, коррелирующей термическую историю и прокаливаемость с микроструктурой МШ, может быть очень эффективно при выборе расходных сварочных материалов для различных режимов сварки, погонной энергии и химического состава легирования. В работе [29] использованы диаграммы углеродный эквивалент — $\Delta t_{8/5}$ для прогнозирования свойств МШ. На рис. 8 показаны диаграммы изотвердости и изопрочности для низколегированных сталей [30]. На диаграмме линиями показаны швы с одинаковыми свойствами, полученные из различных комбинаций режимов сварки и химического состава легирования. Инженеры-сварщики могут регулировать параметры процесса в соответствии с изменениями свойств материала для получения постоянных свойств шва. Необходимо определить наилучшее выражение углеродного эквивалента для использования с изодиаграммами.

Ударная вязкость. Приемлемого качества швов можно достичь при широком диапазоне комбинаций химического состава МШ и параметров сварки, но некоторые комбинации более устойчивы к изменению параметров. С разработкой более надежных материальных уравнений и/или нейросетевых методов прогнозирования свойств шва, аналитические методы могут стать доступными для выбора устойчивых множеств параметров сварки, которые уменьшат процент брака. Для исследования чувствительности свойств шва к изменениям в обработке и химическом составе был предложен метод, основанный на расчете изменений [31].

В заключение следует отметить о важности проведения и поддержки интернациональных исследований по расширению базы данных экспериментально определенных соотношений между различными свойствами швов, их химическим составом и термической «предысторией» $\Delta t_{8/5}$. Полученный банк данных должен быть доступен всему международному сообществу исследователей в области металлургии сварки. Это исследование будет способствовать сотрудничеству между исследователями и более быстрому введению новых и усовершенствованию уже существующих подходов к прогнозируемости свойств швов.

1. *Granjon H.* (1967) Notes on the Carbon Equivalent, IIW Doc. IX-555-67, American Council, AWS, Miami, FL.
2. *Ito Y., Bessyo K.* (1968). Weldability Formula of High Strength Steels Related to Heat-affected Zone Cracking, IIW Doc. IX-567, American Council, AWS, Miami, FL.
3. *Lundin C. D., Gill T. P. S., Qiao C. Y. P., Wang Y.* Validity of Conventional Carbon Equivalent Formulae to the Weldability of Low Carbon Microalloyed Steels for Marine Structures, Ship Structure Committee Report. DTICG-23-C-20035, April 14, 1989, US. C. G., Washington D. C.
4. *Metzboower E. A., DeLoach J. J., Lalam S. H., Bhadeshia H. K. D. H.* Neural Network Analysis of Strength and Ductility of Welding Alloys for High Strength Low Alloy Shipbuilding Steels // *Sci. and Tech. of Welding and J.* — 2001. — 6, № 2. — P. 116–124.
5. *Metzboower E. A., DeLoach J. J., Lalam S. H., Bhadeshia H. K. D. H.* Analysis of Toughness of Welding Alloys for High Strength Low Alloy for High Strength Low Alloy Ship Building Steels // *Ibid.* — № 4. — P. 368–374.
6. *Blackburn J., DeLoach J. J., Brandemarte A.* A Strength Model for Low-Carbon, Ferritic, GMA Weld Metal // *Proc. Nat. Welding Seminar, Indian Institute of Welding, Bangalore, India.* — 1997. — P. 57–76.
7. *Liu S., Olson D. L.* The Role of Inclusions in Controlling HSLA Steel Weld Microstructures // *Welding J.* — 1986. — 65, № 6. — P. 139–149.
8. *Liu S., Olson D. L.* The Influence of Inclusion Chemical Composition on Weld Metal Microstructure // *J. of Materials for Energy Systems.* — 1987. — 9, № 3. — P. 237–251.
9. *Liu S., Olson D. L., Matlock D. K.* A Thermodynamic and Kinetic Approach in the Development of Expressions for Alloy Behavior Prediction // *J. Heat Treat.* — 1986. — 4, № 4. — P. 309–316.
10. *Onsoien M. I., Liu S., Olson D. L.* Shielding Gas Oxygen Equivalent in Weld Metal Microstructure Optimization // *Welding J.* — 1996. — 75, № 7. — P. 216–224.
11. *Ramsay C. W., Olson D. L., Matlock D. K.* The Influence of Inclusions on the Microstructures and Properties of a High Strength Steel Weld Metal // *Proc. Gatlinburg Intern. Conf. on «Recent Trends in Welding Research», May 14–18, 1989.* — P. 763–768, Materials Park, Ohio.
12. *Scheil E.* Bemerkungen zur Schichtkristallbildung // *Zeitschrift für Metallkunde.* — 1942. — 34, S. 70–72.
13. *Olson D. L., Liu S., Edwards G. R.* Role of Solidification of HSLA Steel Weld Metal Chemistry, in *Weldability of Materials.* — P. 183–190, Materials Park, OH.
14. *Indacochea J. E., Olson D. L.* Relationship of Weld-Metal Microstructure and Penetration to Weld-Metal Oxygen Con-



- tent // J. of Materials for Energy Systems. — 1983. — 5, № 3. — P. 139–148.
15. Frost R. H., Olson D. L., Liu S. Influence of Solidification on Inclusion Formation in Welds // International Trends in Welding Science and Technology, Gatlinburg, TN, 3rd Intern. Conf., ASM International, Materials Park, OH, P. 205–209.
 16. Self J. A., Carpenter B. F., Olson D. L., Matlock D. K. (1987). Phase Transformation and Alloy Stability, in Alternate Alloying for Environmental Resistance. — P. 37–47, TMS, Warrendale, PA.
 17. Burke P. A., Indacochea J. E., Olson D. L. The Effects of Welding Flux Additions on 4340 Steel Weld Metal Composition // Welding J. — 1990. — 69 (3). — P. 115–122.
 18. Lorenz K., Duren C. (1982). IIW Doc. IX-B-82, American Council of IIW, AWS, Miami, Fl.
 19. Yurioka N., Ohkita S., Tametiro H. Study on Carbon Equivalents to Access Cold Cracking Tendency and Hardness in Steel Welding // AWTMI Symposium on Pipeline Welding in the 80's. — P. 1–15.
 20. Devletian J. H. (2000). Carbon Equivalent (P_{cm}) Limits for Thick Carbon and Low Alloy Steels // National Shipbuilding Research Project Report NSRP 0530, U.S. Navy, Carderock Detachment, P. 1–66.
 21. Rosenthal D. The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatment // Trans ASME. — 1946. — 68. — P. 819–866.
 22. Ramirez E., Liu S., Olson D. L. Dual Precipitation Strengthening Effect of Copper and Niobium in High Strength Steel Weld Metal // Materials Science and Engineering A. — 1996. — A216. — P. 91–103.
 23. Evans G. M. The Effect of Manganese on the Microstructure and Properties of Weld-Metal Deposits // Welding J. — 1980. — 59 (3). — P. 65–75.
 24. Evans G. M. The Effect of Aluminum in Shielded Metal and C-Mn Steel Multi-run Deposits // Ibid. — 1991. — 70(1). — P. 32–39.
 25. Evans G. M. The Effect of Micro-alloying Elements in C-Mn Steel Weld Metal // Welding in the World. — 1993. — 31 (1). — P. 12–19.
 26. Cerjak H. (2002). Mathematical Modelling of Weld Phenomena 5, Materials Modeling Series, 1081 pp., IOM Communications, London, U.K.
 27. Hart P. H. M. Resistance to Hydrogen Cracking in Steel Weld Metals // Welding J. — 1986. — 65 (1). — P. 14–22.
 28. Yurioka N. (2002). Prediction of Strength of Weld Metal (Report II), IIW Doc. IX-2026-02, American Council, AWS, Miami, Fl.
 29. Liu S., Ibarra S., Olson D. L. (1994). Assessment of Microstructural and Property Prediction Equations in Structural Welding, OTC 7497, P. 299–306.
 30. Klucken A. O., Liu S., Olson D. L. (1992). Use of Predictive Equations for Arctic Steel Heat Affected Zone Properties // Offshore Mechanics and Arctic Energy (Proc. of 11th Intern. Conf.) OMAE III, Part A-Materials Engineering, P. 1–8, ASME, N.Y.
 31. Olson D. L., Ibarra S., Liu S. (1991). Selection of Resilient Welding Parameters for Arctic Fabrications and Repair // Proc. 10th Intern. Conf. OMAE, vol. IIIA. — P. 125–130, ASME, N.Y.

The paper deals with the features of phase transformations in low-carbon and low-alloyed welds of higher strength. When forecasting the properties of weld metal, it is highly important to take into account not only the composition, but also the cooling rates ($\Delta t_{8/5}$), oxygen content, solidification features, as well as inclusions. Empirical expressions are proposed for forecasting the mechanical properties of weld metal, including those obtained in multipass welding. An analytical approach is discussed, which allows fast selection of the composition of the consumable material for welding certain steels.

Поступила в редакцию 08.08.2003



МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ: ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА В XX в., ПРОБЛЕМЫ И ПРОГНОЗ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Академик РАН **Н. П. ЛЯКИШЕВ**, **А. В. НИКОЛАЕВ**, д-р техн. наук
(Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва, РФ)

Рассмотрены основные этапы развития металлургического производства стали в XX веке и сформулированы геополитические факторы, определяющие его развитие. Показана определяющая роль энергопотребления аглодоменного производства — в энергетическом балансе завода полного цикла. Рассмотрены альтернативные процессы изготовления стали. Существенное снижение энергопотребления может быть достигнуто при объединении нескольких технологий. Перспективна выплавка стали и выработка товарной тепловой и электрической энергии по технологии плазменного электрометаллургического комплекса. Намечены пути развития металлургии в XXI в.

Ключевые слова: мировая индустрия, металлургическое производство, энергопотребление, экология, объединение технологий, пламенный и электрометаллургические комплексы, перспективы

Производство железа в XX в. XX в. называли «чугунным», поскольку выплавка чугуна в мире превосходила производство стали, и в 1913 г. составляла 78,5 млн т (стали — 72,4 млн т). К концу XX в. производство стали достигло 800 млн т, а чугуна — около 500 млн т (примерно 63 %), что позволило назвать его «стальным веком» (рис. 1) [1]. Главным производителем чугуна и стали в XX в. являлись заводы полного цикла, функционирующие на основе аглодоменной технологии. В сталеплавильном производстве в первой половине XX в. решающую роль играл мартеновский процесс и частично кислородно-конвертерный. Для производства качественных сталей применяли электросталеплавильный процесс. Вторая половина XX в. характеризовалась практически полным отказом от мартеновского процесса и широким распространением конвертерного.

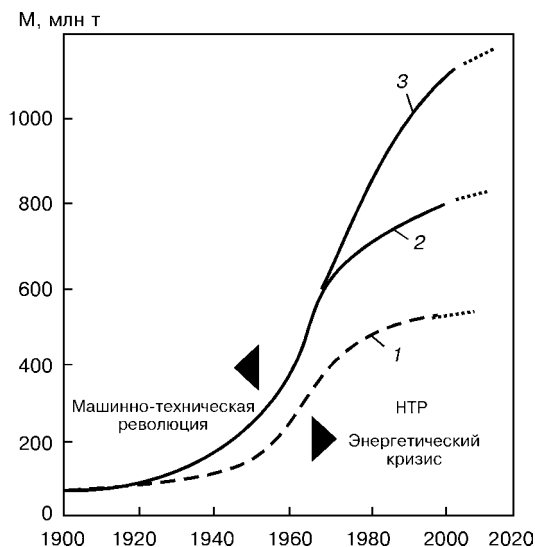


Рис. 1. Мировое производство М чугуна (1) (физические тонны) и стали (2 — физические тонны, 3 — качественные [2]) в XX в.

© Н. П. Лякишев, А. В. Николаев, 2003

За прошедшее столетие в мире накоплен огромный металлофонд, это потребовало разработки промышленных методов его утилизации. Для решения указанной задачи оптимальным металлургическим агрегатом стала электродуговая печь, что стимулировало быстрое развитие электросталеплавильного процесса (рис. 2).

Широкое распространение получил созданный в СССР способ непрерывной разливки стали, позволивший увеличить выход годного металла приблизительно на 15 %, а также повысить его качество. Однако по объемам использования непрерывного литья отечественная металлургия пока значительно отстает от передовых стран мира: в настоящее время оно составляет около 50 %, в то время как в развитых странах более 90 %.

Изменения, происходящие в металлургическом производстве, отразили глобальные процессы, формирующие развитие мировой индустрии. Произошли существенные изменения в энергетической и сырьевой базе, отчетливо проявилась экологическая проблема.

Геополитические факторы современного развития мировой индустрии. Во второй половине XX в. произошел переход от машинно-технической революции к научно-технической, которая характеризуется широким использованием наукоемких технологий. Интенсифицировался производствен-

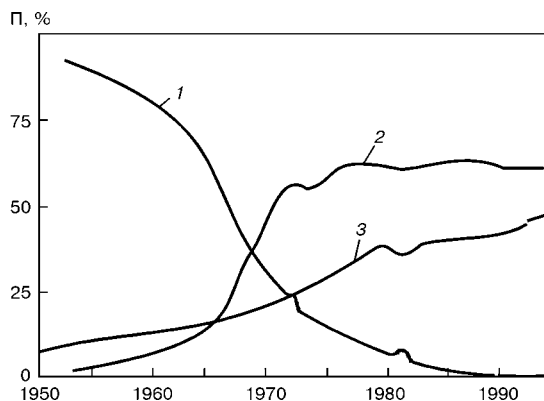


Рис. 2. Структурная перестройка электросталеплавильного перелома П во второй половине XX в.: 1 — мартеновские печи; 2 — конвертеры; 3 — электродуговые печи

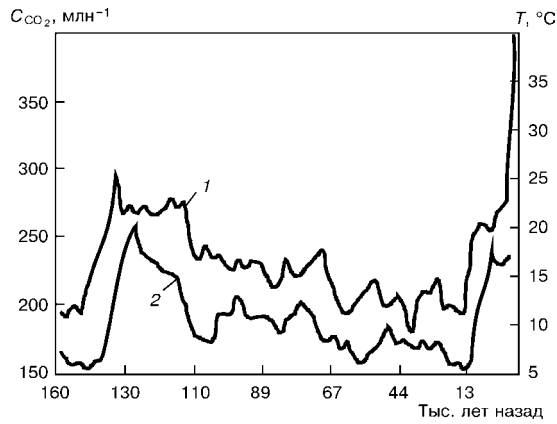


Рис. 3. Изменение концентрации C углекислого газа в атмосфере (1) и средней глобальной температуры земной поверхности (2): 1 — $C = 280$ млн⁻¹ в начале машинно-технической революции; 2 — $C = 353$ млн⁻¹ в настоящее время

ный процесс, увеличились его удельные параметры, улучшилось качество производимой продукции, снизились энерго- и материалоемкость, повысилась производительность труда.

В этот период быстро развивалась мировая индустрия в целом, возросли и темпы роста производства стали. Потребление энергии существенно увеличилось, и в 1970-х годах начал проявляться энергетический кризис, который в менее явном виде продолжается и до сих пор.

В промышленно развитых странах проведена большая работа по снижению энергоёмкости внутреннего валового продукта (ВВП). К сожалению, энергоёмкость ВВП в России в целом почти в 3 раза превышает этот показатель в передовых странах. Помимо несовершенства самих технологий, на этот фактор отрицательно влияют также климатические условия России.

Важной особенностью прошедшего столетия являлось то, что в этот период начал отчетливо проявляться мировой экологический кризис. Антропогенное воздействие на систему «Земля» проявляется в интенсивном исчерпании сырьевых ресурсов и ископаемых топлив, увеличении в атмосфере концентрации парниковых газов, что ведет к изменению климата. Средняя температура земной поверхности изменяется адекватно содержанию углекислого газа в атмосфере (рис. 3). Вопреки рекомендациям Протокола Киото за последние три года наблюдается увеличение выбросов углекислого газа и его концентрация продолжается. Это обус-



Рис. 4. Геополитические факторы, определяющие современное развитие металлургического производства

ловлено тем, что для сокращения выбросов углекислого газа необходима замена старых традиционных технологий принципиально новыми, что требует значительных капиталовложений. Так, затраты на модернизацию промышленности США с целью сокращения выброса углекислого газа на 20 % (по сравнению с 1990 г.) могут составить до 3,6 трлн дол. США [3].

Под влиянием глобальных процессов, происшедших в XX в., начата разработка концепции «устойчивого развития», сущностью которой является создание условий на Земле, позволяющих человечеству выжить [4].

Металлургия ко всему перечисленному имеет самое прямое отношение. Исходя из изложенных позиций, рассмотрим происходящие изменения в металлургическом производстве (рис. 4).

Научно-техническая революция (НТР) и металлургия стали. Несмотря на то что в России НТР в целом проходила несколько замедленно, в черной металлургии имелись значительные достижения. Наряду с укрупнением доменных печей и модернизацией их конструкции, а также улучшением качества кокса и рудного сырья широкое применение получили такие новшества, как увлажненное дутье, повышенное давление газа на колошнике, обогащение дутья кислородом, вдувание в горн газообразного, жидкого и твердого топлив и др. Все это позволило снизить к середине века расход кокса с 1,5...2,7 до 0,7...0,9 т/т чугуна, что соответствовало энергоёмкости производства чугуна на уровне 40...50 ГДж/т. К концу века в передовых странах расход кокса снижен до 250...500 кг/т, а расход энергии — уровня 20...25 ГДж/т чугуна (рис. 5).

В сталеплавильном производстве в последние десятилетия наиболее значимые достижения наблюдались в области электроплавки: улучшено конструктивное оформление печей, значительно увеличена их удельная электрическая мощность, применены разнообразные формы дугового разряда — дуга при постоянном токе, плазменная с полым электродом, дуга, горящая во вспененном шлаке и др. Все это позволило повысить произ-

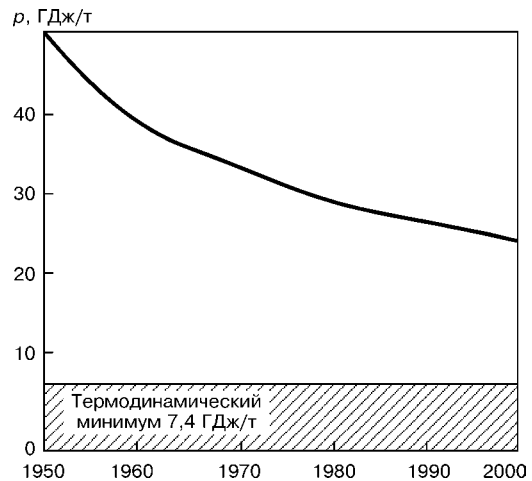


Рис. 5. Динамика энергопотребления ρ при производстве чугуна в доменных печах во второй половине XX в. в промышленно развитых странах

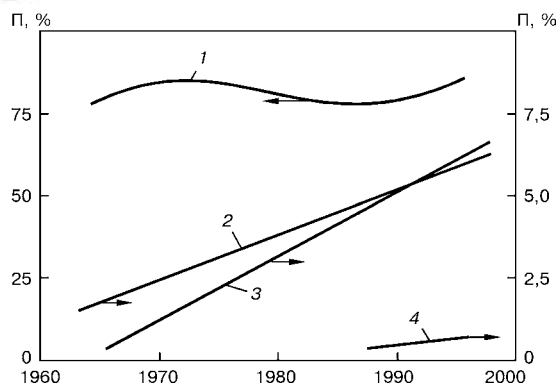


Рис. 6. Динамика роста объема потребления П конструкционных материалов в США: 1 — сталь; 2 — алюминий; 3 — пластмасса; 4 — титан, керамика и пр.

водительность печей, коэффициент использования установленной мощности, энергетические и технологические показатели выплавки стали и улучшить условия труда.

Во второй половине XX в. были разработаны и внедрены в промышленность наукоемкие технологии такие, как вакуумно-дуговой переплав, электронно-лучевая плавка, плазменный переплав, электрошлаковая и индукционная плавка. Развитие этих процессов, особенно в нашей стране, стимулировалось также требованиями военно-промышленного комплекса, для решения проблем которого был необходим металл высокого качества. В этот период бурно развиваются смежные с черной металлургией отрасли — цветная металлургия и химическая промышленность. Благодаря интенсификации их производства создана высококонкурентная среда в сфере производства и использования конструкционных и функциональных материалов. Хотя сталь и удерживает ведущее положение на рынке (90 % по массе и 70 % по объему), ее позиции теснят алюминий, пластмассы и полимеры, медленнее идет внедрение в производство композитов и керамики. Так, в США использование стали в период 1971–1991 гг. снизилось на 15 %, потребление изделий из алюминия возросло на 55 %, а из пластмасс — почти в 3 раза (рис. 6). Аналогичная картина наблюдалась в Японии, Германии и др.

В связи с создавшейся ситуацией производители стали больше внимания стали уделять обеспечению качества выпускаемой продукции. Заслуживает внимания динамика роста мирового производства стали на душу населения в этот период. С 1970-х годов обозначилось некоторое снижение указанного показателя (рис. 7).

Потребность в стали во второй половине XX в. удовлетворялась за счет не только физического объема, но в значительной мере и за счет ее качества. В конце века спрос на сталь примерно на 40 % обеспечивался именно благодаря последнему [2]. Снижение фактического потребления стали на душу населения главным образом произошло в результате увеличения выпуска качественных сталей (в основном низколегированных).

Энергетическая проблема производства стали. Производство стали является высокоэнергетозатратной технологией — металлургия в целом потребляет

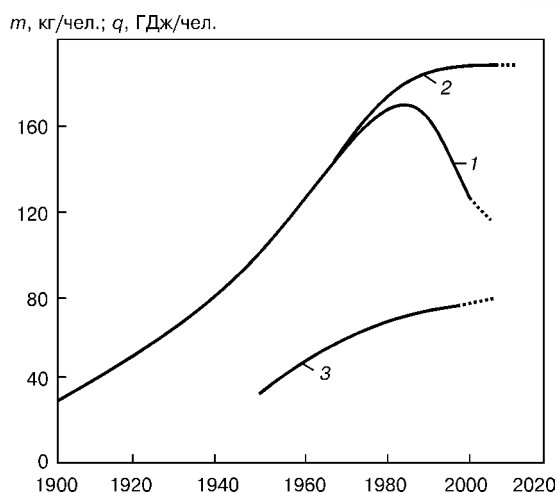


Рис. 7. Динамика мирового производства на душу населения стали m (1 — физические тонны; 2 — качественные) и энергии q (3) в XX в.

около 20 %, а черная металлургия — около 10 % всех энергоресурсов. Стоимость энергии при производстве железа в большинстве стран составляет примерно половину стоимости стальной заготовки. Энергоемкость продукции как в настоящем, так и в ближайшем будущем следует рассматривать в качестве основного показателя, определяющего положение стали на рынке материалов [5].

Указанный выше уровень потребления энергии в металлургии характерен практически для всех развитых стран. Он стимулирует создание менее энергоемких конструкционных материалов, в том числе не на основе железа.

В настоящее время главным производителем стали являются заводы полного цикла. Доменная печь с ее инфраструктурой (коксохимическим, агломерационным и энергетическим производствами) потребляют около 79 % общих энергетических затрат (рис. 8). За последнюю половину XX в. в развитых странах расход энергии на производство чугуна снизился примерно в 2 раза и составляет 20... 25 ГДж/т [6]. Это достигнуто за счет улучшения качества кокса, рудного сырья и ряда новых технологических решений, о которых было сказано выше.

При определении резервов экономии энергии реальный технологический процесс сопоставляют с его «идеальным» аналогом. Как известно, термодинамический минимум (минимальные энерго-

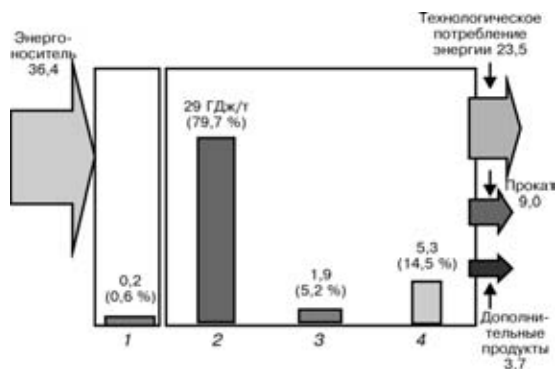


Рис. 8. Структура энергопотребления при производстве стального проката по технологии доменная печь—конвертер: 1 — рудоподготовка; 2 — аглодомное производство; 3 — сталеплавильное; 4 — прокатное

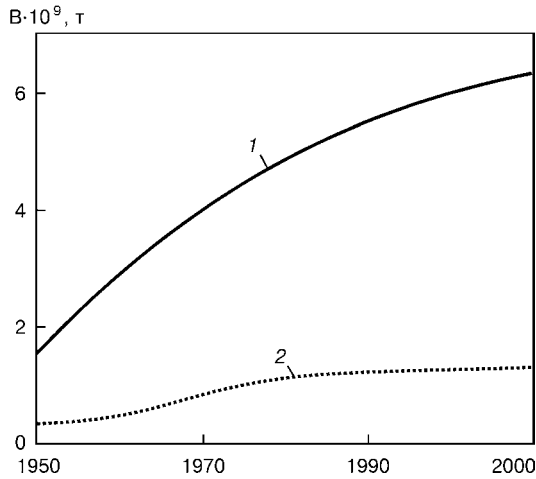


Рис. 9. Глобальные (1) и мировые (2) выбросы В углекислого газа при производстве чугуна во второй половине XX в.

затраты) при восстановлении железа из оксида (Fe_2O_3) равен 7,4 ГДж/т (энергия диссоциации оксида). Достигнутый в настоящее время уровень расхода энергии при производстве железа (чугуна) примерно в 3 раза превышает термодинамический минимум.

Высокая энергоемкость стальной металлопродукции интегрированных заводов обусловлена несовершенством утилизации и использованием вторичной энергии, которая в общем энергетическом балансе предприятия составляет примерно половину, а при нынешней технологии используется примерно 10...20 %.

Следует отметить, что энергопотребление при получении алюминия — основного альтернативного материала железа — в настоящее время более чем в 2 раза превышает аналогичный параметр железа (чугуна) и составляет около 57 ГДж/т, что в 1,7 раза (33,1 ГДж/т) превышает термодинамический минимум получения алюминия и в 7,7 раза (7,4 ГДж/т) термодинамический минимум производства железа. Однако следует иметь в виду, что коэффициент замены стали алюминием в некоторых сферах его применения равен примерно 3.

По мере накопления металлофонда доля первородного железа в производстве стали снижается. В промышленно развитых странах доля чугуна в 1990-х годах составляла в США около 50, во Франции и Англии — около 65, в Италии — около 45, в России — около 75 %.

Производство стали и экология. Поскольку металлургия является высокоэнергетической отраслью, энергетический фактор не мог не отразиться на ее экологических показателях. Так, по вредным выбросам в атмосферу металлургия занимает второе место, уступая только энергетике. Металлургические предприятия потребляют около 20 % всех ископаемых углеводородных энергоресурсов, в итоге превращая их в основном в диоксид углерода, тем самым они вносят значительный вклад в увеличение общих промышленных выбросов. Как следует из результатов расчетов, выбросы диоксида углерода при выплавке чугуна по доменной технологии могут составить примерно

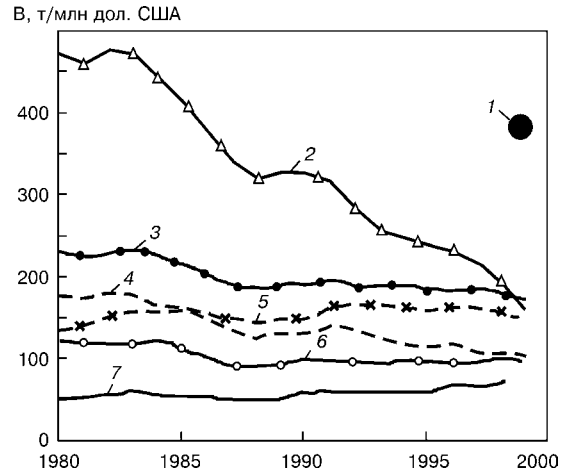


Рис. 10. Динамика выбросов углекислого газа, отнесенных к ВВП (доллары США), в различных странах мира: 1 — Россия; 2 — Китай; 3 — США; 4 — Великобритания; 5 — Индия; 6 — Япония; 7 — Бразилия

18 % эмиссии углекислого газа мировой промышленностью (рис. 9).

Во всем мире ведется поиск путей сокращения выброса углекислого газа, и в том числе способов производства железа, при которых уменьшается вредная нагрузка на окружающую среду. Так, в странах, широко использующих высокотехнологичные процессы (США, Япония, Великобритания, Китай) наблюдается отчетливая тенденция снижения выброса углекислого газа в атмосферу на единицу ВВП (рис. 10).

Основным потребителем энергии и источником эмиссии вредных веществ в окружающую среду при традиционном способе производства железа (чугуна) из минерального сырья является агломерационный комплекс. Наибольший вклад (более 60 %) в загрязнение окружающей среды вносит агломерационное производство. Поэтому принципиальное изменение технологии на этом участке производственного цикла может дать наиболее ощутимый эффект.

В настоящее время развиваются два основных типа восстановительных процессов — твердо- и жидкофазный. В доменном процессе преобладает твердофазное восстановление. Существенный недостаток этого процесса — использование дефицитных восстановителей — кокса, природного газа и специально подготовленного рудного сырья достаточно высокого качества. Одним из важнейших направлений решения проблем, связанных с производством и применением кокса, является использование в доменном процессе пылеугольного топлива (ПУТ). Благодаря этому уменьшается вредное воздействие на окружающую среду (сокращается объем коксохимического производства), но при этом энергоемкость агломерационного комплекса несколько возрастает. В металлургии СССР это топливо начали применять раньше, чем за рубежом. Однако в результате низкой цены на природный газ развитие этого направления в отечественной металлургии задержалось. В дальнейшем предстоит активизировать работы по использованию ПУТ.

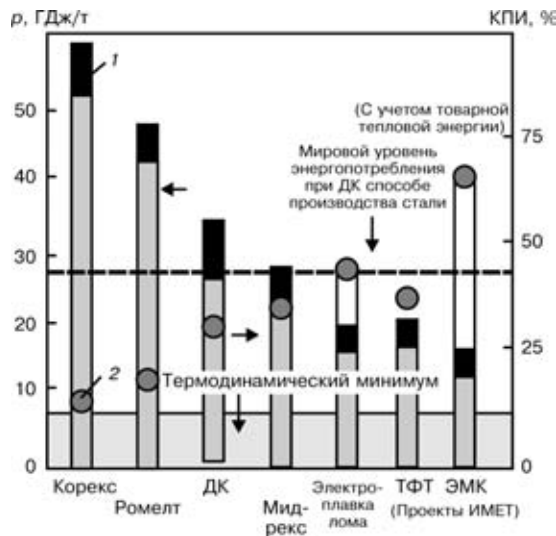


Рис. 11. Энергопотребление (1) и КПИ (2) различных технологических процессов производства стального проката (удельное энергопотребление в прокатном производстве составляет 5,3 ГДж/т; расходный коэффициент — 1,2): КПИ — коэффициент полезного использования; ДК — доменно-конвертерный процесс; ТФТ — технология без плавления металла; ЭМК — энергометаллургический комплекс; КПИ равен $I_s \cdot 100 / \Sigma I$ (I_s — химическая энергия стали; ΣI — суммарная потребляемая энергия)

В настоящее время создано множество технологий твердо- и жидкофазного восстановления, использующих как различные виды энергии, так и разнообразные рудные материалы и восстановители. Наиболее типичными и освоенными в промышленности процессами твердофазного восстановления являются Мидрекс и несколько модификаций процесса Хил. Типичный жидкофазный процесс Ромелт. Корекс является комбинированным процессом, он включает твердо- (восстановительную) и жидкофазную (получения чугуна) стадию.

Благодаря этим технологиям в той или иной степени решаются энергетические и экологические проблемы производства стали. Так, в процессе Мидрекс отсутствует коксохимическое производство. Энергопотребление производства железа при использовании этой технологии примерно в 1,5 раза меньше, чем при доменном процессе (рис. 11). Однако при применении указанной технологии требуется дефицитный и дорогой источник энергии и восстановителя — природный газ. Это значит, что по-прежнему происходит выброс в атмосферу углекислого газа, хотя он существенно (примерно в 2 раза) снижается по сравнению с доменным процессом.

Главное достоинство процесса Корекс состоит в том, что при получении чугуна используется только энергетический уголь. Однако эта технология не лишена недостатков. Энергоемкость выплавки чугуна по технологии Корекс почти в 2 раза выше, чем при доменном производстве. Поэтому объем выброса (кг/т) парниковых газов не снижается, а увеличивается [7]:

доменно-конвертерный процесс	2010
электродуговая плавка металлолома	640
Мидрекс в сочетании с электроплавкой	1870
Корекс в сочетании с конвертерным процессом	3090

Уменьшение энергопотребления процесса Корекс возможно только в случае фильтрации и полного использования тепловой и химической энергии отходящих газов.

В процессе Ромелт в качестве источника энергии и восстановителя также используют энергетический уголь, рудное сырье, при этом не требуется специальной подготовки. По энергопотреблению и выбросу в атмосферу углекислого газа процесс Ромелт значительно превышает доменное производство.

Для обеспечения приемлемых энергетических и экологических показателей в технологической структуре процесса Ромелт так же, как и в процессе Корекс, должна быть решена проблема улавливания парниковых газов и полной утилизации химической и тепловой энергии отходящих газов. Эти процессы формируют как энергометаллургические комплексы, где продукцией является металл и энергия (тепловая и электрическая). Создание таких комплексов находится на начальном этапе.

Для доменного и упомянутых выше процессов характерны также выбросы сернистых и азотистых соединений, опасность которых не менее значима, чем CO_2 . Таким образом, в уже существующих и разрабатываемых восстановительных процессах не просматривается достаточно полного решения проблем энергетики и экологии.

Очевидным альтернативным процессом является электрометаллургия стали, которая в последние годы развивается особенно быстрыми темпами. Основная предпосылка к этому — огромный металлофонд, накопившийся в мире, млрд т: в США около 3, в Европе — около 2,5, в России — около 2. При использовании в качестве лома около 3 % металлофонда металлургическая промышленность России может выплавлять около 50 млн т стали в год.

Мини-заводы, на которых осуществляется электросталеплавильный процесс на основе лома, практически по всем технико-экономическим показателям существенно превосходят заводы полного цикла. Энергопотребление производства стального проката на них почти в 2,5 раза ниже по сравнению с энергопотреблением на интегрированных предприятиях, а производительность труда в 3...5 раз выше, чем на традиционном заводе полного цикла. Важная особенность мини-заводов состоит в том, что для них единой энергетической базой является электричество — наиболее технологичный и экологически чистый источник энергии.

При использовании шихты, например содержащей 30 % чугуна и 70 % лома (рис. 12), энергопотребление производства стали в электропечах примерно в полтора раза ниже, чем при доменно-конвертерном способе и составляет около 16 ГДж/т [8].

Одной из проблем, которая возникает при разработке и создании высокоэффективного электросталеплавильного оборудования, является использование, помимо электричества, других источников энергии, например органического топлива. В электропечах фирмы «Даниели», питаемой от трансформатора мощностью 55 МВт и потребляющей активную мощность 43 МВт, установлено семь топливных горелок мощностью по 5 МВт каждая.

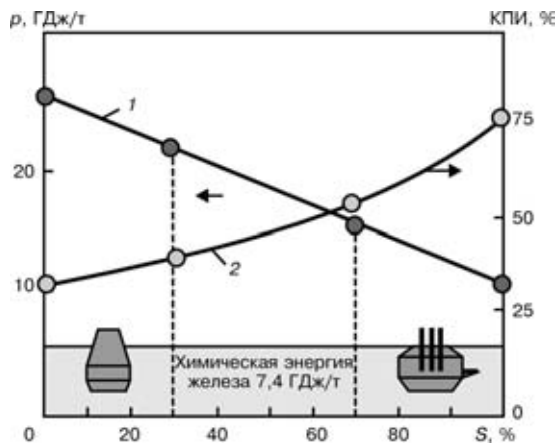


Рис. 12. Влияние содержания лома в шихте S на изменение энергопотребления p (1) и КПИ (2) энергии при производстве стали из чугуна и лома: КПИ равна $I_s \cdot 100 / (I_b + I_l + I_e)$ (I_b — энергоемкость производства чугуна; I_l — химическая энергия лома; I_e — электрическая энергия)

В дуговой сталеплавильной печи, применяющей топливный нагрев, несмотря на существенную экономию электрической энергии (до 200 кВт·ч/т), эффективность энергии в целом примерно в 2 раза ниже, чем при использовании только электричества. Это объясняется низким (около 20...60 %) значением эффективного КПИ топливных источников теплоты.

Эффективность энергии топливных горелок для нагрева лома низка (40...50 %). При сжигании дополнительного топлива возникают и экологические проблемы с нейтрализацией вредных выбросов в виде SO_x , NO_x , CO, фурана и т. п.

Несмотря на это применение ископаемого углеводородного топлива при плавке лома в электросталеплавильных агрегатах во многих случаях оправдано, поскольку способствует ускорению плавки и при относительно высокой цене на электроэнергию — снижению себестоимости стали.

В мире уже сейчас более 40 % стали выплавляется в электропечах. Особенно высокими темпами электропроцессы плавки внедряются в промышленность США (табл. 1).

В настоящее время по-прежнему актуальной остается проблема наличия вредных примесей в ломе цветных металлов (никеля, меди, хрома и др.). Учитывая, что при многократном использовании лома содержание вредных примесей в нем все увеличивается, возникает необходимость использования в шихте первородного железа — чугуна и железа прямого восстановления. Уже сейчас на мини-заводах в технологический процесс включается восстановительная часть, как правило, прямое восстановление. Следует отметить, что на таких предприятиях ведется непрерывная разливка стали

Таблица 1. Доля электроплавки в общем объеме производства стали, %

Страна-производитель	1970	2001
США	15,5	47
Страны ЕС	14,0	41
Япония	16,8	28
Россия	13,0	15

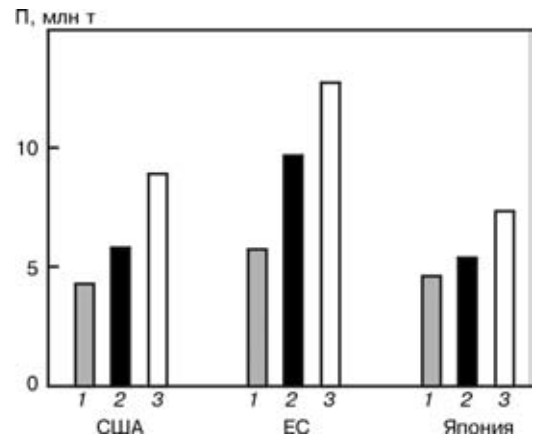


Рис. 13. Потребление Π тонких горячекатаных листов в промышленно развитых странах мира: 1 — 1997 г.; 2 — 2002 г.; 3 — прогноз на 2007 г.

в тонкие листы, что также экономит энергию. Этот способ получает все большее распространение.

Основные технологические параметры установки для непрерывной отливки тонкого листа на заводе «Krupp Thyssen Nirosta» в Крефилде следующие:

диаметр валков, мм1500
скорость разлива, м/мин60...150
размер листа, мм:	
толщина1,5...4,5
ширина1100...1450
сортамент сталейаустенитные, нержавеющей
производительность, т/год400000

Существенные изменения в технологии и сортаменте происходят в прокатном переделе. Производство горячекатаных полос непрерывно увеличивается (рис. 13).

Развитие электрометаллургии (строительство мини-заводов) существенно повлияло на структуру производства чугуна. Во многих странах мира количество доменных печей, в первую очередь малого объема, сокращается (табл. 2) и значительно совершенствуется их технология [9]. Так, в США при уменьшении количества печей на 34 % (38 печей — 1998 г. и 25 — 2015 г.) выплавку чугуна намечено сократить всего на 13 % (соответственно от 53 до 44 млн т/год). При этом расход кокса уменьшается до 320 кг/т, ПУТ увеличивается до 200 кг/т, а удельная производительность повысится до 2,9 т/(м³·сут). Это следует рассматривать как новое качественное изменение в развитии металлургии.

В рамках создания экологически безопасного комплекса (ЭМК) может представить интерес разработаемый в Институте металлургии и материаловедения РАН им. А. А. Байкова восстановительный модуль со сверхвысокой (около

Таблица 2. Динамика количества доменных печей в промышленно развитых странах мира

Страна	1975	1980	1990	1996	2001
США	197	—	—	40	36
Страны ЕС	—	154	—	—	58
Япония	—	—	34	—	30

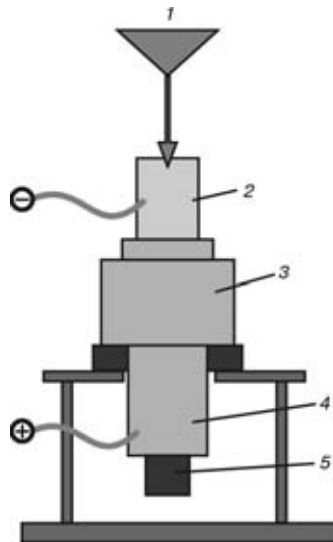


Рис. 14. Конструктивная схема полупромышленного плазменного восстановительного модуля (расчетные параметры: мощность 5...8 МВт; ток дуги 10 кА; напряжение 400...800 В; производительность 1,5...3,0 т/ч железа; удельная производительность 200 т/(м³·сут); диаметр электрода 300 мм; диаметр слитка 500 мм; расход газа до 2000 м³/ч; расход рудного концентрата 4,5 т/ч): 1 — рудный концентрат (восстановитель); 2 — плазмотрон; 3 — реактор; 4 — кристаллизатор; 5 — слиток

100 МВт/м³) энергонапряженностью, достигаемой в результате использования высококонцентрированного источника энергии — плазменной дуги (рис. 14). За счет высокой плотности энергии в реакционном объеме удельная производительность плазменной печи при жидкофазном восстановлении может достигать 200 т/(м³/сут), доменной — 2...3 т/(м³/сут.). На рис. 14 показана структура энергопотоков ЭМК. Получаемый при газификации угля очищенный от серы синтез-газ направляется на восстановление в металлургический блок, а затем как топливо — в газопаровую установку энергетического блока [10].

ЭМК производит три вида товарной продукции — металлопродукцию, тепловую и электрическую энергии. Комплекс не использует кокса и не потребляет электрической энергии от внешней энергосистемы. Отличительная особенность этой технологии состоит в том, что рудное сырье и восстановитель используются в дисперсном состоянии. Первичным источником энергии является энергетический уголь. Выполненные расчеты показали, что энергопотребление при производстве металлопродукта по технологии ЭМК с учетом вырабатываемой тепловой энергии в 1,5...2,0 раза меньше, чем при традиционной аглодоменной технологии. Технология ЭМК в данном варианте не исключает выброса углекислого газа в окружающую среду, но за счет уменьшения энергопотребления производства стали в целом он снижается.

Восстановительный модуль металлургического блока ЭМК может функционировать, используя только газообразный восстановитель, например водород. Таким образом может быть создана экологически чистая электроводородная металлургия стали, полностью исключая выброс в атмосферу углекислого газа.

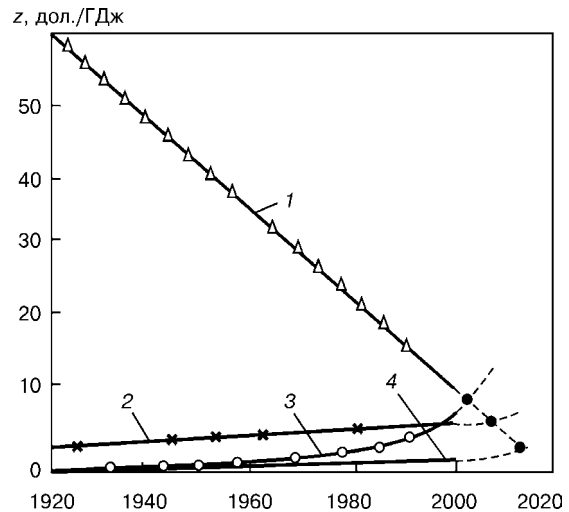


Рис. 15. Динамика цен z (средняя) на энергию различных энергоносителей в XX в.: 1 — электричество; 2 — нефть; 3 — газ; 4 — уголь

Широкому развитию электротехнологии, в том числе и электрометаллургии, будет способствовать неуклонное снижение цены на электроэнергию (рис. 15) [11].

Металлургия стали и стратегия «устойчивого развития». В конце XX в. в развитых странах наблюдается стабилизация и некоторый спад производства стали, а в странах Азии, Южной Америке и в ряде других регионов мира, наоборот, — бурное развитие черной металлургии. В этом отношении особо отличается Китай, который за короткий срок создал современную металлургическую индустрию и вышел на первое место в мире по производству стали.

К концу 1980-х годов в промышленно развитых странах таких, как США, Германия, Англия, Франция, потребление стали стабилизировалось на уровне около 400...500 кг/чел. и появилась тенденция некоторого снижения производства. Россия в настоящее время производит около 50 млн т, уступая Китаю, Японии и США. Более половины металла, изготовляемого в России, идет на экспорт. Фактическое потребление стали (проката) в России

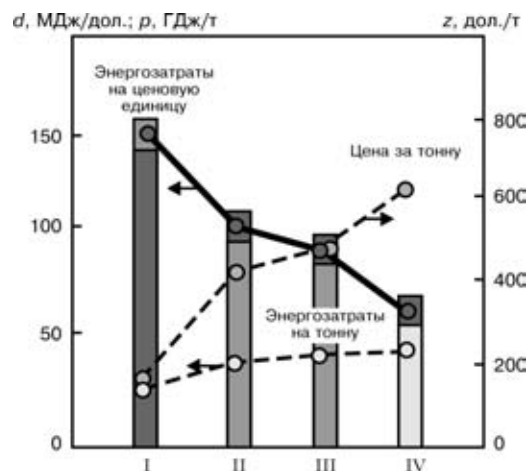


Рис. 16. Энергозатраты на ценовую единицу (d), на тонну (p) и цена (z) различных видов металлопродукта: I — чугун, слитки; II и III — соответственно тонкий горяче- и холоднокатанный лист; IV — оцинкованный лист



находится на уровне 225 кг/чел. Сталь в основном экспортируется в виде заготовок, для которых расход энергии на ценовую единицу (т. е. на доллар или рубль стоимости металлопродукта) имеет наибольшее значение (рис. 16). Расход энергии на доллар стоимости заготовки примерно в 1,7 раза превышает аналогичный показатель для холоднокатаного и более чем в 2,5 раза для оцинкованного листа. Это означает, что металлургии России на мировом рынке объективно отводится роль производителя наиболее энергоемкой невысокотехнологичной и дешевой металлопродукции.

Металлургия стали будущего. Производство стали в мире в третьем тысячелетии происходит в условиях все углубляющейся НТР, обостряющегося экологического и энергетического кризиса. Представляется, что в XX в. производство продукции из стали по своей значимости в мировой индустрии достигло апогея. В дальнейшем металлургия стали будет развиваться в острой конкурентной борьбе с производителями альтернативных материалов (алюминия, пластмасс, керамики и композиционных материалов).

Важнейшим фактором при решении проблем, стоящих перед металлургами, в третьем тысячелетии будет всевозрастающая роль научно-технического прогресса. В США за последние двадцать лет в материалопроизводящих отраслях (металлургии, химии и др.) затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы увеличились почти в 5 раз и составляют 16 млрд дол., а в целом внутренние затраты на исследования и разработки США — около 160 млрд дол. В России общие вложения в науку за последнее десятилетие резко снизились и составляют около 2 млрд дол. [12].

Несмотря на большие достижения в создании металлургических процессов, особенно в электро-технологии, основным источником производства железа (чугуна), по крайней мере в начале нового века, останется доменная печь. Исследования, направленные на повышение энергетических и экологических показателей, внедрение дешевых энергоносителей, могут продлить доминирующую роль доменно-конвертерного производства. Однако уже очевидно, что по энергоматериалоемкости и экологическим показателям аглодомное производство железа не выдержит конкуренции и уступит свою доминирующую роль по крайней мере во второй половине XXI в. Электротехнология на

базе железного лома и железа прямого восстановления уже в конце первой половины XXI в. будет основной в производстве стали. Это требует разработки эффективных способов подготовки лома и очистки его от вредных примесей. Многие, относящиеся к этой проблеме, пока еще не решены.

Таким образом, рассмотренные тенденции развития металлургии и альтернативных металлургических процессов, позволяющие снизить расход энергии, вовлечь в производство нетрадиционные энергетические и сырьевые ресурсы, снизить вредное воздействие на окружающую среду, несмотря на проявленный к ним большой интерес, пока еще находятся в начальной стадии разработок и промышленного внедрения. Успешное развитие новых и новейших энерго- и экологически совершенных процессов будет определяться капиталовложениями на проведение исследований наукоемких технологий и их промышленное испытание. Российская металлургическая наука имеет значительные заделы, но при недостаточном финансировании они быстро уменьшаются.

1. Лякишев Н. П., Николаев А. В. Металлургия стали на пороге третьего тысячелетия // *Электрометаллургия*. — 2002. — № 1. — С. 3–13.
2. Шевелев Л. Н. *Мировая черная металлургия 1950–2000 гг.* — М.: Машиностроение, 1999. — 216 с.
3. Иноземцев В. Л. Кризис Киотских соглашений и проблема глобального потепления климата // *Природа*. — 2002. — Январь.
4. Кондратьев К. Я., Лосев К. С. Иллюзии и реальность стратегии устойчивого развития // *Вестн. РАН*. — 2002. — № 7. — С. 592–601.
5. Лякишев Н. П. Основные тенденции развития черной металлургии и проблемы экономии энергии // *Металлургия, стали, сплавы, процессы*. — М.: Металлургия, 1982. — С. 10–14.
6. Николаев А. В. Системный анализ энергоматериальной структуры производства стали // *Сталь*. — 1993. — № 11. — С. 14–18.
7. *Eurofer and the Kyoto Protocol* // *Steel Times*. — 2001. — March. — P. 96.
8. Лякишев Н. П., Николаев А. В. Энергетические аспекты металлургии стали // *Сталь*. — 2000. — № 3. — С. 66–73.
9. *Fewer blast furnaces, but higher productivity* // *New Steel*. — 1996. — November.
10. Цветков Ю. В., Николаев А. В. Плазменные процессы в металлургии будущего (проблемы создания энергоматериального комплекса) // *Сталь*. — 1998. — № 10. — С. 55–60.
11. Холдрен Д. П. Энергетика на переходном этапе // *В мире науки*. — 1990. — № 11. — С. 113–121.
12. Страхов В. Н. Необходимость общественного движения «За возрождение российской науки», его цели и задачи // *Наука и технология в России*. — 2001. — № 4/5. — С. 2–5.

Major stages of development of metallurgical production of steel in the XX century are described and geopolitical factors defining its progress are formulated. Determinant role of energy consumption of agglomerate production is shown in energy balance of the integrated works. Alternative processes of steel production are considered. A significant reduction in power consumption can be attained in combination several technologies. Melting of steel and generation of conventional heat and electric power using the technologies of plasma electrometallurgical complex are challenging. Ways of metallurgy progress in the XXI century are outlined.

Поступила в редакцию 31.03.2003



НОВЫЙ СТАНДАРТ ISO 3834: ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ И КОНТАКТНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д. фон ХОФЕ (Немецкий ин-т стандартизации, Германия), Б. ШАМБАХ (Немецкое сварочное об-во, Германия)

Рассмотрена история разработки стандартов серии ISO 9000 по системе управления качеством и степень соответствия их более новым стандартам ISO 3834:1994 и EN 729:1994. Отмечены приоритеты, связанные с пересмотром стандарта ISO 3834 для принятия усовершенствованного стандарта ISO TC 44 SC 10 «Унификация требований в области сварки металла».

Ключевые слова: сварка плавлением, контактная сварка, стандарт качества, пересмотр стандарта, сварочное производство, уровень качества

История разработки стандарта ISO 3834. В настоящее время заводы-изготовители сварных конструкций, желающие доказать заказчикам свою конкурентоспособность, во многих случаях ввели систему управления качеством и сертифицировали ее в соответствии с международным стандартом ISO 9001:2000 [1].

В международном стандарте ISO 9000:2000 [2], включающем определения терминов ISO 9001:2000 (раздел 3.4.1, примечание 3), утверждается следующее:

«Процесс, в котором соответствие (3.6.1) конечной продукции (3.4.2) не поддается простой проверке обычными методами, зачастую называют специальным процессом».

Поскольку надлежащее выполнение указанных специальных процессов в большинстве случаев не может быть проконтролировано на готовом изделии вообще или невыгодно с экономической точки зрения, то возникает необходимость в точном определении и тщательном контроле параметров качества.

В соответствии с трактовкой специалистов, сварка относится к специальным процессам. Во многих промышленно развитых странах уже стало традицией перед введением стандарта ISO 9000ff в более ранней версии, датированной 1994 г., обуславливать требования к сварочным процессам и производствам, выполняющим сварочные работы. Во многих случаях они были зафиксированы, например в Германии, в абсолютно общем виде в стандартах DIN 8563 (части 1 и 2) [3, 4] или в виде, ориентированном на продукцию, в DIN 18800 (часть 7) [5] для стальных конструкций или в руководстве AD для сосудов высокого давления.

Международный институт сварки (МИС) занимался решением этих проблем и в 1986 г. опубликовал собственный документ ПW-902-86 «Руководство по обеспечению качества в сварочной технологии» [6], составленный V комиссией МИС

и ставший основанием для последующей стандартизации в CEN и ISO.

Применение ISO 3834 в настоящее время.

В связи с постановлением ЕС о том, что в согласованных европейских директивах по продукции необходимо делать ссылку на европейские стандарты, возникла необходимость в согласовании различных постановлений в странах-членах ЕС и в отношении требований к сварочному производству (цехам). В результате был создан ряд европейских стандартов EN 729 «Требования к уровню качества сварки — сварка плавлением металлических материалов» (части 1–4), впервые опубликованных в 1994 г. Они охватывали традиционные способы сварки, а также факторы, влияющие на качество. В трехуровневом своде требований они были разработаны в тесной связи со стандартами ISO 9000ff в 1994 г.

Цель разработки данных стандартов заключалась в следующем:

составлении требований к уровню качества сварочного производства как в цеховых, так и в монтажных условиях;

описании соответствующих требований к производителям, использующим сварку в производстве;

обеспечении возможности применения ко всем видам конструкций в соответствии с дифференцированными требованиями;

предоставлении инструкций с целью описания производственной базы для изготовления сварных конструкций определенного качества;

подготовке требований к постановлениям и контрактам;

описании сварочных требований в рамках «Системы управления качеством для руководства изготовителя».

В том же году после составления серии европейских стандартов EN 729 был принят идентичный международный стандарт ISO 3834 (части 1–4).

В 2000 г. опубликованы пересмотренные версии стандартов ISO 9000, ISO 9001 и ISO 9004 [7], а ISO 9002 [8] и ISO 9003 [9] были отменены. Поэтому необходимо было выяснить, повлияет ли это на ISO 3834:1994 и EN 729:1994, и если да, то каким образом.



Самым значительным изменением в стандарте ISO 9001 стало то, что новый стандарт ISO 9001:2000 охватил предыдущие стандарты ISO 9002 и ISO 9003 от 1994 г., поскольку в ISO 9001:2000 больше нет никаких дифференцированных требований к системам управления качеством. В нем лицу, ответственному за систему качества, предоставляется самому оговаривать (в рамках общих требований) требования, выбранные им.

Ниже рассмотрены результаты этого мероприятия по определению требований к сварочным цехам.

Работа по пересмотру стандарта ISO 3834. Ответственными комитетами CEN и ISO по европейским и международным стандартам были приняты следующие решения:

в будущем должна быть разработана серия стандартов ISO 3834 и EN 729 в соответствии с Венским

Сопоставительное сравнение ISO 3834-2, -3 и -4

№	Элемент стандарта	ISO 3834-2	ISO 3834-3	ISO 3834-4
1	Пересмотр требований	Необходим		
		Требуется документация	Может потребоваться документация	Документация не требуется
2	Пересмотр технических характеристик	Необходим		
		Требуется документация	Может потребоваться документация	
3	Выполнение работ по субподрядам	Субподрядчик выполняет функции изготовителя в отношении субподряда, заключенного с ним на определенную продукцию, услуги и/или деятельность, однако конечная ответственность за качество лежит на изготовителе		
4	Сварщики и операции по сварке	Требуется квалификация		
5	Персонал по координации в области сварки	Требуется		Специальных требований нет
6	Специалисты в области контроля и проведения испытаний	Требуется квалификация		
7	Производственное и испытательное оборудование	Соответствующее и доступное, требуемое для подготовки, выполнения процесса, испытаний, перевозки и погрузки в сочетании с оборудованием, обеспечивающим безопасность работ, и защитной спецодеждой		
8	Техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования	В таком объеме, как это необходимо для обеспечения, поддержания и достижения соответствия продукции		Насколько это необходимо для обеспечения соответствия и доступности оборудования
		Требуются документальные планы и записи		Специальных требований нет
9	Спецификация оборудования	Необходима		То же
10	Производственное планирование	Необходимо		» »
		Необходимы документальные планы и протоколы	Рекомендуются документальные планы и протоколы	
11	Техническое описание сварочных методик	Необходимо		Необходим соответствующий способ сварки
12	Оценка сварочных методик	Необходима		Специальных требований нет
13	Контроль партий изделий	Если требуется	Специальных требований нет	
14	Хранение и эксплуатация расходных сварочных материалов	Необходима методика в соответствии с рекомендациями поставщика		В соответствии с рекомендациями поставщика
15	Хранение основного материала	Необходима защита от влияния окружающей среды; во время хранения требуется поддерживать специальную маркировку		Специальных требований нет
16	Термическая обработка после сварки	Подтверждение выполнения требований в соответствии с производственным стандартом или техническими требованиями		То же
		Требуется наличие методики, записи о термообработке и возможность сопоставить эту запись с готовой деталью	Требуется методика и запись о термообработке	
17	Контроль и испытания до, во время и после сварки	Необходим		Если требуется
18	Несоответствие и корректирующие действия	Внедрение мер контроля		Внедрение мер контроля
		Требуются методы ремонта и/или устранения дефектов		
19	Калибровка и оценка измерительного, контрольного и испытательного оборудования	Необходимы	Если требуется	
20	Маркировка во время процесса	Если требуется		То же
21	Возможность оперативного контроля	То же		» »
22	Отчеты о качестве	» »		



соглашением между ISO и CEN, при этом стандарты ISO являются преобладающими; предыдущая дифференциация требований к уровню качества (комплексных, стандартных, элементарных) должна быть сохранена;

серия стандартов ISO 3834 должна охватывать, как и ранее, процессы сварки плавлением и называться «Требования к уровню качества сварки плавлением металлических материалов»;

стандарты ISO 14554 (части 1 и 2) «Требования к уровню качества сварки — контактная сварка металлических материалов» [10, 11] также необходимо пересмотреть;

будущие части 2–4 стандарта ISO 3834 [12–14] не будут включать нормативные ссылки на другие стандарты ISO, связанные с требованиями к уровню качества сварки. С этой целью будет разработана отдельная часть (ISO 3834, часть 5) [15].

При соблюдении трехуровневой системы качества возможна сертификация в соответствии с ISO 9001 на всех уровнях. Производитель должен сам указать выбранный им уровень, если это не следует из требований для конкретного случая применения, в частности в европейских странах для резервуаров под давлением без огневого подвода теплоты из EN 13445:2002 «Резервуары под давлением без огневого подвода теплоты. Часть 4 «Изготовление» [16] или в Германии для стальных конструкций из DIN 18800-7:2002 «Стальные конструкции. Часть 7 «Выполнение и аттестация инженеров», или для железнодорожных вагонов из DIN 6700 «Сварка железнодорожных вагонов и их элементов». Часть 2 «Аттестация производителей свариваемых материалов для подвижного состава. Обеспечение качества» [17].

Приоритеты при дальнейшем обсуждении, связанном с пересмотром стандарта ISO 3834. Уровни качества. После внесения поправок в ISO 9001:2000, когда стала возможна комбинация сертификации в соответствии с ISO 9001 со всеми частями ISO 3834, возник вопрос, все ли еще необходимы три уровня требований к сварочным цехам в ISO 3834. На данном этапе (май, 2003 г.) при обсуждении был сделан вывод о том, что существующая система должна быть сохранена по следующим причинам:

трехуровневая система нашла применение после введения стандартов EN 729 и ISO 3834;

в отношении использования ISO 3834 в производственных стандартах необходимо делать ссылку на все три уровня качества в зависимости от нагрузок и требований техники безопасности, например в EN 13445:2002 ссылка сделана на уровень в соответствии с частью 3, в DIN 18800-7:2002 — на уровни в соответствии с частями 2–4, в DIN 6700 — на уровни в соответствии с частями 3 и 4.

Это ведет к делению качества на три уровня, их отбору и использованию, что очень близко к уровням, предписываемым бывшим стандартом ISO 3834. В новой части «Руководство по выбору и использованию» требования трех уровней четко определены в таблице.

Рабочая группа ISO TC44 SC10, ответственная за пересмотр ISO 3834, не принимала решений относительно определений, связанных с продукцией, по трем уровням качества. Это должно быть предоставлено производителям и пользователям сварной продукции, а также связанным с ними директивам и производственным стандартам.

Предложение следующих определений **не было принято**:

часть 2 «Комплексные требования к уровню качества: применение к конструкциям, разрушение швов в которых может привести к разрушению конструкции, и к конструкциям, последствия разрушения которых почти или вообще невозможно проконтролировать»;

часть 3 «Основные требования к уровню качества: применение к конструкциям, разрушение швов в которых серьезно ограничивает использование конструкций по назначению, и к конструкциям, разрушение которых оказывает только незначительное влияние на безопасность людей и изделий»;

часть 4 «Элементарные требования к уровню качества: применение к конструкциям, разрушение швов в которых не оказывает серьезного влияния на использование конструкции по назначению, и к конструкциям, разрушение которых не оказывает никакого влияния на безопасность людей и изделий».

Нормативные ссылки. Необходимо обсудить еще одно дополнительное изменение в пересмотренном стандарте ISO 3834, касающееся ссылок на стандарты, которые также применимы для выполнения требований к уровню качества сварки и должны быть рассмотрены.

Планируется сделать непрямую ссылку на стандарты, которые также применимы посредством новой части 5 «Нормативные ссылки для выполнения требований ISO 3834-2, ISO 3834-3 и ISO 3834-4», в которой стандарты, также применимые, приведены в виде таблицы в соответствии с процессами дуговой, электронно-лучевой, лазерной и газовой сварки в суммарном виде.

Цель этого мероприятия заключалась в том, чтобы включить в региональные своды стандартов части 1–4 без каких-либо исправлений в тексте и сделать так, чтобы региональная часть 5, отклоняющаяся от ISO 3834-5, могла иметь ссылку на региональные стандарты вместо стандартов ISO. Это позволит внедрить стандарт ISO 3834 и в тех странах, где еще не преобразовали региональные своды стандартов в стандарты ISO или преобразовали частично, например в США и Японии.

Необходимо отметить, что сертификация в соответствии со стандартом ISO 3834 возможна только в том случае, если стандарты, на которые сделана ссылка, являются стандартами ISO или стандартами с содержанием, которое подтверждено как идентичное органом сертификации.

Представленная концепция была разработана ответственной рабочей группой WG 3 «Пересмотр ISO 3834» под руководством секретариата Германии и принята ISO TC44 SC10 «Унификация требований в области сварки металла» для пуб-



фикации в качестве проекта от комитета. В настоящее время к мировому эксперту по этому вопросу направлена просьба о предоставлении комментариев.

1. *ISO 9001:2000*. Quality management system. — Requirements.
2. *ISO 9000:2000*. Quality management system. — Fundamentals and vocabulary.
3. *DIN 8563-1:1986*. Quality assurance of welded structures. — Part 1: Fundamentals.
4. *DIN 8563-2:1978*. Quality assurance of welding operations. — Part 2: Requirements regarding the firm.
5. *DIN 18800-7:2002*. Steel structures. — Part 7: Execution and constructor's qualification.
6. *Document IIW-902-86*. «Guidelines for Quality Assurance in Welding Technology».
7. *ISO 9004:2000*. Quality management system. — Guidelines for performance improvements.
8. *ISO 9002:1994*. Quality systems. — Model for quality assurance in production, installation and servicing.
9. *ISO 9003:1994*. Quality systems. — Model for quality assurance in final inspection and test.
10. *ISO 14554-1:2000*. Quality requirements for welding. — Resistance welding of metallic materials. — Part 1: Comprehensive quality requirements.
11. *ISO 14554-2:2000*. Quality requirements for welding. — Resistance welding of metallic materials. — Part 2: Elementary quality requirements.
12. *Committee Draft ISO/CD 3834-2*. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. — Part 2: Comprehensive quality requirements (ISO/CD 3834-2:2003).
13. *Committee Draft ISO/CD 3834-3*. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. — Part 3: Standards quality requirements (ISO/CD 3834-3:2003).
14. *Committee Draft ISO/CD 3834-4*. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. — Part 4: Elementary quality requirements (ISO/CD 3834-4:2003).
15. *Committee Draft ISO/CD 3834-5*. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. — Part 5: Normative references to fulfil the requirements of ISO 3834-2, ISO 3834-3 and ISO 3834-4 (ISO/CD 3834-5:2003).
16. *EN 13445-4:2002*. Unfired pressure vessels. — Part 4: Fabrication.
17. *DIN 6700-2:2001*. Welding of railway vehicles and parts. — Part 2: Qualification of manufacturer of welded rolling stock materials. — Quality assurance.

History of development of the quality management system standards of the ISO 9000 series and degree of their conformity to later standards ISO 3834:1994 and EN 729:1994 are considered. Priorities related to revision of standard ISO 3834 in terms of acceptance of improved standard ISO TC 44 SC «Unification of Requirements in the Field of Metal Welding» are noted.

Поступила в редакцию 07.07.2003



ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА МОРСКИХ ЛЕДОСТОЙКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ ШЕЛЬФА АРКТИКИ

Академик РАН **И. В. ГОРЫНИН**, **А. В. ИЛЬИН**, д-р техн. наук, **А. В. БАРАНОВ**, **В. П. ЛЕОНОВ**, кандидаты техн. наук (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. С.-Петербург, РФ)

Для обеспечения эксплуатационной надежности корпусных конструкций морских стационарных платформ шельфа Арктики необходимо выполнение комплекса требований к качеству сварных соединений, гарантирующих предотвращение циклических и хрупких разрушений. Анализируются проблемы, возникающие при использовании подходов зарубежных специалистов к обоснованию этих требований, и предлагаются пути их решения на основе методов физического моделирования процессов разрушения. Результаты исследований реализованы в нормативных и методических документах Регистра РФ и использованы при сертификации материалов и технологических процессов сварки для конструкций шельфа.

Ключевые слова: морские ледостойкие стационарные платформы, сварные соединения, концентраторы напряжений, циклическая прочность, трещиностойкость

Обеспечение эксплуатационной надежности корпусов морских ледостойких стационарных платформ (МЛСП), работающих при сочетании низких климатических температур (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) с многоцикловым ледовым (до 10^7) и ветроволновым (до 10^8) нагружением, представляет собой технически сложную задачу. В этих условиях велика опасность хрупких разрушений от исходных технологических дефектов или развившихся при эксплуатации усталостных трещин. Наиболее слабыми звеньями конструкций являются сварные соединения, содержащие концентраторы напряжений — источники возникновения усталостных трещин, зоны с ослабленным сопротивлением хрупкому разрушению и наличием остаточных сварочных напряжений (ОСН) высокого уровня. В связи с этим основным средством обеспечения работоспособности является соблюдение определенных требований к качеству сварных соединений, включающих: требования к вязкости и хладостойкости материала, обеспечивающие предотвращение хрупких разрушений, и требования к конструктивно-технологическому оформлению, обеспечивающие предотвращение усталостных повреждений.

До настоящего времени методическая база для обоснованного назначения этих требований отсутствовала, что вынуждало проектантов обращаться к зарубежным нормативным и методическим документам [1–3 и др.]. Такая практика не могла считаться удовлетворительной из-за отсутствия возможности учета специфики применяемых в России материалов, технологических процессов сварки и методов повышения сопротивления усталости, а также более тяжелых условий эксплуатации на шельфе Арктики по отношению к незамерзающим морским бассейнам (на освоение которых в основном и ориентированы зарубежные нормы). Рас-

сматривая сложившуюся за рубежом систему обеспечения надежности конструкций шельфа, необходимо остановиться на следующих моментах:

Проектирование с учетом усталости является обязательным для данных конструкций. Реальный спектр нагрузки по принципу линейного суммирования повреждения заменяется действием эквивалентного напряжения с размахом $\Delta\sigma_{\text{ев}}$. Далее используются две расчетные схемы (или их комбинация), которые условно можно назвать методом номинальных напряжений и методом «Hot Spot Stress». По первой схеме сварные соединения по уровню циклической прочности подразделяются на классы (C, D, E, F, F2, G, W и др. по международной классификации), каждый из которых характеризуется определенной кривой допускаемых циклических напряжений (кривой усталости) вида

$$\lg N = \lg \alpha - m \lg \Delta\sigma_{\text{ев}}, \quad (1)$$

где N — количество циклов до разрушения; α , m — параметры кривой.

Таким образом, положение кривой в интегральном виде учитывает все факторы, определяющие циклическую прочность соединения: концентрацию напряжений, уровень ОСН, структурную неоднородность. Во второй схеме вводится единая «базовая» кривая усталости, также интегрально учитывающая все факторы, связанные с наличием сварного шва, а фактор масштаба и конфигурации соединения учитывается путем расчета величины «Hot Spot Stress» — напряжений в «горячей точке», рассматриваемых как номинальные в формуле (1).

Практика использования обеих схем позволяет заключить, что в их рамках сложно выявить влияние на циклическую прочность отдельных факторов (размера и конфигурации свариваемых элементов, условий нагружения, особенностей технологии сварки, определяющих уровень ОСН и геометрию концентраторов), а следовательно, и решать задачу выбора технологии сварки в зави-



симости от требуемого циклического ресурса. Метод «Hot Spot Stress» позволяет отделить конструктивные факторы от технологических, но он замкнут на дополнительные численные исследования и использует весьма спорную идею разделения концентрации напряжений на «связанную с наличием сварного шва» и «связанную с сопряжением элементов различной жесткости».

Требования к вязкости и хладостойкости материала, наряду с общей для судостроения регламентацией работы удара образца с острым надрезом KCV в зависимости от предела текучести $\sigma_{0,2}$: KCV (Дж/мм²) > 0,1 $\sigma_{0,2}$ (МПа) содержат значительно более жесткие ограничения по толщине используемых материалов. В целом они сводятся к выполнению неравенства

$$T_p \geq T_n + \Delta T(S), \quad (2)$$

где T_p и T_n — соответственно расчетная температура конструкции и температура определения работы удара; $\Delta T(S)$ — температурный запас, зависящий от толщины S и достигающий 25...35 °C при $S < 40$ мм.

В дополнение к этому впервые в судостроении вводится как обязательный контроль параметра трещиностойкости критического раскрытия вершины трещины (СТОД): для материала сварных соединений при $S > 40...50$ мм, а для основного металла — при $S > 60...70$ мм. Регламентируемый уровень СТОД в различных документах варьируется от 0,1 до 0,35 мм, но часто оставляется на усмотрение заказчика техники.

Использование этих принципов для конструкций шельфа Арктики затруднено тем, что при $T_p = -40...-50$ °C выполнение условия (2) с используемыми температурными запасами оказывается невозможным даже для сталей наиболее хладостойкой температурной категории F и соответствующих сварочных материалов уже при толщине свыше 20...30 мм. В этом случае становится особенно актуальным введение процедуры определения применимости материала по критерию предотвращения хрупких разрушений и обоснование критерия трещиностойкости с позиций механики разрушения.

Задачи разработки требований к циклической и хрупкой прочности сварных соединений МЛСП тесно связаны между собой, так как предельные размеры усталостной трещины, допускаемые в оценках циклической прочности, должны быть безопасными и по критерию предотвращения хрупких разрушений, а фактор циклической нагруженности является одним из основных при определении требований к вязкости материалов. Очевидно, что для решения этих задач необходимо обратиться к физическим методам анализа процессов разрушения. Ниже представлены основные результаты исследований, выполненных в ЦНИИ КМ «Прометей» в этих направлениях.

Прогнозирование циклической прочности типовых сварных узлов МЛСП. Основными направлениями исследований являлись: анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) зон

наиболее вероятного возникновения усталостных трещин концентраторов формы и конструктивных дефектов шва, определение характеристик сопротивления материала усталостному разрушению, расчетные оценки на базе выбранной модели разрушения. Для прогнозирования долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений наиболее распространен подход, определяющий количество циклов N_Σ до образования трещины размером (глубиной) a_f в виде

$$N_\Sigma = N_i(e_a) + \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{V_k(\Delta K_1, K_{1max})}, \quad (3)$$

где $N_i(e_a)$ — зависимость количества циклов до появления трещины от амплитуды деформации e_a ; a, a_0 — текущий и начальный размеры (глубина) трещины; $V_k(\Delta K_1, K_{1max})$ — зависимость скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_1 и максимального его значения в цикле K_{1max} .

Применительно к сварным соединениям такой подход требует определения параметров НДС: e_a , зависимостей ΔK_1 и K_{1max} от a , а также функций, характеризующих сопротивление материала разрушению: $N_i(e_a)$ и $V_k(\Delta K_1, K_{1max})$. Однако имеется более сложная проблема, связанная с отсутствием определенности в выборе начального размера трещины a_0 при представлении ресурса как суммы двух слагаемых. Она особенно актуальна именно для сварных соединений с острыми концентраторами напряжений, радиус которых R следует рассматривать как случайную величину.

Основным методом анализа НДС являлся численный метод конечного элемента (МКЭ). На базе многочисленных решений МКЭ предложено описывать распределение местных напряжений в зонах их концентрации соотношением [4–6]:

$$K_l(r) = 1 + \frac{A}{\sqrt{R + nr}}, \quad (4)$$

где $K_l(r)$ — коэффициент концентрации напряжений на расстоянии r от точки их максимума; $n = 4,5 + C(r/A)^2$; $C = 2...6$ (в зависимости от рассматриваемого направления). «Параметр макрогеометрии» A (мм^{0,5}) зависит от типа, размеров и условий нагружения соединения и может рассматриваться как обобщенная характеристика НДС концентратора напряжений. Это позволяет отделить технологический фактор (определяющий статистику ρ) от конструктивного, подлежащего оценке на стадии проектирования. Предложен ряд интерполяционных формул для оценок A применительно к двухмерным соединениям (стыковым, тавровым и др.), а также для пространственных (трехмерных) узлов [6]. Наиболее общее соотношение имеет вид

$$A = f(\theta) \left(\frac{a_1}{S^*} + \frac{a_2}{t^*} + \frac{a_3}{h^*} \right)^{-0,5},$$

где $f(\theta)$ — функция угла прилегания шва к основному металлу (может быть принята как $\sin^{0,5}\theta$),



S^*, t^*, h^* — размеры соединения в проекции его на плоскость, перпендикулярную оси шва; $a_1 \dots a_3$ — коэффициенты, полученные при обработке массивов решений по методу наименьших квадратов. Переход от местных напряжений к интенсивности местных деформаций e_i осуществляется по формуле $K_{ti}(r) = K_i(r)f_1f_2$, где K_{ti} — отношение $e_i E$ к перпендикулярной оси шва компоненте номинальных напряжений [7]. Поправка f_1 учитывает наличие двухосного номинального напряженного состояния, поправка f_2 — возможность упругопластического деформирования с учетом механической неоднородности основного металла и металла шва.

Методом регистрации изменения потенциальной энергии при моделировании МКЭ продвижения трещины получены зависимости ΔK_1 и K_{1max} от a в полях суммарных (остаточных и эксплуатационных) напряжений. Для трещин, развивающихся из концентраторов напряжения формы шва, рекомендованы следующие интерполяционные формулы:

$$\Delta K_1 = \sigma^H Y_1 Y_3 \pi a;$$

$$K_{1max} = [\sigma_{0x} Y_4 (1 - \sigma_{II} / \sigma_r) + \sigma_{II}] Y_1 Y_3 \pi a, \quad (5)$$

где Y_1 — поправочная функция, учитывающая концентрацию напряжений: $Y_1 = 1 + \frac{0,44A}{a(1+3a/A^2)} \times (\sqrt{r+4,5a} - \sqrt{r})$; Y_3 — поправка Снеддона на форму трещины (отношение ее полуосей); σ_{0x} — средний уровень ОСН в концентраторе; Y_4 — поправочная функция, учитывающая градиент ОСН, равная $\exp[-0,2(a/Z)^2]$.

Обобщение результатов решения термомеханических (сварочных) задач МКЭ позволило предложить дифференциацию сварных соединений по уровню перпендикулярной компоненты ОСН σ_{0x} в зависимости от количества проходов при сварке, наличия ограниченных усадочных перемещений, температур фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода.

Для определения зависимостей, входящих в (3), выполнен комплекс исследований сопротивления усталостному разрушению отечественных судокорпусных сталей. Получено, что зависимость $N_i(e_a)$ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho = -1$ может быть задана в виде

$$e_a E = 11640 N_i^{-0,390} + 0,5 \sigma_B \text{ (МПа)}, \quad (6)$$

где σ_B — предел прочности.

Воздействие коррозионной среды, возрастание r до предельных высоких значений, имитирующее наличие ОСН, наличие необработанной поверхности проката в сходной степени приводят к практическому исчезновению влияния прочности материала на величину N_i .

Для всех судокорпусных материалов получены практически совпадающие зависимости $V_k(\Delta K_1, K_{1max})$ (диаграммы циклической трещиностойкости). Данные для металла сварных соединений в состоянии после сварки характеризуются большим разбросом, но после применения обжатия образцов для снятия ОСН пластическим деформированием

(до 0,5... 1,0 %) они практически совпадают с данными для основного металла. Влияние знакоположительной асимметрии цикла нагружения на кинетику трещины резко выражено лишь в припороговой области диаграмм (при $V_k < 10^{-8}$ м/цикл) и может моделироваться изменением пороговых значений $\Delta K_1(\Delta K_{th})$ как функции ρ . В итоге для описания кинетики трещины в металле нетермообрабатываемых сварных соединений рекомендуется соотношение

$$V_k \text{ (м/цикл)} = 8,6 \cdot 10^{-11} [\Delta K_1 \text{ (МПа}\sqrt{\text{м}}) - 7,0(1 - 0,85r)]^{2,3}. \quad (7)$$

В связи с проблемами использования формулы (3) для прогнозирования долговечности сварных соединений с «острыми» концентраторами напряжений была предложена модель развития усталостного разрушения, рассматривающая скорость его распространения как сумму двух составляющих: скорости роста макротрещины V_k , определяемой по (7), и дополнительной скорости повреждения V_i , определяемой амплитудой пластических деформаций e_{apl} , в определенной точке [7]:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{V_i + V_k}. \quad (8)$$

Функцию $V_i(e_{apl})$ определяли по результатам испытаний гладких образцов (6). При расчете e_{apl} учитывали снижение прочностных характеристик материала в приповерхностных слоях металла: $e_{apl} = e_a - S_c^T [1 - \exp(-ka)] / E$, где S_c^T — циклический предел текучести при установившемся режиме деформирования; k — характеристика материала.

Численное интегрирование (8) осуществляли с помощью специальной программы для ПЭВМ, алгоритм которой включал определенные выше функции $e_a(a)$ и $K_1(a)$. Проверку достоверности модели проводили сопоставлением результатов расчета и испытаний образцов с механически инициированными концентраторами напряжения при различном соотношении параметров A, ρ и варьировании r . В отличие от известных эмпирических соотношений (Петерсона, Зибеля-Штиллера) модель позволяет достаточно точно прогнозировать совместное влияние на долговечность концентрации напряжений и знакоположительной асимметрии цикла.

Положительные результаты верификации модели позволили использовать ее как инструмент численного исследования процесса разрушения сварных соединений с геометрически неоднородными концентраторами напряжений формы шва. Характеристики распределений радиуса сопряжения шва с основным металлом (ρ_a — математическое ожидание, ρ_σ — стандартное отклонение) были определены методом слепков для основных технологических процессов сварки. При моделировании процесса рассматривали развитие трещины в поле местных напряжений, определяемом статистикой микрогеометрии концентратора нап-

ряжений. В результате расчетных исследований установлено, что для предельно высокого уровня ОСН и наиболее неблагоприятных параметров распределения расчетные кривые усталости хорошо совпадают с упомянутыми выше нормативными кривыми (при соответствии толщин свариваемых элементов). Это согласуется со способом получения последних как нижних огибающих большого количества экспериментальных данных.

Показана возможность приведения расчетных оценок циклической прочности сварных соединений к следующим процедурам:

определение «базовой» кривой усталости в виде аналитического выражения (1) в зависимости от ожидаемого уровня ОСН (снижение уровня ОСН приводит к увеличению параметра m в формуле);

определение эффективного коэффициента концентрации напряжений сварного соединения по отношению к этой кривой по формуле: $K_{ef} = 1 + A/\sqrt{\rho_{ef}}$, где ρ_{ef} — характеристика технологического процесса сварки ($\rho_{ef} = \rho_a - \rho_\sigma$).

Эта методология позволяет удовлетворительно прогнозировать и эффективность дополнительных технологических обработок, приводящих к улучшению геометрии концентратора напряжения (аргонодуговое оплавление, механическая обработка) или образованию сжимающих остаточных напряжений (поверхностно-пластическое деформирование).

Необходимо подчеркнуть, что положение видимых базовых кривых усталости имеет сложную физическую природу, отражая преобладание деформационного процесса повреждения сварного соединения в малоцикловой области нагружения, и условия страгивания микротрещины в многоцикловой области.

Оценка прочности сварных соединений МЛСП по отношению к хрупким разрушениям. Исследования НДС в этом направлении включали прогнозирование параметров механики разрушения для трещин в поле ОСН и эксплуатационных напряжений при их произвольной ориентации, размерах и пространственном положении. Показано, что для получения предельных оценок суммирование остаточных и эксплуатационных напряжений должно проводиться по принципу суммирования J -интегралов. В этом случае перераспределение пластических деформаций при продвижении трещины приводит к тому, что с учетом ОСН вместо ее длины следует использовать размер «зоны процесса» при сварке или толщину соединения при найденных в работе численных коэффициентах. Например, предельные оценки для трещины, ориентированной поперек шва, приводят к формуле

$$J_1^\Sigma = 1,2\sigma_T^2 S/E' + (\sigma^H + \sigma_R)^2 Y_2^2 Y_3^2 \pi a, \quad (9)$$

где Y_2 — поправочная функция, учитывающая влияние свободных поверхностей в пластине ограниченной толщины; σ_R — ожидаемый максимальный уровень реактивных напряжений.

Высокий уровень суммарных напряжений, характерный для сварных узлов МЛСП, определяет

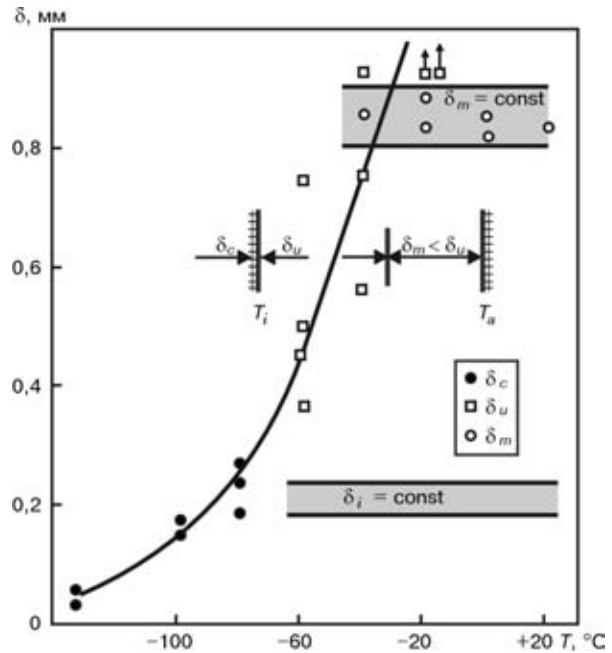


Рис. 1. Типы разрушений при испытаниях на трещиностойкость и определяемые параметры (δ_m — СТOD при максимуме перегрузки)

необходимость использования при аттестации материалов параметров нелинейной механики разрушения: параметра СТOD, применяемого в зарубежном судостроении, или критического значения J -интеграла. В этих разделах ГОСТ 25.506–85 отличается от современных зарубежных стандартов и не распространяется на материалы с наличием ОСН. Поэтому принятая методика испытаний на трещиностойкость использовала основные процедуры стандарта BS 7448, pp.1,2, включая метод бокового обжатия для снятия ОСН и процедуру металлографических исследований для определения корректности испытаний отдельных структурных составляющих металла сварных соединений.

Результаты определения температурных зависимостей трещиностойкости для всех рассмотренных судокорпусных материалов позволили выявить три области с различным типом разрушения (рис. 1): высокотемпературную (разрушение происходит полностью вследствие стабильного вязкого подраста трещины), промежуточную (стабильный рост трещины завершается нестабильным разрушением с резким переходом от волокнистого излома к кристаллическому) и низкотемпературную (стабильный рост трещины отсутствует, а излом полностью кристаллический). Лишь в последнем случае условия разрушения характеризуются единственным параметром — трещиностойкостью. В промежуточной области критические параметры при страгивании трещины и нестабильном разрушении различны, а стабильный рост трещины описывается так называемой R -кривой. Резко чувствительными к структурному состоянию материала и толщине испытуемого образца являются температурные границы различных типов разрушения, а для промежуточной области — трещиностойкость, определенная по моменту нестабильного разрушения. В отличие от этого характерис-

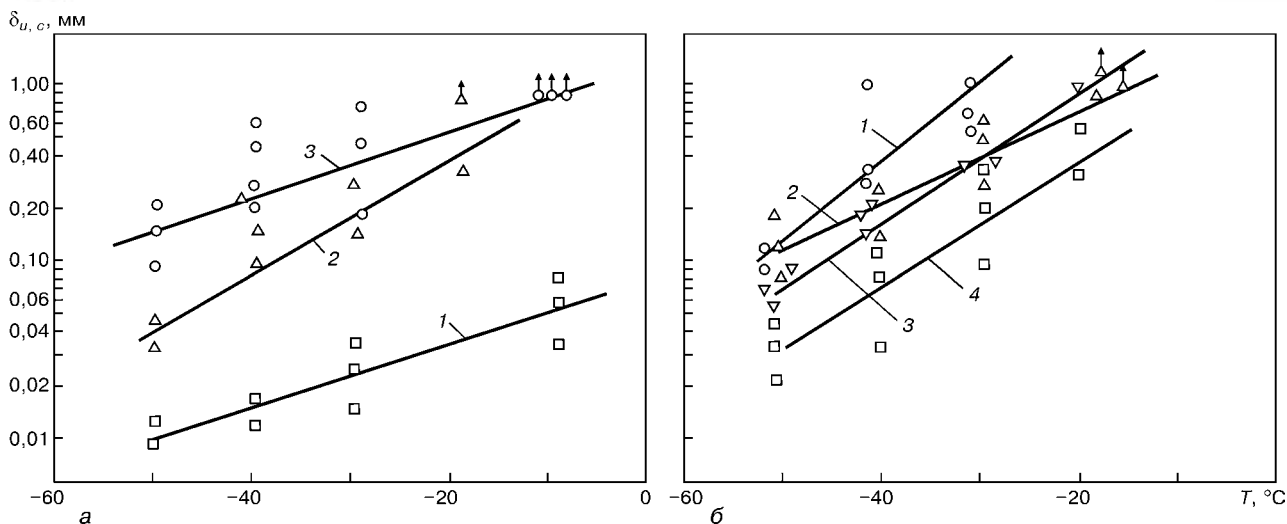


Рис. 2. Результаты испытаний на трещиностойкость металла шва: а – ручная сварка: 1 – УОНИИ-13/45Р; 2 – 48ХН2; 3 – 48ХН5; б – автоматизированная: 1 – Св-10ГНА + 48АФ51; 2 – Св-08ГН2МДТА, Аг + СО₂; 3 – Св-04НЗГМТА + 48АФ50; 4 – Св-04НЗМГА + ФИМС20П

тики страгивания трещины и *R*-кривые не являются структурно-чувствительными, а *R*-кривые не зависят от температуры. Ее снижение отражается на укорочении участка вязкого подраста трещины и сближении точек неустойчивости и страгивания трещины.

Для судокорпусных сталей, соответствующих требованиям современных технических условий [8 и др.], уровень СТOD для температур до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ отвечает самым высоким требованиям. Сложнее его достичь для металла ЗТВ и шва сварных соединений. Для металла ЗТВ наиболее критической является крупнозернистая структурная составляющая у границы сплавления, возрастание погонной энергии сварки приводит к падению ее трещиностойкости. Для металла шва наибольшую проблему представляет обеспечение высокой трещиностойкости при автоматической сварке под флюсом. При ручной сварке достижение СТOD на уровне 0,1...0,2 мм при температуре ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивается применением электродов с содержанием никеля до 3 %, при сварке в защитных газах – применением смеси Ag + CO₂, при автоматической – применением агломерированных флюоритно-основных флюсов с ограничением прочности металла шва и снижением погонной энергии сварки (рис. 2).

Анализ особенностей хрупкого разрушения позволяет уточнить проблему обоснования критерия прочности. В зарубежных нормах используется метод «СТOD Design Curve» [9 и др.], где в условии прочности сопоставляются результаты определения СТOD с расчетным раскрытием трещины для выбранного «расчетного» дефекта. При использовании этой процедуры возникают следующие проблемы:

выбор размера «расчетного» дефекта для циклически нагружаемых конструкций. Если учесть возможность роста дефекта при исходных его размерах, принятых исходя из выявляющей способности неразрушающих средств контроля (как это делается в атомной энергетике), то требования по

трещиностойкости для материала сварных соединений оказываются трудновыполнимыми;

теоретическое обоснование перехода от результатов испытаний образца к прогнозированию разрушения конструкции с иной конфигурацией дефекта и отличными условиями нагружения.

Известна неинвариантность параметров трещиностойкости, определенных по моменту неустойчивого разрушения (именно такова практика определения СТOD при сертификационных испытаниях). Целесообразно проанализировать также возможность учета резерва сопротивления материала распространению разрушения за счет стабильного роста трещины.

Таким образом, для обоснования критерия прочности необходимо сопоставление условий стабильного роста трещины и неустойчивого разрушения в образце и элементе натурной конструкции. Известное условие неустойчивости ($\partial J/\partial a > \partial J_c/\partial a$), [10] не описывает наблюдаемые разрушения, так как не учитывает возможности резкой смены микромеханизма разрушения, наблюдаемой экспериментально.

Для решения этих теоретических и прикладных проблем предложена физическая модель стабильного роста трещины, перехода «стабильный рост трещины/неустойчивое хрупкое разрушение» и обратного перехода – торможения трещины [11–13]. Стабильный рост трещины рассматривается как результат достижения критического НДС в ее вершине при дефиците интенсивности высвобождаемой упругой энергии. В предположении о постоянстве удельной работы пластического деформирования при росте трещины получены уравнения, описывающие наблюдаемые *R*-кривые для мало- и полномасштабной текучести, в условиях плоской деформации и при отклонении от них (режим туннелирования трещин отрыва). Предложено и экспериментально обосновано энергетическое условие неустойчивого разрушения при скачкообразном изменении его микромеханизма, подтвержденное методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, испытани-

ями на трещиностойкость с варьированием податливости нагружающей системы, размеров и конфигурации образцов.

Развитые теоретические представления позволяют:

обосновать наблюдаемые корреляционные зависимости между температурой торможения хрупкой трещины и различными критическими температурами вязкохрупкого перехода;

описать влияние масштаба и конфигурации образцов на условия нестабильного разрушения. Практически важен подтверждаемый экспериментально (рис. 3) вывод о том, что испытания стандартных образцов при изгибе или внецентренном растяжении являются более жесткими по соотношению упругой составляющей J -интеграла к полной его величине по сравнению с возможными вариантами расположения трещины в натурном элементе конструкции той же толщины.

В результате обосновывается подход, рассматривающий в качестве критического события момент перехода к нестабильному разрушению (в отличие от существующих, рассматривающих момент страгивания трещины). Это позволяет формулировать условие хрупкой прочности в виде, не требующем введения конкретных размеров «расчетного дефекта» — варьирование размера и положения дефекта позволяет определить наиболее опасную ситуацию по сочетанию полной величины J -интеграла и ее упругой составляющей. Используя полученные оценки параметров нагрузки для трещин в поле суммарных напряжений обоснованы требования к уровню относительной (безразмерной) трещиностойкости $\beta = J_{ct} E / (\sigma_{0,2} S)^2$ по «абсолютному» критерию предотвращения хрупких разрушений (циклически нагружаемые конструкции) и для трещин с размерами, ограниченными зоной высоких растягивающих ОСН (для конструкций, нагружаемых преимущественно статически). При переходе к регламентации абсолютного уровня параметра СТOD требуемая величина оказывается пропорциональной толщине и пределу текучести материала.

Реализация выполненных исследований. Основные исследования были завершены разработкой нормативных документов и методик Регистра РФ, осуществляющего контроль за проектированием и строительством морской техники.

Работы в области прогнозирования циклического ресурса сварных элементов обобщены в виде одобренной Регистром РФ «Методики определения кривых допускаемых циклических напряжений и выбора оптимального конструктивно-технологического оформления сварных соединений». Она позволяет осуществлять выбор толщин основных конструктивных элементов, определять объемы дополнительных технологических обработок, повышающих сопротивление усталости, возможность использования узлов с конструктивными непропарами, необходимость снижения конструктивной концентрации напряжений. Соотношения для расчета временного ресурса конструкции включают характеристики распределений Вейбулла нестационарной эксплуатационной нагрузки и параметры

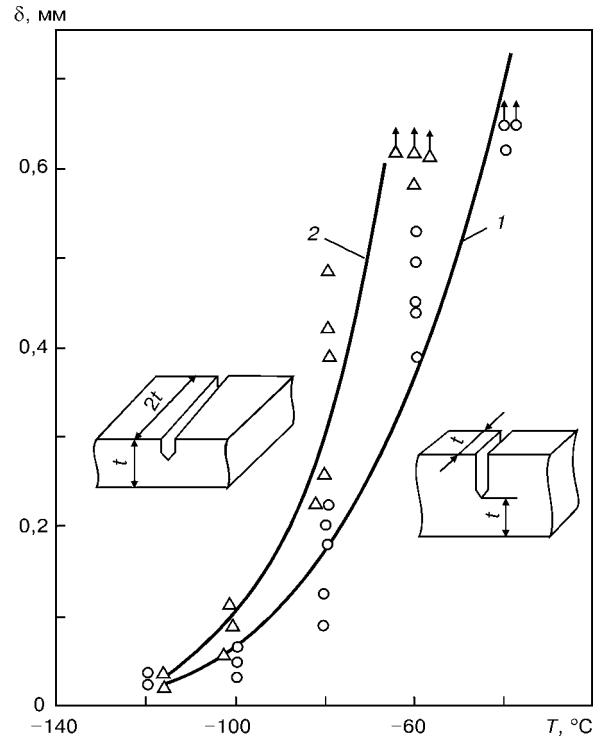


Рис. 3. Сопоставление результатов испытаний образцов стандартной (1) и нестандартной (2) геометрии

кривых усталости сварного соединения при стационарном нагружении, зависящие от комплекса конструктивных и технологических факторов. Методика содержит процедуру выбора базовой кривой усталости, исходя из ожидаемого уровня ОСН и асимметрии цикла нагружения, расчетное определение величины K_{ef} с учетом конструктивных особенностей, размеров и условий нагружения соединения (определение параметра A) и технологии выполнения сварного шва (определение ρ_{ef}). Кроме того, включена процедура оценки ресурса на стадии роста усталостной трещины для элементов конструкций типа «обрыва связей» и соединений с исходными конструктивными дефектами.

С использованием методики выполнены оценки циклического ресурса основания и ледового пояса проекта МЛСП «Приразломная», показавшие реальность возникновения преждевременных циклических разрушений при ледовой нагрузке элементов ледового пояса и необходимость использования при строительстве дополнительных технологических мероприятий.

Результаты обоснования критериев вязкости и хладостойкости вошли в выпущенные в 2000 г. «Правила классификации, постройки и оборудования МСП/ПБУ» Регистра, в части «Материалы», «Сварка», «Корпус». Здесь впервые в отечественном судостроении установлены объемы дополнительных испытаний материалов для обоснования области их применимости, основные положения методик испытаний, требования к параметру СТOD для основного металла и металла сварных соединений. Уровень требований зависит от категории элемента конструкции по степени их ответственности (тяжести последствий при разрушении) и условий его нагружения: циклического



или статического, а также возможности динамического характера приложения нагрузки.

Сформулированные требования использовали при разработке спецификаций на материалы и технологические процессы сварки для проектов МЛСП «Приразломная», «Малекпак», «Сахалин-2», а также для решения ряда частных вопросов (например, вопроса о допустимости отмены послесварочной термообработки соединений больших толщин).

Методические разработки в области испытаний на трещиностойкость вошли в одобренную Регистром РФ «Методику определения параметров трещиностойкости при статическом нагружении для металла сварных соединений». За последние годы она получила широкое апробирование при сертификационных испытаниях материалов и технологических процессов сварки, проведенных под надзором Регистра и зарубежных классификационных обществ (DnV, Lloyd и др.), а также при выполнении целевых программ Министерства науки РФ и договорных работ с Российским агентством по судостроению. Выполнены сертификационные испытания листового проката ряда металлургических предприятий России и разрабатываемых технологических процессов сварки для конструкций арктического базирования. В целом опыт этих работ показывает, что результаты дополнительных испытаний на трещиностойкость обычно позволяют существенно расширить область применимости сертифицируемого материала (вопреки ограничениям зарубежных нормативных документов) за счет увеличения информативности данных о материале.

Таким образом, результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований прочности сварных соединений позволили разработать взаимосогласованный комплекс норм и методик, обеспечивающий решение текущих задач проектирования и строительства конструкций морской техники для шельфа.

Provision of operating reliability of hull structures of off-shore platforms in the Russian shelf requires meeting a set of requirements to the quality of welded joints, guaranteeing prevention of cyclic and brittle fractures. Problems are analyzed, which arise when using the approaches, suggested by foreign experts, to substantiation of these requirements, and ways of solving them are proposed, proceeding from the methods of physical modeling methods of fracture processes. Investigation results are implemented in the codes and procedural documents of RF Register and are used in certification of materials and technological processes of welding for the shelf constructions.

1. *Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Unit.* — DnV, Det Norske Veritas. Classification Notes № 30.2. — 1984. — 60 p.
2. BS 7191: 1989. British Standard Specification for Weldable Structural Steels for Fixed Offshore Structures. — BSI, 1989. — 43 p.
3. *Canadian Standard Association. Preliminary Standard S473-M1989. Steel Structures. Part III of the Code for the Design, Construction and Installation of Fixed Offshore Structures,* 1990. — 85 p.
4. Ильин А. В., Леонов В. П., Маннишев Т. П. Влияние геометрии сварных соединений на концентрацию упругих напряжений // *Вопр. судостроения. Сер. Сварка.* — 1981. — Вып. 32. — С. 16–24.
5. *Расчетное определение долговечности сварных соединений с учетом влияния технологических факторов* / И. В. Горьнин, А. В. Ильин, В. П. Леонов и др. // *Судостр. пром-сть. Сер. Материаловедение, Сварка.* — 1990. — Вып. 10. — С. 3–13.
6. Ильин А. В., Леонов В. П. Совершенствование расчетных процедур оценки долговечности сварных соединений конструкций буровых платформ на основе моделирования процессов циклического разрушения // *Сб. науч. тр. Российского Морского Регистра Судоходства.* — 2000. — № 23. — С. 138–153.
7. Ильин А. В., Леонов В. П., Мизецкий А. В. Метод численного моделирования начальной стадии циклического повреждения сварных соединений. Построение S-N-кривых // *Вопр. материаловедения.* — 1996. — Вып. 2(5). — С. 62–76.
8. *ТУ 5.961-11804-2002.* Прокат толстолистовой из стали повышенной прочности улучшенной свариваемости.
9. *WES 2805.* Method of assesment for defects in fusion-welded joints with respect to brittle fracture // *Jap. Weld. Eng. Soc.* — 1980.
10. *Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х.* Вычислительная механика разрушения: Пер. с яп. — М.: Мир, 1986. — 334 с.
11. Ильин А. В., Мизецкий А. В. Условия стабильного роста трещины и нестабильного разрушения в материалах с вязкохрупким температурным переходом // *Вопр. материаловедения.* — 2000. — № 2 (22). — С. 84–104.
12. Ильин А. В. Прогнозирование вида J-R-кривых и условий стабильного роста трещины при однородном на фронте трещины напряженном состоянии // *Зав. лаб.* — 2001. — **67**, № 9. — С. 46–53.
13. Ильин А. В., Леонов В. П. Особенности использования параметра CTOD как характеристики перехода от режима стабильного роста трещины к нестабильному разрушению в конструкционных сталях // *Там же.* — 2002. — **68**, № 2. — С. 28–36.

Поступила в редакцию 26.05.2003



У ДК 621.791.75:621.791.947.5

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Н. КИДЗИ, К. КОБАЯСИ, Д. ИСИИ, Х. ЯМАОКА («Исикавадзима-Харима Хэви Индастриз», Япония)

Описаны разработанные и нашедшие применение при создании различных конструкций высокоэффективные способы двухдуговой сварки ТИГ и сварки МАГ на высоком переменном токе. Эти способы позволяют выполнять сварку с использованием больших токов и достигать значительной скорости наплавки по сравнению с обычными способами. Для способа А-ТИГ разработана эффективная технология сварки толстолистового металла.

Ключевые слова: способы дуговой сварки, ТИГ, двухдуговая сварка, А-ТИГ, производительность плавления, эффективность, проплавление, области применения

В промышленности широко применяются различные способы дуговой сварки, которые обеспечивают высокое качество сварных соединений. При этом важно правильно использовать те или иные способы сварки. Например, способ сварки ТИГ эффективен при использовании в различных пространственных положениях и обеспечивает необходимое проплавление соединяемых кромок. По этой причине этот способ широко применяется для сварки тонких и толстых листов и труб из различных материалов. Сварка МАГ, для которой в качестве защитного газа используют углекислый газ или смесь углекислого газа с аргоном, достаточно экономична и высокоэффективна и широко применяется в судо- и мостостроении.

По сравнению с другими способами сварки скорость расплавления металла при сварке ТИГ низкая, а глубина проплавления небольшая. При использовании сварки в конструкциях из толстолистового металла возникает необходимость увеличения скорости расплавления. С этой целью разработан высокоэффективный способ двухдуговой сварки ТИГ, который предполагает использование двух электродов в одной горелке. Благодаря двухдуговой сварке получают качественные сварные соединения при условии применения высокого сварочного тока.

Сварка МАГ является более эффективным по производительности способом по сравнению со сваркой ТИГ. Однако для сварки толстых плит, толщина которых превышает 50 мм, обычно применяют дуговую сварку под флюсом. Необходимость подачи флюса и удаления шлака препятствует повышению производительности. Сварка МАГ в узкий зазор имеет ограниченную область применения, поскольку требует специального сварочного оборудования и высокой квалификации сварщика. Кроме того, сварка МАГ выполняется на постоянном токе. При этом возникает магнитное дутье в условиях применения высокого тока. Пос-

леднее приводит к несплавлению из-за пальцеобразного профиля проплавления.

Авторами разработан высокоэффективный и простой в использовании способ сварки МАГ на высоком переменном токе. По сравнению с дуговой сваркой под флюсом данный способ обеспечивает стабильное горение дуги переменного тока, возможность выполнения сварки на переменном токе характеризуется образованием шлака в очень небольшом количестве, благодаря использованию металлической присадочной проволоки с небольшим содержанием флюса.

Способ сварки А-ТИГ с использованием активирующего флюса разработан Институтом электросварки им. Е. О. Патона в начале 1960-х годов. Он предполагает нанесение активирующего флюса на поверхность материала, благодаря чему увеличивается глубина проплавления. Сварка А-ТИГ позволяет сваривать металл толщиной до 12 мм за один проход без присадочного материала. Для соединения более толстых пластин необходимо применение многопроходной сварки. Для толстолис-

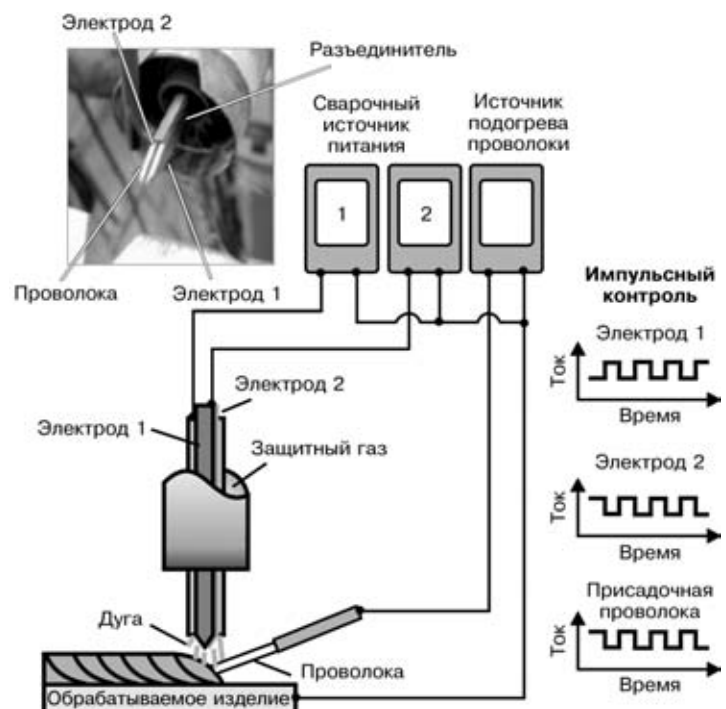


Рис. 1. Схема процесса двухдуговой сварки ТИГ

© Н. Кидзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямаока, 2003

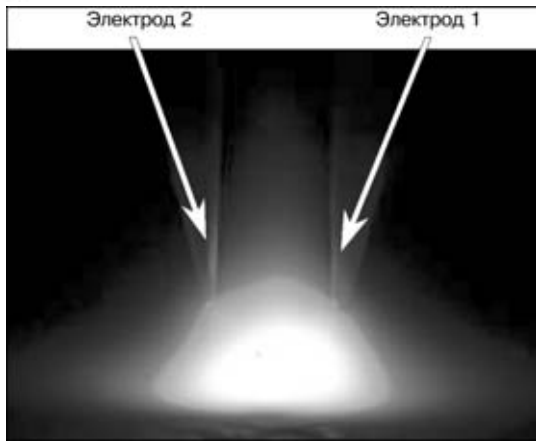


Рис. 2. Внешний вид двух дуг

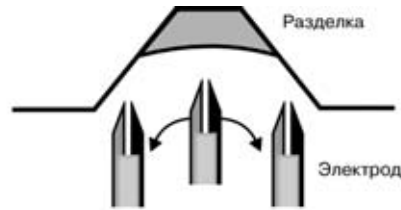
тового металла разработана технология, комбинирующая процесс А-ТИГ и обычную сварку МАГ.

Сварка по способу ТИГ. Обычно при сварке этим способом в диапазоне высоких токов мощность дуги становится избыточной. В сварочной ванне образуется большая выемка, которая препятствует формированию качественного сварного соединения, поэтому для повышения производительности процесса сварки путем использования высокого тока существовало ограничение. Разработанный способ сварки предполагает использование двух электродов в одной горелке. При этом импульсный ток подается независимо к каждому электроду от двух источников питания (рис. 1). Два электрода попеременно создают две пульсирующие дуги. Контроль мощности обеих дуг позволяет выполнять сварку на высоком токе без образования глубокой выемки в сварочной ванне. Металл электродной проволоки подается в жидкую ванну с торцевой стороны горелки. В результате нагрева при прохождении постоянного тока обеспечивается высокая скорость наплавки. Две дуги (рис. 2), созданные двумя отдельными электродами и соединенные вместе, образуют одну большую дугу.

Разработанный способ предполагает подачу импульсного тока к двум электродам от двух сварочных источников питания. При этом каждый из импульсных токов может регулироваться отдельно. Более того, путем синхронизации контроля импульсов обоих электродов и синхронизации способа управления током и поперечными перемещениями электродов этот способ в зависимости от положения сварки отличается рядом особенностей.



Рис. 3. Контроль импульсного тока для сварки в горизонтальном положении



Положение горелки	Левая стенка разделки	Поперечные перемещения	Правая стенка разделки
Левый ток / правый ток	I_p / I_b	I_m / I_m	I_b / I_p

Рис. 4. Контроль импульсного тока для сварки в вертикальном положении (I_p — пиковый; I_b — базовый ток; I_m — ток для перемещения электродов)

Сварочный ток	300...600 А	Образец SQV-2A
Напряжение на дуге	9...12 В	
Скорость перемещения электродов	10...16 см/мин	
Скорость наплавки	17...23 г/мин	
		Образец SM490
Сварочный ток	300...600 А	
Напряжение на дуге	10...11 В	
Скорость перемещения электродов	6 см/мин	
Скорость наплавки	18...27 г/мин	Образец SM490

Рис. 5. Макрошлиф и режим сварки для соединения, выполненного в узкий зазор: а — горизонтальное положение на пластине из низколегированной стали; б — вертикальное положение на пластине из углеродистой стали

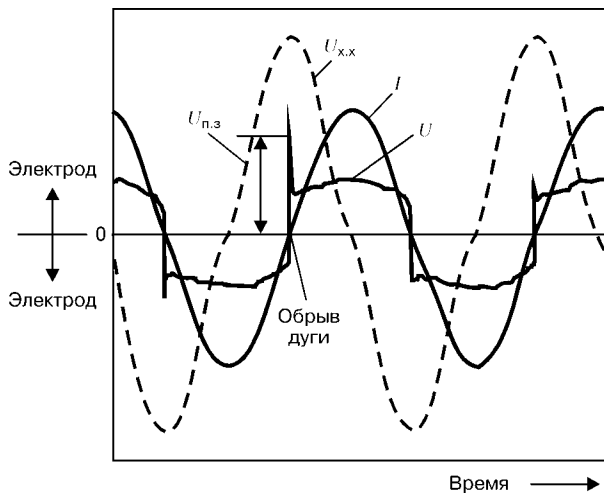


Рис. 6. Характеристика дуги переменного тока ($U_{п.з}$ — напряжение повторного зажигания)

При сварке в горизонтальном положении два электрода располагают перпендикулярно направлению сварки. При этом значения тока верхнего и нижнего электродов устанавливают отдельно. Попеременная подача соответствующего импульсного тока к каждому электроду обеспечивает получение хорошей формы валика с меньшим количеством подрезов и наплывов даже при высокой скорости наплавки (рис. 3).

При сварке в вертикальном положении два электрода также располагают перпендикулярно направлению сварки. При этом импульсный ток подают к обоим электродам попеременно. Стабильное проплавление можно достичь при поперечных колебаниях электродов в разделке и подведении пикового тока к стенке разделки во время остановок. Контроль погонной энергии можно осуществлять путем применения более низкого импульсного тока во время поперечных колебаний (рис. 4).

Примеры применения сварки в узкий зазор (разделку) в горизонтальном и вертикальном положениях приведены на рис. 5. Для испытаний использована листовая низколегированная и углеродистая стали и длинные электроды прямоугольного сечения.

Сварку выполняли без поперечных колебаний электродов (угол скоса кромки 2° , радиус при вершине разделки 6 мм, глубина разделки 150 мм). Длинные вольфрамовые электроды прямоугольного сечения вводили в разделку, а на наконечник сопла горелки надевали защитный сапожок для того, чтобы закрыть поверхность разделки и соответствующим образом удерживать защитный газ. В процессе сварки в горизонтальном положении необходимо избегать провисания сварочной ванны под действием силы дуги и образования подреза в верхней части разделки при поддержании постоянного уровня проплавления в верхней и нижней стенках разделки.

С этой целью сварку выполняли с подведением различных сварочных токов к верхнему и нижнему электродам. Сварочный ток на верхнем электроде составлял 250, на нижнем — 350 А (всего 600 А) при скорости сварки 10 см/мин. Сварку выполняли в следующем режиме: один слой за один

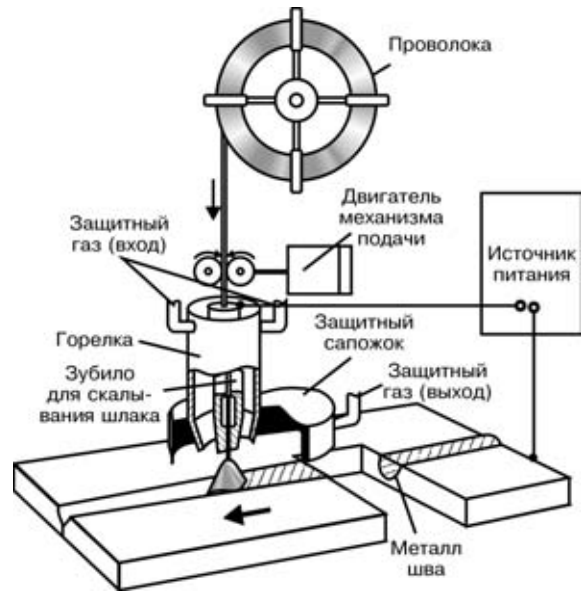


Рис. 7. Схема устройства для сварки МАГ на высоком переменном токе

проход, а последующие слои — за 69 проходов. После каждого прохода получали валик хорошей формы без провисания сварочной ванны. Кроме того, судя по макрошлифу (рис. 5, а), удалось достичь стабильного проплавления.

Сварку в вертикальном положении выполняли с использованием той же V-образной разделки с криволинейным скосом двух кромок за 36 проходов при сварочном токе 300 А на каждом электроде (всего 600 А) при скорости сварки 6 см/мин и скорости наплавки 27 г/мин. Сварку выполняли в следующем режиме — один слой за один проход без поперечных колебаний электродов. При сварке в узкую разделку также подтвердилось, что с каждым проходом можно достичь стабильного проплавления стенки разделки, как видно на макрошлифе, приведенном на рис. 5, б.

Сварка МАГ на высоком переменном токе. Изменения сварочного тока, напряжения на дуге и напряжения холостого хода сварочного источника питания приведены на рис. 6. При дуговой сварке на переменном токе, когда полярность тока изменяется, происходит обрыв дуги. Для поддержания стабильности дуги переменного тока необходимо обеспечить повторное зажигание дуги во время изменения полярности тока. Для этого используют сварочный источник питания с напряжением холостого хода более высоким, чем напряжение повторного зажигания. Сварочный источник питания с высоким напряжением холостого хода обеспечивает получение легкого возбуждения дуги. Для использования обычного источника питания на переменном токе разработана проволока с металлическим сердечником, которая содержит некоторое количество флюса и снижает напряжение повторного зажигания. Эта проволока имеет большой диаметр, как и проволока, используемая для дуговой сварки под флюсом. Устройство для сварки МАГ на переменном токе приведено на рис. 7. Для случая, когда в качестве защитного газа используется смесь $Ag + 10\% CO_2$, а дей-

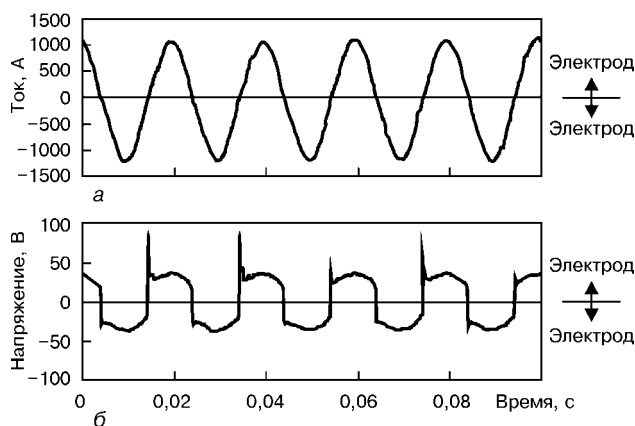


Рис. 8. Изменение тока (а) и напряжения (б) в процессе сварки МАГ на переменном токе с использованием проволоки с металлическим сердечником (защитный газ Ar + 10 % CO₂, сварочный ток 800 А)

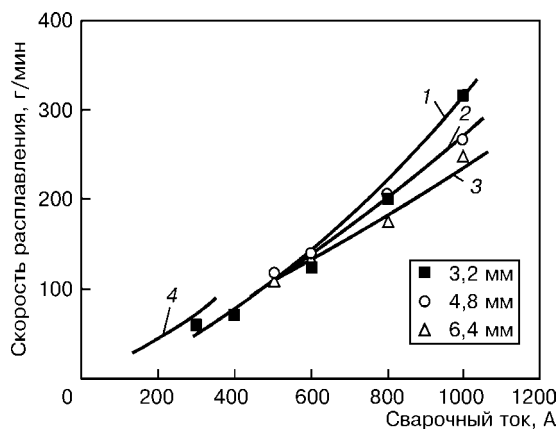


Рис. 9. Зависимость скорости расплавления от сварочного тока при сварке МАГ на переменном токе (1–3) и обычной сварки МАГ (4) с диаметром проволоки 1,2 мм (защитный газ Ar + 10 % CO₂, напряжение 30 В, длина вылета электрода 80 мм)

твительное значение сварочного тока составляет 800 А, результаты измерения тока и напряжения в процессе сварки показаны на рис. 8. Среднее напряжение зажигания составляет 65 В, при этом оно ниже, чем напряжение холостого хода сварочного источника питания. В этих условиях происходит повторное зажигание дуги, а дуга переменного тока горит стабильно. Отношение между сварочным током и скоростью наплавки при сварке

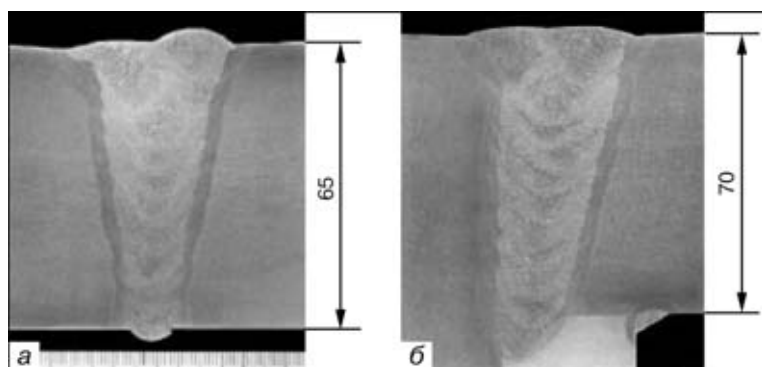


Рис. 10. Макрошлифы стыкового (а) и углового (б) сварочного соединения из низколегированной стали: а – $I_{св} = 700... 900$ А; $U_d = 23... 29$ В; $v_{св} = 25... 35$ см/мин; $q = 23... 63$ кДж/см; количество проходов – 10; б – $I_{св} = 900... 1050$; $U_d = 25... 31$ В; $v_{св} = 22... 35$ см/мм; $q = 34... 89$ кДж/см; количество проходов – 11

МАГ на переменном токе показано на рис. 9. Поскольку используется проволока диаметром более 3,2 мм, сварку МАГ на переменном токе можно выполнять на высоком токе в диапазоне 400... 1000 А с получением скорости наплавки почти в 3 раза выше (200... 300 г/мин) по сравнению с обычной сваркой МАГ.

Для испытаний сварки стыковых и угловых соединений (рис. 10) использовали листовую низколегированную сталь, проволоку диаметром 4,8 мм, смесь Ar + 10 % CO₂ и горелку с плоским наконечником.

Одностороннюю сварку толстых плит выполняли в V-образную разделку (угол скоса 20°, зазор между свариваемыми кромками 8 мм, глубина разделки 65 мм). Сварку с проплавлением выполняли с использованием плоской горелки, которую вводили в разделку. Сварку плиты толщиной 65 мм выполняли за 10 проходов. При этом один слой выполнялся за один проход, кроме последнего слоя.

Выполнена также сварка углового соединения со скосом одной кромки (угол скоса 15°, зазор между свариваемыми кромками 10 мм, глубина разделки 70 мм). При выполнении прохода при заварке корня шва получено достаточное проплавление до металла подкладки. Сварку плиты толщиной 70 мм выполняли за 11 проходов. Угловое соединение можно также выполнять каждого слоя за один проход, кроме последнего.

Сварка по способу А-ТИГ (применение). Для сварки А-ТИГ можно использовать разделку с большой поверхностью притупления кромки, поскольку удается достичь глубокого проплавления. Изучены пределы отсутствия соосности и ширины зазора между свариваемыми кромками для большой поверхности притупления кромки. Для испытаний использованы активирующий флюс FASTIG™ SS-7 и нержавеющая листовая сталь толщиной 6 мм. Результаты испытаний приведены в таблице. Для стыковой сварки нержавеющей листовой стали толщиной 6 мм без проплавления насквозь допускаются отсутствие соосности до 2,5 мм и ширина зазора между свариваемыми кромками до 2,0 мм. По сравнению с обычной сваркой ТИГ с V-образной разделкой и тонкой поверхностью притупления кромки при сварке А-ТИГ легко соблюсти необходимый допуск на совмещение кромок.

Для стыковой сварки толстолистовой нержавеющей стали толщиной 28 мм использовали способы А-ТИГ и МАГ. Форма разделки кромок и поперечные сечения наплавленных валиков показаны на рис. 11. Толщина поверхности притупления кромки составляла 5 мм, угол скоса 20°, глубина разделки 19 мм, радиус при вершине разделки 4 мм. Вначале выполняли сварку А-ТИГ с проплавлением, затем обычную сварку МАГ. По сравнению с традиционной технологией (сварка ТИГ + дуговая сварка под флюсом) экономия затрат, связанных со сваркой по первому варианту, составила 25 %.



Характерные профили сварных соединений на пластине из нержавеющей стали толщиной 6 мм, выполненных сваркой А-ТИГ

Параметры соединений	0,5 мм	1,0 мм	1,5 мм	2,0 мм	2,5 мм
Отклонение от равно-толщинности					
Зазор в корне шва					Проплавление насквозь

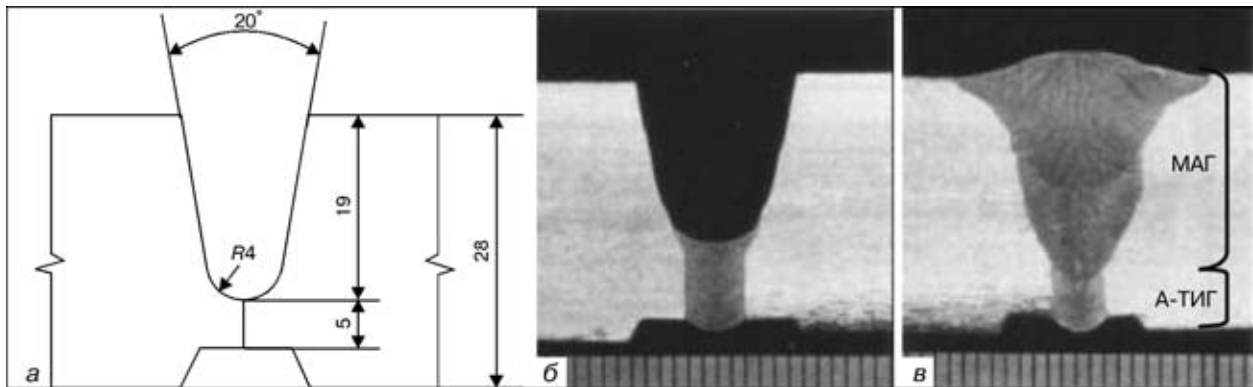


Рис. 11. Поперечные сечения (а) толстолистовой нержавеющей стали толщиной 28 мм с притуплением кромки (5 мм), выполненным сваркой А-ТИГ с заваркой корня (б) и обычной сваркой МАГ (два прохода) (в)

Таким образом, разработаны высокоэффективные способы двухдуговой сварки ТИГ и сварки МАГ на высоком переменном токе. Проведены основные исследования качества сварных швов. Благодаря использованию этих способов сварки достигнута высокая производительность в различных областях промышленности. Высокоэффективный способ двухдуговой сварки ТИГ реализован при

строительстве резервуара для хранения сжиженного природного газа, а способ сварки МАГ на высоком переменном токе — при строительстве мостов и судов. Процесс А-ТИГ испытан при сварке нержавеющей сталей. Он в комбинации с другими способами сварки, в частности со сваркой МАГ, позволяет выполнять сварку толстых плит с высокой производительностью.

Highly-efficient methods of twin-arc TIG and MIG welding at high-ampere alternating current, developed and found application in the manufacture of different structures, are described. These methods can perform welding using high currents and reach high rates of deposition as compared with conventional methods of welding. Effective technology of welding thick-sheet metal has been developed for A-TIG method.

Поступила в редакцию 19.05.2003



НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Чл.-кор. РАН **Н. П. АЛЕШИН** (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ)

Описаны новые приборы, обеспечивающие получение информации о внутренней структуре изделия и его дефектах. Акустоэмиссионные системы позволяют идентифицировать такие опасные источники, как потеря пластической деформации, зарождение и развитие трещин, коррозионные повреждения. Ультразвуковой томограф регистрирует информацию о конфигурации, размерах, ориентации дефектов. Для измерения объемных двухосных напряжений предлагается использовать спектрально-акустические системы контроля. Описано новое решение практической задачи по созданию технологии аппаратуры для неразрушающего контроля аустенитных сварных швов в соединениях толщиной от 5 до 100 мм.

Ключевые слова: сварные конструкции, ресурс конструкций, неразрушающий контроль, диагностика, акустоэмиссионные системы, спектрально-акустические системы, приборы

Диагностика является неотъемлемой частью технологического процесса при производстве материалов и изделий. Наличие высококачественных материалов и технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует их безаварийной эксплуатации.

Значение неразрушающих методов контроля и диагностики сейчас особенно велико, поскольку изношенность парка технологического оборудования в отдельных случаях превышает 65 %. В ближайшее время для предотвращения аварий наиболее опасных эксплуатируемых объектов необходимо создать технологии и оборудование для оценки их остаточного ресурса.

В России получены хорошие результаты при создании высокоинформативного дефектоскопического оборудования и разработке методик расчета остаточного ресурса отдельных объектов. Созданные приборы и инструменты основаны на последних достижениях в области ультразвуковой дефектоскопии, информатики, радиоэлектроники. По своим эксплуатационным характеристикам они не уступают лучшим мировым образцам.

Для оценки остаточного ресурса и эксплуатационной надежности наиболее приемлема модель дефекта в виде эллипсоида с известными полуосями. При этом эллипсоид должен достаточно точно интерполировать реальное нарушение однородности материала объекта. Определение полусей такого эллипсоида по данным ультразвуковой дефектоскопии невозможно без точного решения задачи рассеяния ультразвука на подобных отражателях. В самом общем виде эта задача может быть сформулирована следующим образом. На ограниченной поверхностью S эллипсоид с полуосями a , b и c , механические свойства поверхности которого описываются тензором импедансов Z , падает волна, характеризуемая вектором смещения U_0 . В результате взаимодействия волны с эллипсоидом возникает новое поле, характеризующееся

вектором смещений $U_0 + U$, причем его составляющая U называется рассеянной волной. Требуется построить поле U , которое удовлетворяло бы уравнению установившихся колебаний линейно-упругой среды

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } U - \mu \text{rot rot } U + \rho \omega^2 U = 0,$$

условиям излучения и совместно с полем падающей волны одному из граничных условий

$$D_n[U_0(M) + U(M)] = 0, \quad M \in S, \quad (1)$$

$$U_0(M) + U(M) = 0, \quad M \in S, \quad (2)$$

$$D_n[U_0(M) + U(M)] + Z(M) [U_0(M) + U(M)] = 0, \quad M \in S, \quad (3)$$

где λ , μ — константы Ламе; ρ — плотность материала пространства; M — точка пространства; D_n — дифференциальный оператор вида

$$D_n = (\dots) = 2\mu \text{grad}(\dots) \mathbf{n} + \lambda n \text{div}(\dots) + \mu \mathbf{n} \times \text{rot}(\dots);$$

\mathbf{n} — вектор внешней нормали к поверхности S рассеивающего тела, а граничные условия (1)–(3) соответствуют рассеянию на соответственно акустически мягкой, акустически жесткой и импедансной (включение из другого материала) границах.

Для существенного упрощения вычислений предлагается вынести источники рассеянного поля из области определения краевой задачи. Получающийся таким образом новый метод расчета можно назвать методом вынесения источников. Интенсивность каждого из источников остается конечной, как и количество источников, а поле, создаваемое вдоль рассеивающей поверхности каждым из них, является гладкой функцией.

Расчет методом вынесения источников заключается в следующем. Предполагается, как и при использовании любых численных методов, что получаемое решение точно удовлетворяет поставленным условиям в конечном количестве точек рассеивающей поверхности. При увеличении их количества получаемые приближения сходятся к точному решению. Поскольку оно заранее неизвестно, то в качестве критерия сходимости берут точность удовлетворения данных приближенных условий на

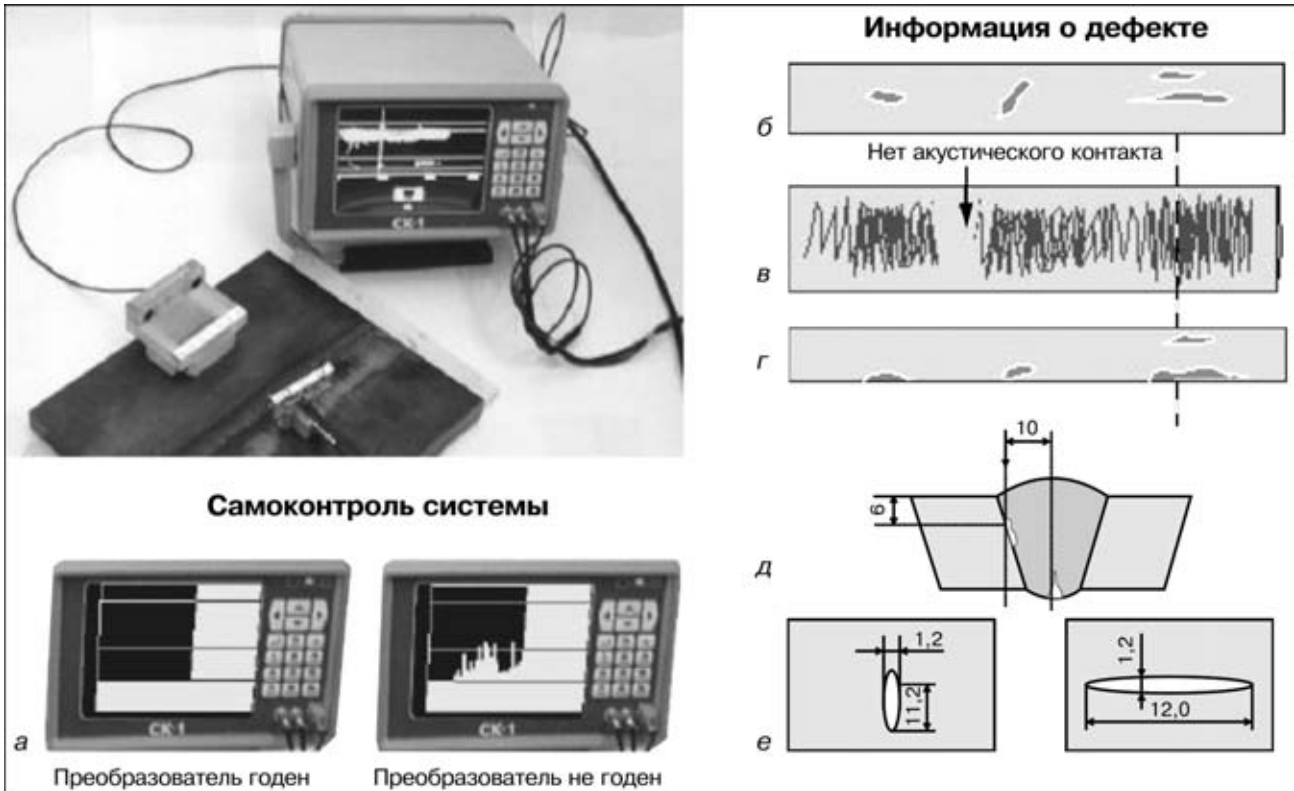


Рис. 1. Мультипрограммный портативный ультразвуковой дефектоскоп-томограф СК-1 (а) и примеры получения информации о дефектах с его помощью: б — вид сверху; в — след сканирования; г, д — соответственно продольное и поперечное сечение шва; е — томографическое изображение дефекта

рассеивающей поверхности, которая является точностью интерполяции на поверхности S решения по его значениям в системе выбранных точек.

Сравнение предлагаемого метода расчета с другими методами и экспериментальными данными позволяет сделать вывод о его эффективности применительно к задачам рассеяния продольных и поперечных волн в упругой среде на различных отражателях.

Решение этой задачи позволило разработать такой алгоритм обработки информации, который восстанавливал бы объемное изображение только при сканировании в одной плоскости. Полученные теоретические результаты реализованы в ультразвуковом дефектоскопе-томографе СК-1 (рис. 1), оригинальная часть которого, кроме алгоритмов обработки получаемой информации, заключается в возможности использования трехмерной системы координат.

С помощью дефектоскопа-томографа получают полную информацию о дефектах. На его экране сварной шов отображается сверху (эквивалентно рентгенограмме, рис. 1, б), сбоку (сечение вдоль шва, рис. 1, в) и с торца (сечение поперек шва, рис. 1, д) с указанием эквивалентных размеров и координат дефектов. Прибор производит также автоматическое измерение полуосей интерполирующего эллипсоида (рис. 1, е). Дополнительно на экране отображается след сканирования (рис. 1, в), свидетельствующий о качестве акустического контакта, траектории и скорости перемещения преобразователя оператором. Кроме того, СК-1 предназначен для выполнения следующих функций:

- автоматической настройки чувствительности;
- измерения параметров и паспортизации преобразователей, применяемых совместно с дефектоскопом;
- накопления и сохранения результатов контроля в процессе его проведения с целью последующего внесения в базу данных или представления в виде документа.

Процедура контроля с помощью СК-1 состоит в перемещении преобразователя по поверхности объекта вдоль шва, с противоположной стороны которого расположены два приемных микрофона, и измерении функции $F(x, t)$ электрического напряжения на выходе преобразователя в каждом положении x из интервала $x_0 \leq x \leq x_1$ и в каждый момент времени t из интервала $t_0 \leq t \leq t_1$, где x_0, x_1 — соответственно начальные и конечные показания датчика положения преобразователя; t_0, t_1 — интервал времени возможного появления эхосигналов в зоне контроля. Полученные результаты обрабатываются по формуле

$$\varphi(x, z) = \int_{x_0}^{x_1} F(x - x'_1) \frac{2}{c} \sqrt{(x - x'_1)^2 + z^2} \times \\ \times d_0 \left(\frac{x - x'_3}{\sqrt{(x - x'_1)^2 + z^2}} \right) dx'_1,$$

где d_0 — согласующий коэффициент пучка.

Затем происходит построение и вывод изображения на экран по алгоритму

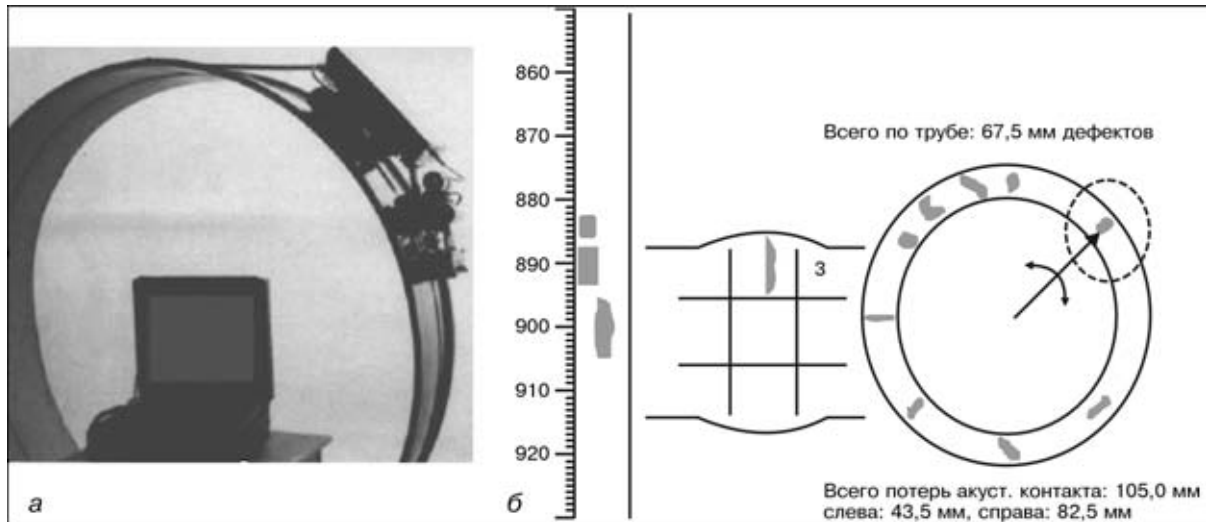


Рис. 2. Общий вид автоматизированной установки ультразвукового контроля «Автокон-МГТУ» (а) и отображение результатов контроля на экране монитора (б)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{засветит точку, если } \frac{|\varphi(x, z)|}{\max|\varphi(x, z)|} \geq \frac{1}{2}; \\ \text{погасит точку, если } \frac{|\varphi(x, z)|}{\max|\varphi(x, z)|} < \frac{1}{2}. \end{array} \right.$$

Прибор работает в диапазоне частот от 1 до 5 МГц. При этом разрешающая способность по изображению составляет примерно (1,0... 1,2)λ.

В энергонезависимой памяти прибора может быть размещено до 180 настроек на контроль различных объектов. Прибор может быть применен для контроля объектов из металлов и пластмасс в широком диапазоне толщин.

Для изделий большой протяженности целесообразно использовать установку автоматизированного ультразвукового контроля «Автокон-МГТУ», производительностью более 1 м/мин (рис. 2, а). Она состоит из трех основных частей: роботизированного сканера на магнитных колесах, электронного блока и соединительного кабеля длиной 20 м. На сканере закреплен акустический блок из восьми пьезопреобразователей, которые обеспечивают прозвучивание сечения шва толщиной от 4 до 20 мм без поперечного сканирования с равномерной чувствительностью (± 2 дБ). Эти же преобразователи используются для слежения за качеством акустического контакта. Благодаря наличию магнитных колес не требуется проведение



Рис. 3. Мультипрограммный восьмиканальный ультразвуковой дефектоскоп СК-2

крайне трудоемкой операции — установки дополнительных гибких направляющих для движения сканера.

Отличительной особенностью установки является наличие датчиков слежения за швом, которые обеспечивают погрешность ± 1 мм от оси шва при смещении кромок и перегибов. На экране электронного блока отображается информация о сварном шве — сверху и поперек (рис. 2, б).

Алгоритм обработки поступающих сигналов с высокой достоверностью позволяет идентифицировать дефекты как плоскостные и объемные. На ультразвукограмме, помимо типа дефекта, указывается также его протяженность и высота. «Автокон-МГТУ» предназначен для контроля труб или емкостей диаметром 500 мм и выше при толщине стенки 4...20 мм. Рабочий температурный интервал составляет -40...+40 °С. Масса сканера 8 кг, а общая масса установки 18 кг.

В настоящее время в МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана новая модификация универсальной установки СК-2 (рис. 3). В отличие от известных многоканальных установок она позволяет производить с высокой степенью точности измерения колебаний амплитуды акустического контакта отдельно по каждому каналу без применения дополнительных акустических преобразователей. Это в значительной мере повышает достоверность автоматизированного контроля, поскольку удается компенсировать потери акустического контакта по каждому каналу отдельно. Установка работает при температуре от -40 до +60 °С. Масса электронного блока составляет 5 кг.

Для оценки уровня работоспособности объекта не всегда достаточно знать форму и размеры имеющихся в нем локальных дефектов. Немалое влияние на остаточный ресурс объекта оказывает наличие остаточных напряжений в различных элементах его конструкции. Существует множество приборов для оценки остаточных напряжений, основанных на измерении различных характеристик магнитных, электромагнитных или ультразвуковых полей. Их общим недостатком являются низ-

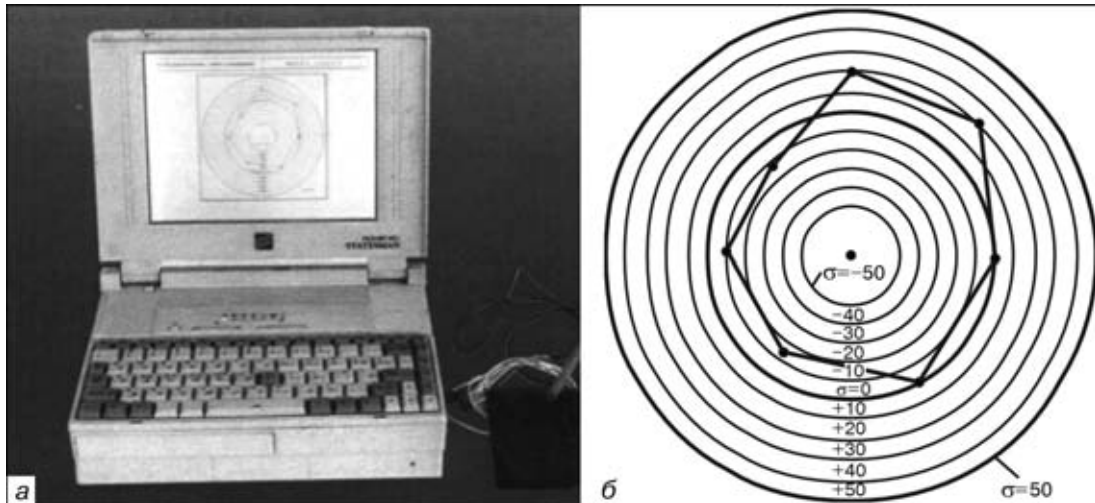


Рис. 4. Спектрально-акустическая система контроля механических напряжений «Астрон»: а — общий вид системы; б — определение напряжений по диаметру трубы

кая точность измерения (20...25 %). В центре «Сварка и контроль» МГТУ им. Н. Э. Баумана разработан образец автоматизированной акустической системы, предназначенной для оценки структурных и прочностных характеристик материалов (рис. 4). Работа системы основана на анализе связи между параметрами спектров импульсов упругих волн, распространяющихся в исследуемом материале, и его физико-механическими и структурными характеристиками.

В материал исследуемой детали или элемента конструкции излучаются упругие широкополосные акустические импульсы. Центральная частота спектра выбирается в диапазоне 1...15 МГц в зависимости от типа материала. В соответствии с толщиной исследуемого материала для анализа используют либо объемные, либо поверхностные волны.

Акустический импульс при распространении взаимодействует с основными компонентами структуры материала — зернами, микротрещинами, микropорами, внутренними напряжениями, влияющими на спектр сигнала. В процессе проведения комплекса обучающих экспериментов устанавливаются корреляционные или функциональные связи между спектрально-акустическими параметрами и структурно-механическими характеристиками материала предполагаемого объекта обследования. В основу измерительного алгоритма положен способ определения временных задержек, фигурирующих в уравнениях, связывающих скорости распространения упругих волн с действующими упругими напряжениями. Выбираются два импульса, прошедшие различные акустические пути. Задержка, используемая в алгоритме акустоупругости, рассчитывается по формуле

$$\tau = \tau_0 - \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} \{ \arctg[B_2(f_i)/A_2(f_i)] - \arctg[B_1(f_i)/A_1(f_i)] \},$$

где τ_0 — задержка переднего фронта второго анализируемого импульса; A , B — соответственно синусный и косинусный члены Фурье-преобразования;

f_i — i -я спектральная частота из выбранного информативного частотного диапазона; K — общее количество спектральных частот.

Для определения напряжения в исследуемом объекте измеряют необходимые задержки, извлекают из базы данных напряжения в соответствии с установленными ранее акустоупругими зависимостями. Погрешность определения изменения напряжений составляет 5...10 МПа. Разработанная система выполняет следующие функции:

- измерение напряжений, возникающих при монтаже или сборке плоских элементов конструкций способом клепки, сварки, склейки и т. д.;

- измерение перераспределения напряжений в элементах сложных статически неопределимых систем, при их ремонте, например, путем замены элементов;

- мониторинг напряженного состояния ответственных силовых элементов машин и конструкций в процессе их испытаний или эксплуатации;

- оценку пространственной неоднородности напряжений в материале плоских элементов конструкций путем сканирования поверхности;

- контроль и регистрацию на внешних носителях временных диаграмм динамических напряжений, возникающих в ответственных элементах конструкций под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Из известных в мировой практике методов диагностики сварных соединений доминирующее положение занимает метод акустической эмиссии (АЭ). Методология АЭ диагностики, разработанная в МГТУ им. Н. Э. Баумана, базируется на применении новых комплексных энергетических параметров АЭ, спектрального и регрессивного анализов, а также использовании отдельных волновых компонент для идентификации типа дефекта, оценки степени его развития и стадии предразрушения конструкции от развивающейся трещины. Возможна АЭ диагностика механизма пластической деформации, микро- и макротрещинообразования, различных видов коррозии и коррозионного растрескивания.

Векторно-энергетический анализ и экспериментальные исследования распределения плотности



потока энергии, мощности сигналов АЭ и их энергетических спектров для продольной и поперечной волн, а также суммарного поля вокруг трещины показали перспективность АЭ дефектоскопии, основанной на регистрации отдельных волновых компонент. Для исследованных объектов установлена идентичность энергетического спектра продольной и поперечной волн, а также суммарного поля АЭ от единого источника возмущения (деформирования путем скольжения, развития трещин). Выявлена линейная зависимость между механической энергией деформирования и акустической энергией суммарного поля, а также продольной и поперечной волн. Показано, что распределение энергии суммарного поля АЭ и его отдельных компонент вокруг вершины трещины подобно конфигурации зоны пластической деформации. Оказалось эффективным использование для идентификации источников АЭ вероятностных областей признаков диагностируемых процессов (источников АЭ), построенных путем статистической обработки параметров потока сигналов АЭ.

Так, например, при использовании эллипсов рассеяния (средняя энергия сигналов B и медианная частота) как информативных признаков идентификация пластической деформации и развивающейся микротрещины по этой методике осуществляется с высокой достоверностью. Погрешность

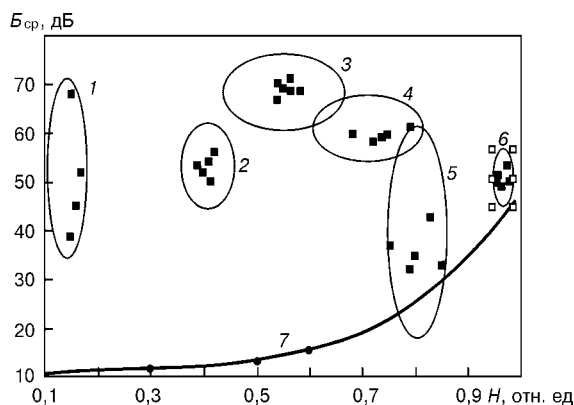


Рис. 5. Результаты АЭ испытаний крупногабаритных образцов на диагностической диаграмме: 1 — нестабильная трещина, несправ; 2 — подрастающая трещина; 3 — развивающееся расщепление; 4 — множественные объемные дефекты; 5 — пластическая деформация, стабильная трещина; 6 — коррозионное растрескивание; 7 — уровень бездефектности

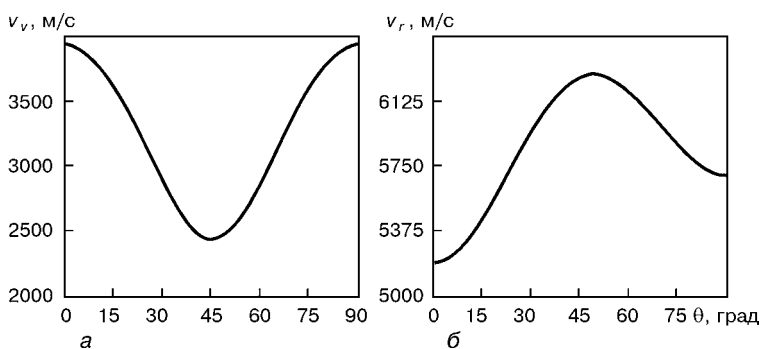


Рис. 6. Зависимости скорости вертикально поляризованной поперечной (а) и продольной (б) волны в трансверсально-изотропной среде от угла падения θ на кристаллиты

классификации микротрещины на фоне пластической деформации составила 3 % (рис. 5).

Созданы высокочувствительные полосовые и широкополосные преобразователи АЭ в диапазоне частот 20...5000 кГц чувствительностью $2 \cdot 10^8$ В/м.

Научные и методические разработки были положены в основу создания 16-канальной АЭ измерительной системы, обеспечивающей в реальном масштабе времени локализацию, идентификацию и диагностику степени опасности развивающегося дефекта.

Достаточно актуальной проблемой является создание надежных средств неразрушающего контроля сварных соединений нержавеющей аустенитных сталей. В МГТУ им. Н. Э. Баумана проведены работы, позволяющие представить новый подход к технологии ультразвукового контроля крупнозернистых материалов. На основе анализа процесса кристаллизации металла рассчитывают макроструктуру сварного шва или отливки и строят модель кристаллизации. Затем изучают прохождение ультразвуковых волн через неоднородную анизотропную поликристаллическую среду и строят акустическую модель, позволяющую учесть основные факторы ослабления: затухание; преломление на границе сплавления и прозрачность границы сплавления; отклонение распространения луча от волновой нормали и деформацию звукового пучка.

Расчет рассеянных полей V_j^s в крупнозернистых средах, смоделированных как совокупность разориентированных между собой зерен, выполнен при использовании объемного интегрального уравнения типа Липпмана-Швингера (его борновского приближения) с помощью функции Грина $G_{ij}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'')$:

$$V_j^s(\mathbf{r}'', V_i^0) = \int_v G_{ij}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}'') f_i(\mathbf{r}', V_i^0) d\mathbf{r}'$$

где $f_i(\mathbf{r}', V_i^0)$ — функция, зависящая от амплитуды падающей волны и описывающая влияние неоднородностей; \mathbf{r}' — радиус-вектор точки наблюдения; \mathbf{r}'' — радиус-вектор источника; V — объем рассеивателя (индекс s обозначает рассеянное поле). В результате решения получены аналитические выражения и рассчитаны коэффициенты рассеяния для крупнокристаллитной структуры, являющейся при используемых в ультразвуковой дефектоскопии частотах трансверсально-изотропной средой, а для крупнозернистой структуры — изотропной средой.

Существенное значение при ультразвуковом контроле аустенитных сварных соединений имеет задача о прохождении границы сплавления, поскольку установление направлений и определение интенсивностей трансформированных на границе волн необходимо для правильной интерпретации результатов контроля. Для упрощения вычислений предложено использовать координатную систему, привязанную к волновому вектору. Это позволило получить достаточно простые выражения для определения

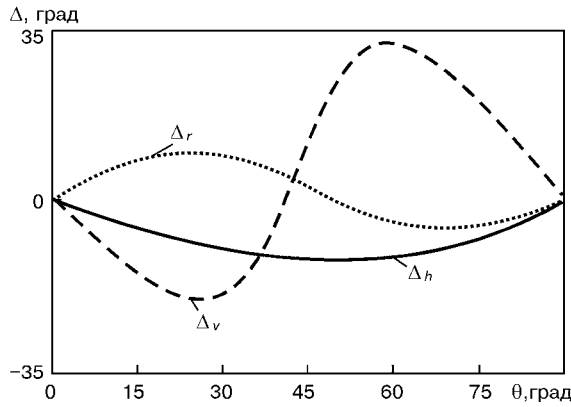


Рис. 7. Отклонение акустической оси от волновой нормали в металле аустенитного сварного шва в зависимости от направления падения на кристаллит

скоростей продольной $v_r(\theta)$ и вертикально поляризованной поперечной $v_v(\theta)$ волн в трансверсально-изотропной среде (рис. 6)

$$v_r(\theta) = \sqrt{C_{11} - 0,25A[\sin^4\theta + 2\sin^2(2\theta)]} \frac{1}{\sqrt{\rho}};$$

$$v_v(\theta) = \sqrt{C_{44} - 0,44A\sin^2(2\theta)} \frac{1}{\sqrt{\rho}};$$

где θ — угол падения на кристаллиты; $A = C_{11} + C_{12} - 2C_{44}$; C_{11} , C_{12} и C_{44} — упругие постоянные кристалла кубической системы, а также рассчитать коэффициенты прохождения волнами различных поляризаций границы изотропной (зона термического влияния) и трансверсально-изотропной (металл шва) сред.

В анизотропных материалах направление распространения энергии не совпадает с направлением ультразвуковой волны. Это приводит к отклонению ультразвукового луча от волновой нормали. В направлении вектора Умова обнаружены максимальные амплитуды смещений частиц в волне, которые

регистрируются преобразователями. На основе анализа направлений переноса энергии волн нами получены соотношения, устанавливающие зависимость отклонения лучей Δ от направления волнового вектора и упругих постоянных монокристалла (рис. 7):

$$\Delta_r(\theta) = \arctg\left\{\frac{A\sin 2\theta(\cos^2\theta - 0,75\sin^2\theta)}{2C_{11} - A(\cos^4\theta + 2\sin^2\theta)/2}\right\},$$

$$\Delta_v(\theta) = \arctg\left\{\frac{A\sin 2\theta(\sin^2\theta - 0,75\cos^2\theta)}{2C_{44} + 7A\sin^2 2\theta/8}\right\},$$

$$\Delta_h(\theta) = \arctg\left\{\frac{A\sin 2\theta}{8C_{44} + 2A\sin^2\theta}\right\},$$

где θ — угол между волновым вектором и осью кристаллита; индексы r , v и h относятся к соответственно продольной, вертикально поляризованной и горизонтально поляризованной поперечным волнам.

Анализ изменения скорости ультразвуковых волн и отклонения акустического луча от волновой нормали показал, что в кристаллитной структуре зафиксирована рефракция ультразвука, что приводит к деформации звукового пучка и искажению волновых фронтов.

Разработанная акустикристаллизационная модель реализована в виде пакета прикладных программ на ПЭВМ, предназначенного для определения оптимальных параметров и интерпретации результатов контроля крупнозернистых материалов с различной кристаллитной структурой. Общность и точность созданной модели допускает ее включение в состав современных ультразвуковых дефектоскопов.

New devices providing information on internal structure of a part and its defects are described. Acoustic-emission systems allow identification of such dangerous sources as plastic deformation, initiation and propagation of cracks and corrosion damages. Ultrasonic tomograph registers information on configuration, size and orientation of defects. Spectral-acoustic monitoring systems are suggested for measuring volumetric two-axial stresses. New solution to a practical problem of development of technology and equipment for non-destructive testing of austenitic welds in joints from 5 to 100 mm thick is described.

Поступила в редакцию 31.01.2003



ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО И ЛАЗЕРНОГО ПУЧКОВ

Я. ПИЛЯРЧИК, М. БАНАСИК (Ин-т сварки в Гливице, Польша)

Описаны результаты научно-исследовательской и технологической работы в области электронно-лучевой сварки и лазерных технологий резки и сварки, проводимых в Институте сварки в Гливице. Приведены характеристики разработанного оборудования и примеры использования технологий в машиностроительной и автомобильной отраслях. Рассмотрен опыт сотрудничества института с научными центрами и промышленными компаниями в области отмеченных технологий.

Ключевые слова: профессиональный центр, исследования, электронно-лучевые технологии, лазерные технологии, разработка оборудования, применение технологий

Разработка технологий электронно-лучевой сварки, а также лазерной резки и сварки является одним из основных направлений деятельности Института сварки и включает следующие этапы:

- проведение собственно НИР и ОКР;
- обучение и подготовку кадров;
- оказание поддержки промышленным компаниям во внедрении разработанных технологий.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки прежде всего направлены на быструю передачу электронно-лучевых и лазерных технологий промышленным компаниям для их

практического использования. Этой цели служат также оценка свариваемости современных конструкционных материалов электронно-лучевой и лазерной сваркой, изучение возможностей последней.

Для удовлетворения потребностей промышленности в подготовке специалистов институт организует научные и практические семинары, курсы усовершенствования (например, курсы по программе «европейский инженер-сварщик») для инженеров-сварщиков или специалистов в области родственных технологий. Программа включает также лекции по электронно-лучевым и лазерным технологиям. Институт играет роль профессионального центра в плане внедрения новых технологий в промышленность. Он разрабатывает технологии



Рис. 1. Установки для электронно-лучевой сварки: *а* — EB Welder SE60/10 (внутренние размеры камеры 1500×1000×1000 мм; рабочее перемещение вдоль осей *x*, *y* соответственно 650 и 500 мм; поворотный вращатель с кулачковым патроном; вакуум $2 \cdot 10^{-3}$ гПа в камере; $2 \cdot 10^{-3}$ гПа в пушке; система откачки: механический насос + насос Рутса + диффузионный насос, автоматическое управление; откачка за 10 мин до $5 \cdot 10^{-3}$ гПа); *б* — EB Welder SE60/15 (такт-машина) (трехпозиционный поворотный стол; программирование параметров сварки; пушка триодного типа; прямоканальный катод 10 кВт/60 кВ; встроенная система оптического наблюдения; генератор колебаний пучка; вакуум $2 \cdot 10^{-3}$ гПа в камере, $2 \cdot 10^{-3}$ гПа в пушке; система откачки: механический насос + насос Рутса + диффузионный насос; откачка за 15 с до $2 \cdot 10^{-3}$ гПа)

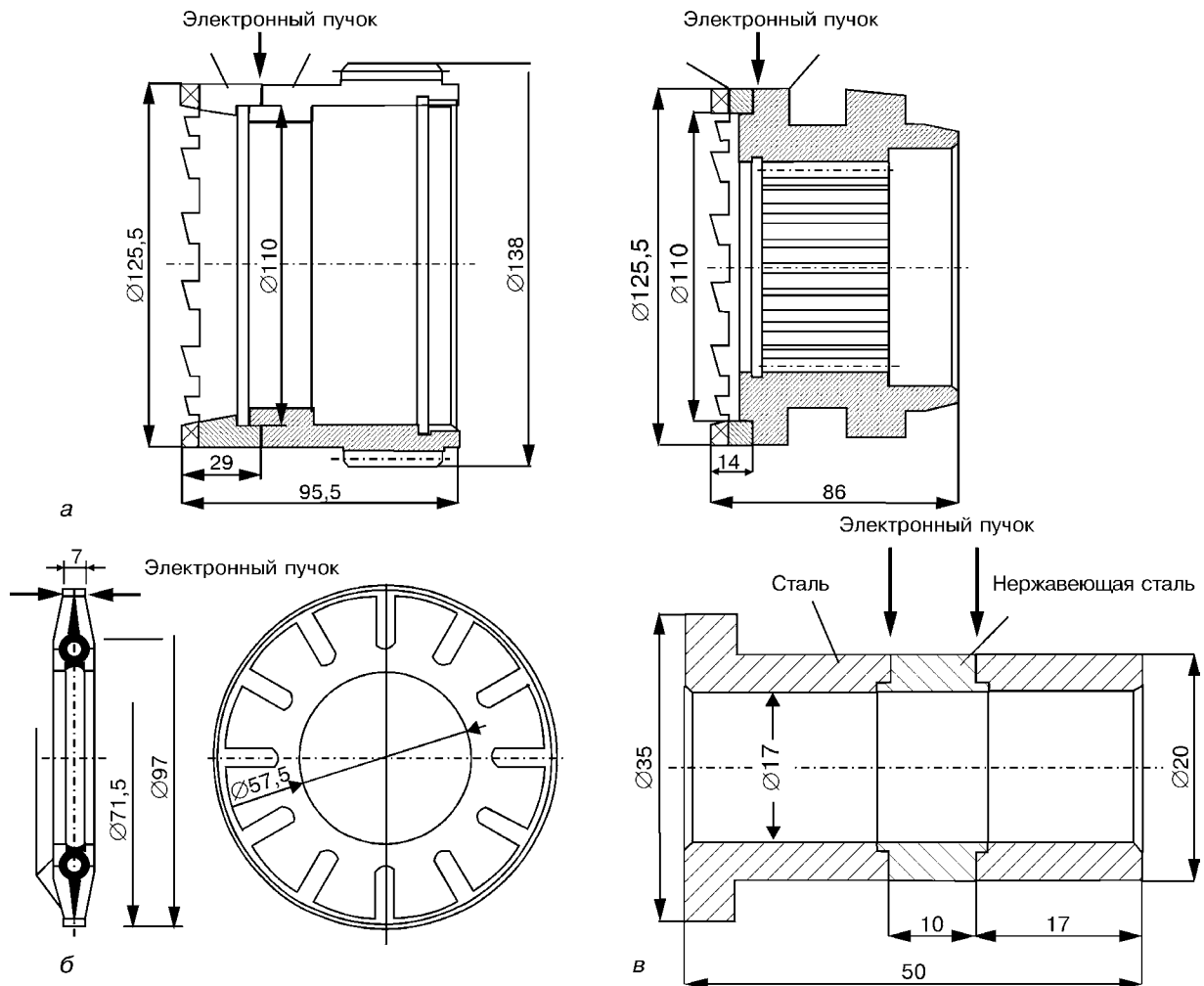


Рис. 2. Примеры применения электронно-лучевой сварки для восстановления различных деталей: *а* – рукава кулачковой муфты для полуавтоматических токарных станков Amtec-657 (материал – цементируемая сталь толщиной 5 мм 15HN(PN) + 12NC15 (AFNOR); установка: EB Welder SE60/15 ($U = 50$ кВ, $I = 50$ мА, $v_{св} = 2,7$ м/мин); *б* – контактные круги к шлифовальным станкам для зубчатой передачи (материал – цементируемая сталь 15HNA(PN) толщиной 2 мм; установка EB Welder SE60/15 ($U = 60$ кВ, $I = 30$ мА, $v_{св} = 3$ м/мин); *в* – муфты электромагнитов для гидравлических клапанов (материал – 04J(PN) + 1H18N9T (PN) толщиной 1,5 мм; установка EB Welder SE60/10-L) ($U = 60$ кВ, $I = 10$ мА, $v_{св} = 0,9$ м/мин)

процессов, производит экспериментальную продукцию и мелкие серии оборудования, в частности, для малых и средних предприятий; проводит технико-экономический анализ производства на

конкретных промышленных предприятиях и ищет возможности замены существующих технологических процессов более высокоэффек-

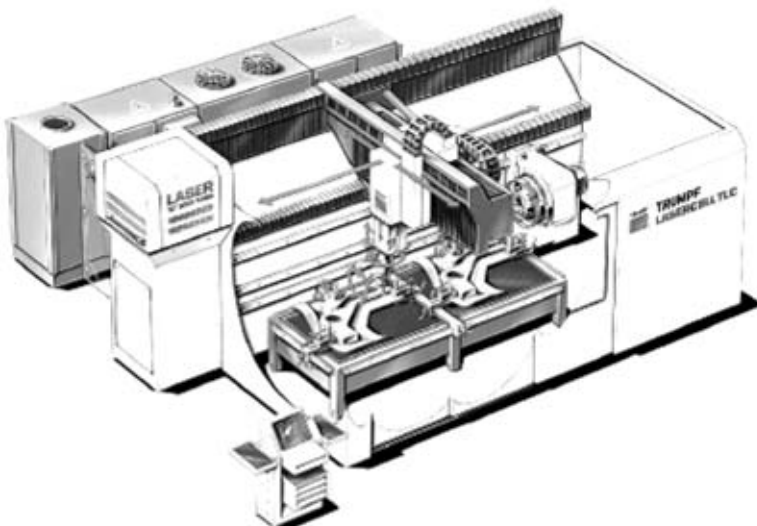


Рис. 3. Лазерный центр TRUMPF LaserCell 1005 для резки, сварки и поверхностной обработки; рабочее перемещение вдоль осей: $x - 3000$; $y - 1500$; $z - 500$ мм; $C - N^{\circ}360^{\circ}$; $B - \pm 120^{\circ}$; скорость перемещения по осям: $x, y - 50$; $z - 30$ м/мин, $C, B - 360$ град/с; точность позиционирования $\pm 0,1$ мм; управление: Sinumerik 840D; лазер – CO₂-лазер с ВЧ-накачкой мощностью 3800 Вт; диапазон изменения мощности – 5...100 %; частотная модуляция – от 10 Гц до 100 кГц

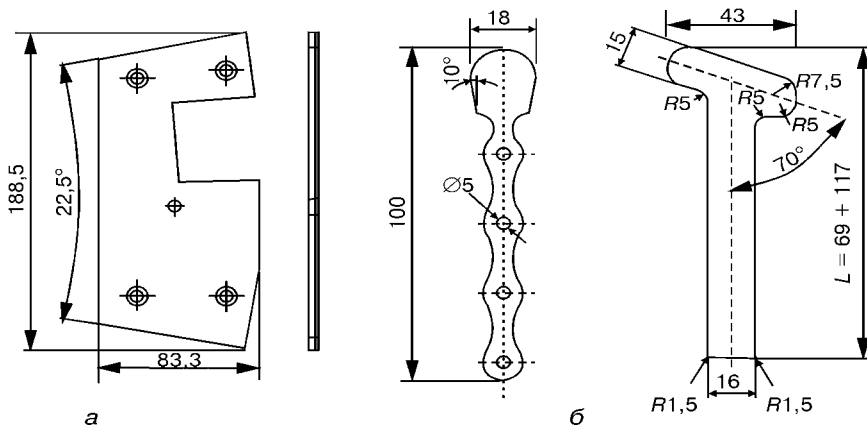


Рис. 4. Лазерная резка плоских изделий: *a* — пластины скользящих направляющих для машин, производящих шины; материал — углеродистая сталь + спеченный материал толщиной 3 мм; скорость резки $v_{св} = 2,7$ м/мин; режущий газ — N_2 4,6; 17 бар; *б* — имплантанты (материал — нержавеющая сталь толщиной 3 мм, титан толщиной 2 мм; скорость резки для нержавеющей стали при мощности 3800 Вт — $v_{св} = 2,7$ м/мин; режущий газ — N_2 5,0; 17 бар; для титана при мощности 2600 Вт — $v_{св} = 5,6$ м/мин; режущий газ — аргон 4,6; 16 бар



Рис. 5. Детали элементов кресел и кузовов легковых автомобилей, изготовленные трехмерной лазерной резкой (материал — сталь для глубокой вытяжки, оцинкованная и углеродистая сталь толщиной 0,8... 3,0 мм)

тивными и экономичными электронно-лучевыми и лазерными технологиями.

Такой вид деятельности имеет особое значение для польской промышленности, поскольку позволяет заключать крупные контракты с заказчиками из Западной Европы, используя отечественные материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия. Используя производственную базу института, отечественные предприятия не закупают оборудование за рубежом для выполнения контрактов, особенно единичных и краткосрочных. Это имеет важное значение, учитывая высокую стоимость самого оборудования, расходы на ввод его в эксплуатацию и подготовку персонала. Особо следует отметить возможность ознакомления представителей отечественной промышленности с возможностями института в области лазерных технологий и проведения предварительных испытаний, позволяющих избежать в дальнейшем ряд серьезных технико-экономических проблем, связанных с внедрением указанных технологий.

Институт сварки имеет две научно-технологические лаборатории — электронно-лучевой сварки и лазерных технологий. Исследовательские

и технологические работы проводятся в обеих лабораториях с использованием исследовательской базы института, которая включает две лаборатории.

Первая лаборатория механических испытаний и металлографии оснащена следующим оборудованием: установкой для испытаний INSTRON 4210/600 кН, устройством для моделирования термических циклов, спектрометром Perkin-Elmer 3300 с управлением на базе компьютера Digital и системой экспресс-анализа изображения Omnimet. Лаборатория проводит комплексные исследования свойств соединений, включая испытание на раскрытие вершины трещины и определение J -интеграла, а также микроструктурных изменений в условиях термических циклов сварки.

Вторая лаборатория неразрушающего контроля оборудована установкой рентгеновского излучения ERESKO 200MF («Seifert & Co.»), гибким эндоскопом SMW 200/12 («Olympus Optical»), магнитным ТК-1280E («Tiede») и ультразвуковым UKS-7D («Krautkramer») дефектоскопами. Лаборатория проводит комплексные исследования и оценку качества соединений.

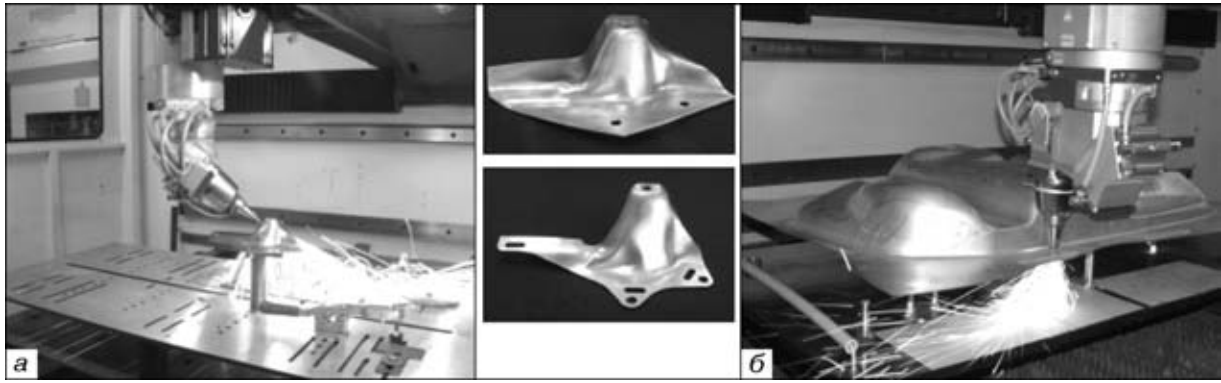


Рис. 6. Трехмерная лазерная резка элементов кресла (а) и бензобака (б) легкового автомобиля (материал — углеродистая сталь для глубокой вытяжки толщиной 3 мм)

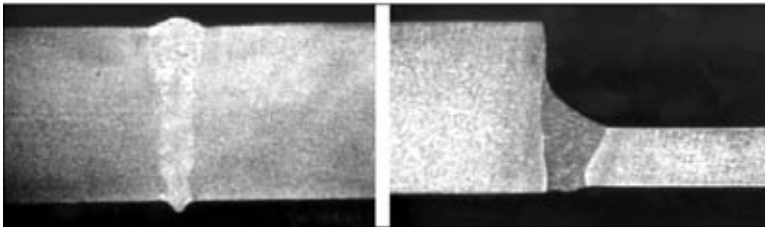
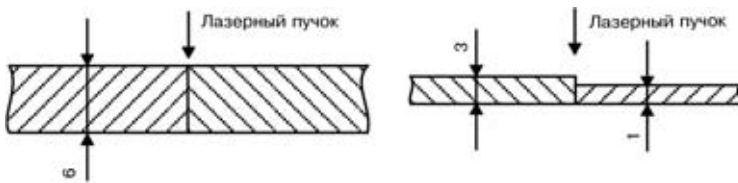


Рис. 7. Макрошлифы сварных соединений, выполненных для оценки свариваемости пластин большого размера из низкоуглеродистой стали

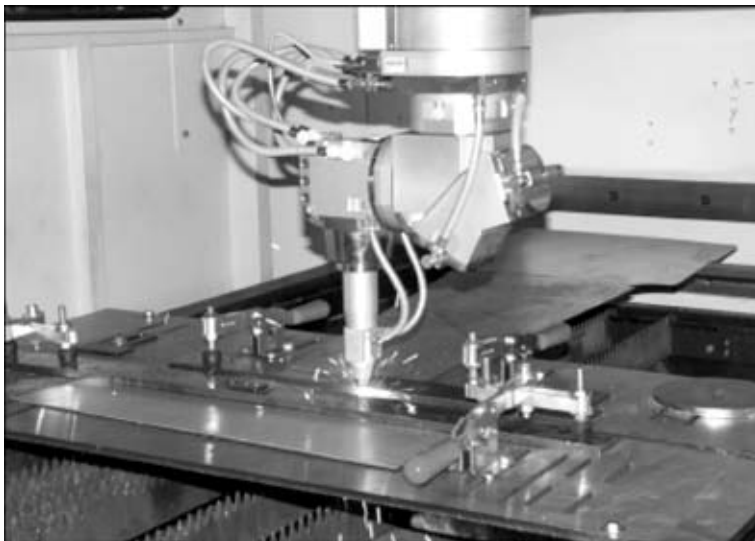


Рис. 8. Процесс сварки заготовок специального раскроя с помощью лазерного центра LaserCell TLC 1005 (зеркало сварочной головки с фокусным расстоянием $f = 270$ мм; используется система поперечных струй; защитный газ — гелий)

Обе лаборатории имеют аккредитацию во многих классификационных обществах.

Разработки в области **технологий электронно-лучевой сварки** ведутся в институте уже более 20 лет. За это время созданы прототипы установок для электронно-лучевой сварки трех видов: универсальная установка для электронно-лучевой сварки (рис. 1, а), специализированные установки с небольшой камерой, оснащенные трехпозиционным

поворотным столом (рис. 1, б) и двадцатипозиционным манипулятором. Первые две установки созданы с использованием деталей, систем и узлов только отечественного производства, тогда как в третьей применены пушка и источник питания компании «Leybold Hereus».

Основные направления работ в институте в области электронно-лучевой сварки включают:

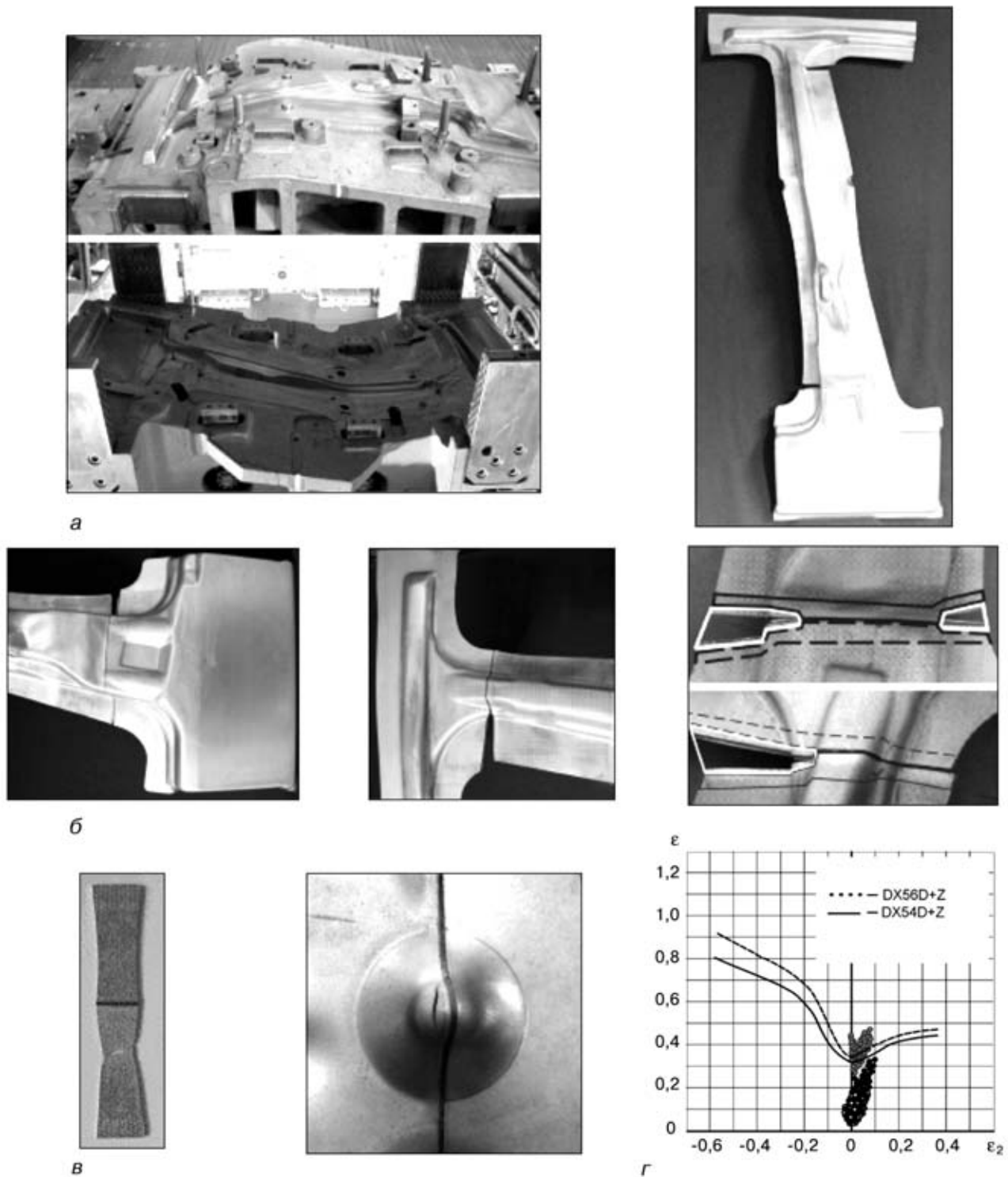


Рис. 9. Лазерная сварка заготовок специального раскроя: *а* — оснастка (нижнее и верхнее приспособление) для штамповки центральных стоек в легковом автомобиле «Audi А3»; *б* — дефекты, возникающие при штамповке; *в* — испытание механических свойств (на растяжение и выдавливание по Эриксену); *г* — распределение локальных напряжений в заготовке, возникших при лазерной сварке штампованных листов кузова автомобиля

оценку свариваемости биметаллических соединений (быстрорежущие стали + углеродистые стали, теплоустойчивые стали + углеродистые стали, спеченные материалы + углеродистые стали);

оценку свариваемости стали с высокой прокаливаемостью;

применение математических методов для прогнозирования твердости сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой;

определение дефектов сварных соединений, полученных электронно-лучевой сваркой, рентгенографическим методом.

В институте разработаны технологические процессы сварки деталей электромагнитных муфт, элементов коробок передач, биметаллических инструментов, отвечающие потребностям промышленности и широко применяемые за рубежом. В последние годы проведены исследования по восста-

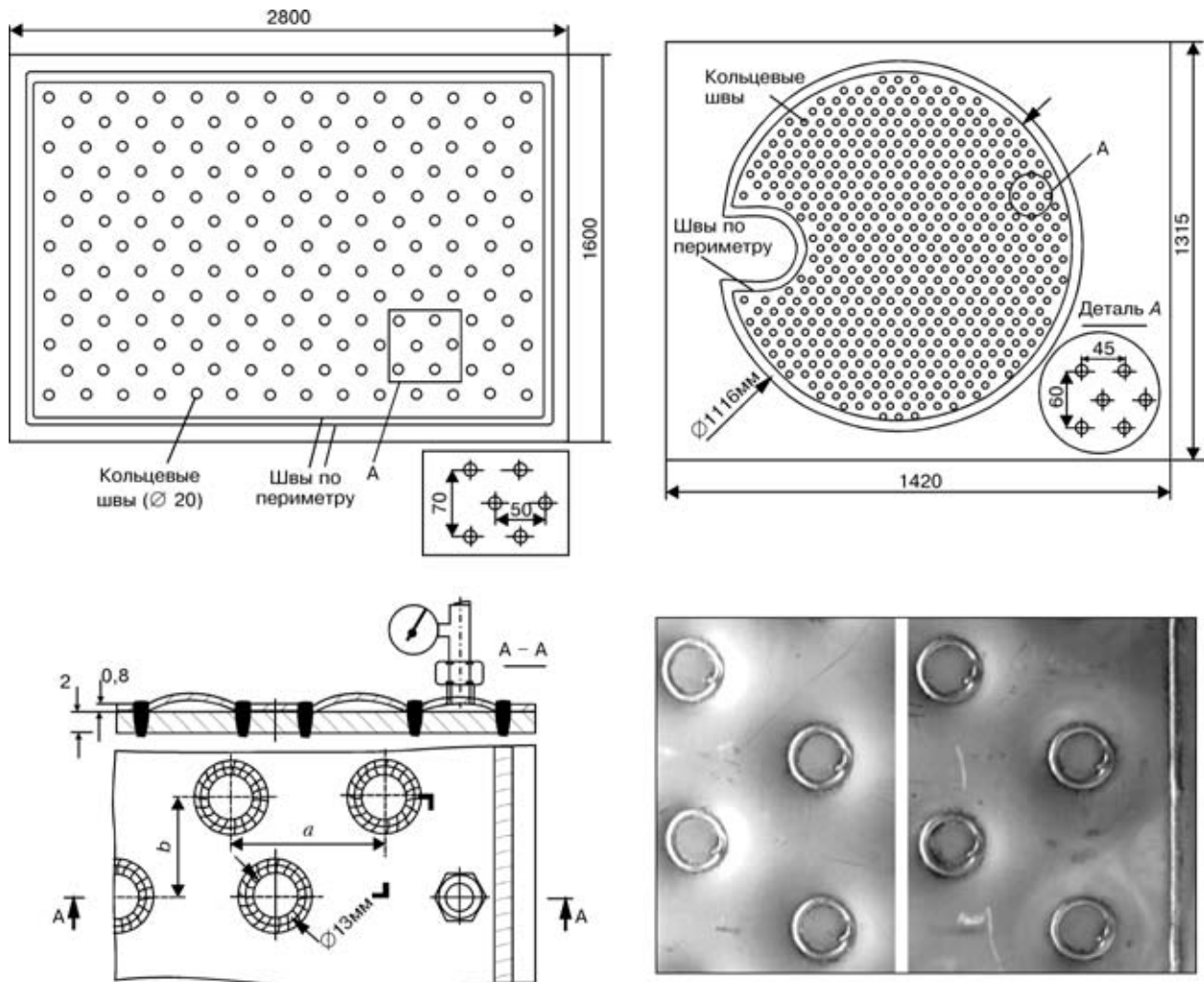


Рис. 10. Лазерная сварка теплообменников для пищевой промышленности (материал — нержавеющая сталь; система Lasercell TLC 1005 ($2D$, $f = 270$ мм); преимущества: воспроизводимое высокое качество сварки, надежность, сварка и фиксация только с одной стороны, высокая скорость сварки, не требуется дополнительная механическая обработка

новлению изношенных деталей дорогостоящих установок и производственных линий. Закупка запасных деталей обходится очень дорого, а для их изготовления зачастую требуется недоступное оборудование. Примеры использования электронно-лучевой сварки для восстановления деталей машин, эксплуатируемых в автомобильной промышленности, представлены на рис. 2. Подобным образом изготавливаются изделия, в которых требуется изменение магнитных свойств в различных зонах по сечению изделия. При этом обеспечиваются высокие качество сварки и динамическая прочность, небольшие размеры металла ЗТВ, после сварки не требуется дополнительная механическая обработка изделий.

В настоящее время **лазерные технологии** разрабатываются с помощью лазерного центра последнего поколения TRUMPF Lasercell 1005 с CO₂-лазером мощностью 3800 Вт (рис. 3). Возможна трехмерная резка и сварка элементов больших размеров, обработка плоских элементов, а также элементов с осевой симметрией. Имеются три взаимозаменяемые рабочие головки: две — для резки, оснащенные линзовыми объективами с фокусным расстоянием $f = 125$ и 175 мм, и одна — для

сварки, оснащенная зеркальным объективом с фокусным расстоянием $f = 270$ мм и системой поперечных газовых струй. Центр укомплектован современным газовым смесителем защитных газов.

Возможно одновременное управление пятью осями. Оборудование позволяет выполнять обработку больших листов площадью $1,5 \times 3,0$ м. При этом обеспечиваются высокие скорость вспомогательных перемещений и точность установки лазерной головки.

С целью достижения высокого качества поверхности реза оптимизированы параметры процесса резки плоских элементов, изготовленных из углеродистых и легированных сталей, титановых сплавов, плакированных пластин и др. За последние два года разработаны методы лазерной резки и произведены экспериментальные партии деталей для более чем 50 промышленных предприятий. Примеры использования лазерной технологии для фигурной резки стальных листов, титана и плакированных пластин показаны на рис. 4.

Работа в области резки объемных элементов выполняется для субподрядчиков, поставляющих некоторые детали предприятиям автомобильной промышленности, мебельным фабрикам, компаниям,



производящим рекламные щиты и декоративные элементы для интерьеров помещений. Соответственно разработаны методики резки, управляющие программы обрабатывающего центра, выполнена резка экспериментальных элементов из углеродистой стали и алюминиевых сплавов. Пример использования трехмерной лазерной резки фигурных элементов из стали представлен на рис. 5–7.

В настоящее время работы по **лазерной сварке** ведутся в следующих направлениях:

испытания качества соединений, выполненных из низколегированных сталей, а также исследования в области сварки пластин большого размера из углеродистых и нержавеющей сталей (рис. 7);

разработка технологий для сварки заготовок специального раскроя с испытанием на растяжение (рис. 8, 9);

создание технологии сварки для теплообменников, используемых в пищевой промышленности (рис. 10);

практическое применение лазерной сварки при изготовлении труб из легированных сталей на производственных линиях для непрерывной сварки труб.

Институт сварки сотрудничает не только с промышленными компаниями Польши и другими отечественными исследовательскими центрами, но и поддерживает, развивает многочисленные международные контакты с научно-исследовательскими центрами стран Западной и Восточной Европы, заинтересованными в использовании высокоэффективных пучков в сварочной технологии.

The paper describes the results of research and technology work in the field of electron beam welding and laser technologies of cutting and welding, conducted in the Institute in Gliwice. Specification of the developed equipment and examples of technologies application in the mechanical engineering and automotive industries are given. Experience of the Institute co-operation with the scientific centers and industrial companies in the field of the above technologies is considered.

Поступила в редакцию 26.06.2003



У ДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ДВУХСТОРОННЕЙ СВАРКЕ ТИГ

Х. ГАО, Л. ВУ, Х. ДОНГ (Харбинский технологический ин-т, Китай)

С помощью теоретического анализа, экспериментирования и численного моделирования исследован механизм проплавления при двухсторонней сварке ТИГ. Результаты показали, что при прохождении сварочного тока непосредственно через зону сварки происходит его концентрированное распределение, формируется более сильное электромагнитное поле и вызывается более сильное течение жидкости в сварочной ванне, что способствует проплавлению. В процессе двухсторонней сварки ТИГ при частичном проплавлении шва между нижними частями двух сварочных ванн образуется зона накопления тепла, где температура быстро повышается даже при небольшом количестве подводимого тепла. В нижней сварочной ванне выталкивающая сила создает поток, направленный внутрь, который может перемещать горячую жидкость с поверхности сварочной ванны в ее нижнюю часть, формируя таким образом глубокую сварочную ванну.

Ключевые слова: двухсторонняя сварка ТИГ, проплавление шва, численное моделирование, алюминиевый сплав

Проблемы повышения производительности и экономия затрат всегда актуальны для сварочного производства. Важным средством решения этих проблем должно стать внедрение высокоэффективных сварочных процессов, таких как дуговая сварка под флюсом или сварка МИГ, за счет сокращения объема использования дуговой сварки металлическим покрытым электродом. Повышение уровня автоматизации и расширение технологических возможностей можно достичь путем внедрения роботизированных сварочных установок. При этом на базе основных сварочных процессов следует разрабатывать новые высокоэффективные способы сварки [1]. При изготовлении металлических конструкций средней толщины благодаря проплавляющей способности сварочной дуги кромки шва подготавливают с одной или двух сторон и затем заполняют присадочным материалом. При этом возникает ряд проблем, среди них уменьшение производительности, увеличение затрат и расхода присадочного металла. Многослойные швы склонны к образованию дефектов — включений, несплавлений, большой зоны термического влияния (ЗТВ) и пр. С увеличением толщины конструкции эти проблемы усугубляются. Таким образом, повышение проплавляющей способности можно считать одной из главных задач исследований.

Для решения указанных проблем выполнен большой объем исследовательских работ. На основании их результатов разработан способ двухсторонней дуговой сварки. Понятие «двухсторонняя дуговая сварка» подразумевает, что с обратной стороны свариваемого изделия размещается еще одна сварочная горелка. В зависимости от количества источников питания и схемы соединения этот процесс можно классифицировать как работающий в режиме с двумя или с одним источником питания. Двухсторонняя дуговая сварка с двумя источниками питания имеет широкую сферу применения. Например, на Харбинском котлостро-

тельном заводе и Восточном котлостроительном предприятии Китая двухсторонняя импульсная сварка МИГ использовалась для изготовления трубных досок, при этом наблюдали низкий уровень сварочной деформации и значительную производительность процесса [2].

В 1998 г. И. М. Цанг из университета штата Кентукки (США) предложил способ двухсторонней дуговой сварки с одним источником питания [3–6]. Основная идея заключалась в усилении проплавляющей способности дуги и повышении производительности сварки без увеличения расходов. При указанном способе сварки предполагается размещение второй горелки с обратной стороны свариваемого изделия. Обе горелки подсоединены непосредственно к сварочному источнику питания, таким образом исключается контакт со свариваемым изделием. Сварочный ток идет от одной дуги через свариваемое изделие ко второй, создавая в зоне сварки высокий уровень тепловыделения. При том же значении сварочного тока повышается глубина проплавления, уменьшается ЗТВ и улучшается качество формирования шва. При таком способе сварки можно комбинировать различные виды традиционных дуговых технологий и использовать стандартный источник питания.

Особенностью двухсторонней дуговой сварки является не только дополнительное использование второго источника нагрева, но и наличие элект-

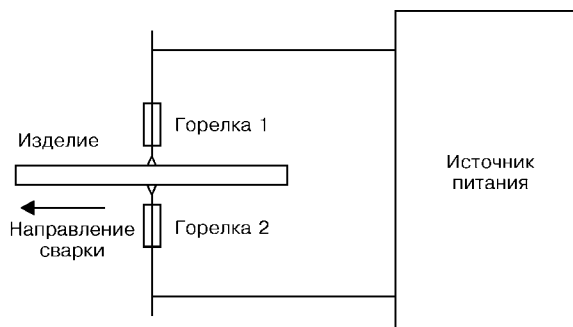


Рис. 1. Схема двухсторонней дуговой сварки

© Х. Гао, Л. Ву, Х. Донг, 2003

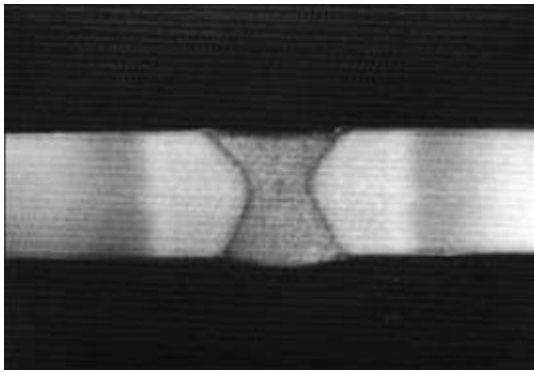


Рис. 2. Макрошлиф поперечного сечения соединения, выполненного двухсторонней сваркой ТИГ на пластине из сплава LY12 толщиной 6 мм на следующем режиме: $I_{св} = 100$ А; $v_{св} = 5$ мм/с

ромагнитного взаимодействия между источниками. Это отличает указанный способ сварки от обычного. Поскольку это взаимодействие было недостаточно изучено, возникла необходимость в исследовании механизма проплавления и разработке руководства по применению указанного способа.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований возможности использования двухсторонней сварки ТИГ применительно к сплаву алюминия. Обсуждается механизм проплавления при двухсторонней сварке ТИГ.

Проведение экспериментов. На рис. 1 показана схема двухсторонней дуговой сварки. В этой схеме горелки 1 и 2 являются обычными сварочными горелками, используемыми при сварке ТИГ. Сварочный источник питания СОМРА500Р (производство Японии) имеет на выходе переменный ток прямоугольной формы и оснащен высокочастотным осциллятором.

В экспериментах использовали алюминиевые сплавы LY12 и LF6, два вольфрамовых электрода диаметром 3 мм, в качестве защитного газа — аргон. Наплавку валиков на пластину из алюминиевого сплава выполняли без присадочного материала. Во время процесса сварки контролировали стабильность процесса, профиль дуги и сварочную ванну. На рис. 2 и 3 представлены макрошлифы поперечных сечений швов.

По результатам экспериментов можно сделать выводы, что двухсторонняя сварка ТИГ характеризуется следующими особенностями:

значительной проплавляющей способностью.

Из рис. 4 видно, что проплавление шва частичное,

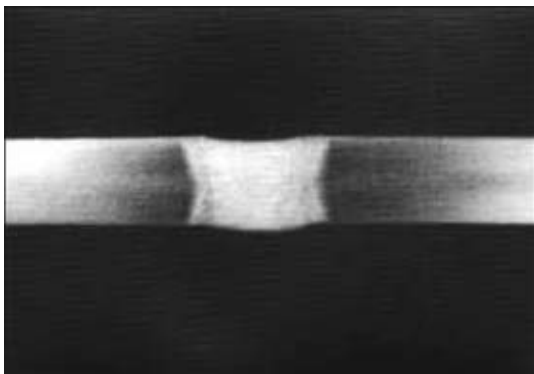


Рис. 3. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного двухсторонней сваркой ТИГ на пластине из сплава LF6 толщиной 4 мм на следующем режиме: $I_{св} = 65$ А; $v_{св} = 5$ мм/с

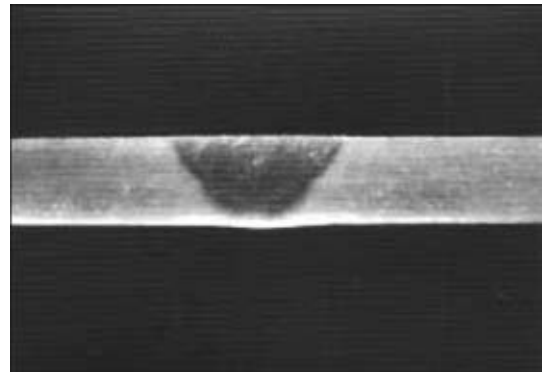


Рис. 4. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного односторонней сваркой ТИГ на пластине из сплава LF6 толщиной 4 мм на следующем режиме: $I_{св} = 120$ А; $v_{св} = 5$ мм/с

ширина шва в верхней части составляет около 8 мм, глубина проплавления — 3,3 мм. Для полного проплавления шва необходимо увеличить сварочный ток или уменьшить скорость сварки, можно также повторно выполнить шов с обратной стороны свариваемого изделия практически на том же режиме. При двухсторонней дуговой сварке полное проплавление получают при относительно невысоком сварочном токе. На рис. 3 показан шов, выполненный на сварочном токе 65 А, остальные параметры такие же, как на рис. 4. Имело место полное проплавление шва, ширина шва как в верхней, так и в нижней его части составляла около 4,7 мм;

более низкой подводимой энергией и более высокой производительностью. По сравнению с односторонней сваркой ТИГ при двухсторонней сварке расход энергии и время сварки меньше. Для сравнения этих двух способов сварки выполняли стыковое соединение из алюминиевого сплава длиной 1000 мм и толщиной 6 мм. При односторонней сварке ТИГ, необходимо выполнить предварительную разделку кромок или осуществлять процесс по зазору, но с двух сторон. При этом сварочный ток $I_{св}$ обычно составляет 200...270 А, а скорость сварки $v_{св} = 150...250$ мм/мин [1]. В данном случае берутся средние значения этих параметров: $I_{св} = 235$ А; $v_{св} = 200$ мм/мин. Таким образом, можно рассчитать время сварки — $2 \cdot 1000 / 200 = 10$ мин, при этом время на подготовку кромок не учитывается. Предположим, что $U_{д} = 15$ В. Тогда подводимая энергия равна $I_{св} \times U_{д} \times t = 235 \times 15 \times 10 \times 60 = 2115$ кДж. Если это соединение выполнять двухсторонней сваркой ТИГ, то $I_{св} = 100$ А, $v_{св} = 300$ мм/мин. Представленный на рис. 2 макрошлиф поперечного сечения шва получен при двухсторонней сварке в течение $1000 / 300 = 3,33$ мин. Также можно предположить, что в этом случае напряжение на обоих дугах составляло 15 В, отсюда подводимая энергия равна $2 \times 100 \times 15 \times 3,33 \times 60 = 600$ кДж. Благодаря сокращению времени сварки и расхода энергии производительность сварки можно увеличить в несколько раз;

меньшей степенью деформации. Обнаружено, что при двухсторонней сварке ТИГ поперечная угловая деформация свариваемого изделия меньше. По теории сварочных деформаций неоднородные

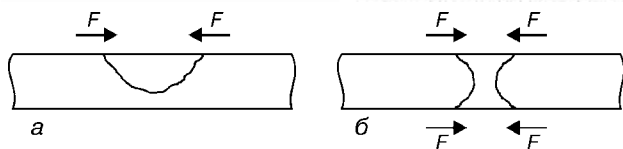


Рис. 5. Силы F , действующие на сварное соединение при поперечной деформации, в случае односторонней (а) и двухсторонней (б) сварки ТИГ

распределения поперечной усадки шва по его толщине вызывают угловую деформацию. В процессе сварки происходит расширение металла и повышение температуры вблизи сварочной ванны, этому препятствует холодный металл, вследствие чего возникает деформация. При охлаждении металла происходит поперечная усадка. В одностороннем шве поперечная деформация больше в его верхней части и меньше в нижней, из-за чего образуется угловой прогиб соединения. Угловые деформации влияют на качество соединения, поэтому необходимо принимать меры по их уменьшению или устранению.

При двухсторонней сварке ТИГ источники нагрева находятся по обе стороны от соединения, поэтому угловые усадки шва симметричны, а угловая деформация меньше. Между тем, при односторонней сварке шов получается более узким, зона воздействия высокой температуры также сужается, что способствует уменьшению угловой деформации. На рис. 5 показаны силы, действующие на сварное соединение при поперечной деформации;

более долгим сроком службы электродов. При сварке алюминиевых сплавов способом ТИГ необходимо принимать меры по удалению оксидных пленок. Для этого обычно используют переменный ток, что ускоряет износ электрода, особенно при автоматической сварке. Изнашивание электрода напрямую связано со сварочным током — чем больше ток, тем быстрее изнашивание электрода. Вместо обычной сварки ТИГ соединение можно выполнить двухсторонней сваркой ТИГ, при которой используется относительно невысокий ток, что продлевает срок службы электрода.

Однако применение двухсторонней сварки ТИГ имеет ряд ограничений. Поскольку с обратной сто-

роны свариваемого изделия размещается вторая сварочная горелка, необходимо дополнительное пространство, что ограничивает применение этого способа сварки.

Механизм проплавления двухсторонней сварки ТИГ. Наиболее часто стремятся получать швы с большим коэффициентом формы, благоприятной структурой и требуемыми механическими свойствами. Чтобы увеличить коэффициент формы шва, можно использовать процесс с высокой плотностью энергии, например электронно-лучевую или лазерную сварку. Но из-за высокой стоимости эти способы сварки имеют ограниченное применение. Из всего изложенного выше следует, что благодаря применению двухсторонней дуговой сварки можно получить высокий коэффициент формы шва при небольшой подводимой энергии. Теоретический анализ позволяет высказать следующие соображения для объяснения этого факта:

поскольку источники нагрева расположены по обе стороны от свариваемого изделия, в области двух сварочных ванн происходит концентрация тепловой энергии при небольшом количестве подводимого тепла;

при прохождении сварочного тока непосредственно через зону сварки создаются значительные электромагнитные силы, которые вызывают сильный конвективный поток в сварочной ванне, что усиливает проплавление;

при двухсторонней сварке ТИГ выталкивающая сила в нижней части сварочной ванны положительно влияет на глубину проплавления.

Далее эти положения проанализированы с помощью экспериментов и математического моделирования.

Влияние направления сварочного тока. При обычной сварке ТИГ сварочный ток течет от одного зажима источника питания через сварочную горелку, дугу и свариваемое изделие ко второму зажиму. При двухсторонней сварке ТИГ он проходит непосредственно через зону сварки свариваемого изделия, затем через вторую горелку и возвращается к источнику питания. Благодаря большей плотности сварочного тока в зоне сварки, особенно в сварочной ванне, создается сильное электромагнитное поле и происходит конвекция металла в различных направлениях.

Из рис. 6 видно, что значения электромагнитных сил больше, если используется один источник питания, особенно в центре свариваемого изделия [6].

Формирование зоны концентрации тепла. На проплавление шва оказывают влияние многие факторы. Обычно, чем выше сварочный ток, тем глубже проплавление шва. Между тем, глубина проплавления зависит от материала и толщины свариваемого изделия: чем больше теплоемкость материала, тем больше тепла требуется для того, чтобы повысить температуру при данном объеме металла до такого значения, чтобы получить мелкую и узкую сварочную ванну. Толщина

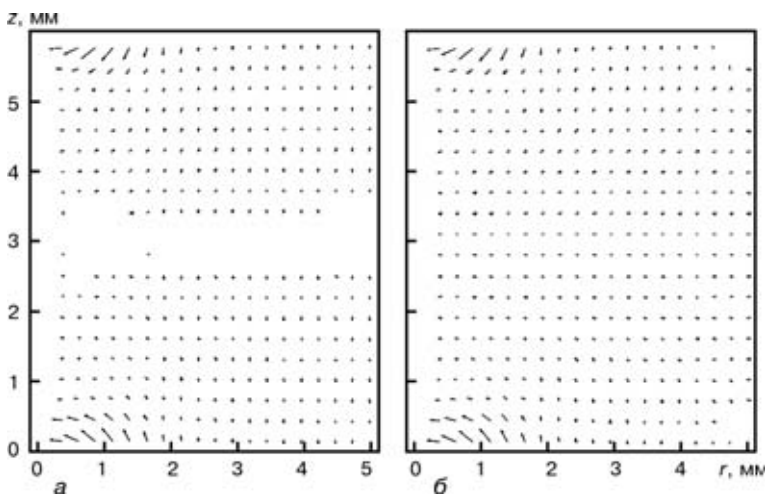


Рис. 6. Распределение электромагнитных сил в свариваемом изделии при двухсторонней сварке ТИГ на токе 110 А с двумя (а) и одним (б) источниками питания

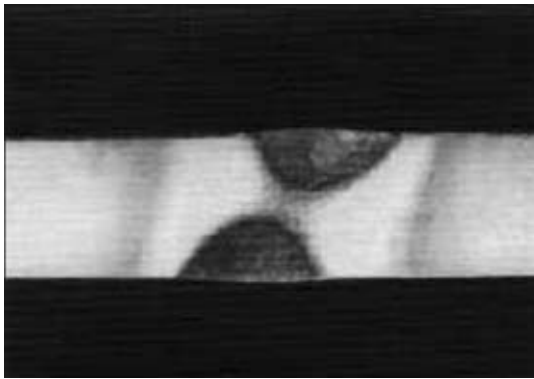


Рис. 7. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного сваркой ТИГ на токе 110 А при смещении горелок на 5 мм

свариваемого изделия влияет на подвод тепла: чем больше толщина изделия, тем более мелкая и узкая образуется сварочная ванна. Когда глубина проплавления превышает 60 % толщины свариваемого изделия, происходит накопление тепла в нижней части сварочной ванны, вследствие чего глубина проплавления увеличивается. При односторонней сварке слой металла под сварочной ванной достаточно тонкий, подвод тепла больше, чем его рассеяние, поэтому происходит накопление тепла, благодаря чему быстро увеличивается глубина проплавления. При двухсторонней сварке ТИГ при подводе тепла в свариваемое изделие сварочные ванны образуются с обеих сторон. В образовавшуюся между ними зону подводится тепло от двух дуг, температура быстро повышается и формируется зона концентрации тепла.

Металл в этой зоне имеет очень высокую температуру. Совсем немного тепла нужно для того, чтобы его расплавить, что резко увеличивает глубину проплавления каждой из сварочных ванн. Затем зона концентрации тепла исчезает, две сварочные ванны соединяются и происходит полное проплавление шва.

Для подтверждения изложенного выше проведены следующие эксперименты. Сварочные горелки смещались относительно друг друга перпендикулярно направлению сварки. При наличии зоны концентрации тепла сварочные ванны увеличиваются вдоль линии, соединяющей центры двух дуг. На рис. 7 представлен макрошлиф поперечного сечения шва при смещении горелок на 5 мм перпендикулярно направлению сварки. В эксперименте использовано сварное изделие из алюминиевого сплава LY12 толщиной 6 мм, скорость сварки составляла 5 мм/с, сварочный ток — 110 А, напряжение на обоих дугах — 15 В. На рис. 8 пред-

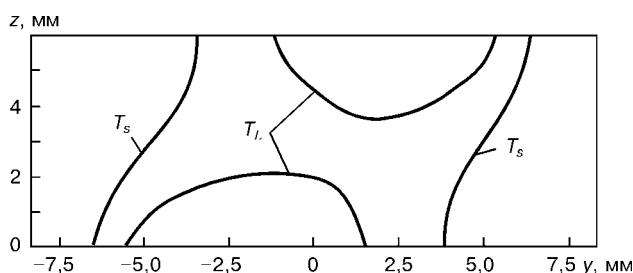


Рис. 8. Результаты расчетов, полученные при смещении горелок на 5 мм

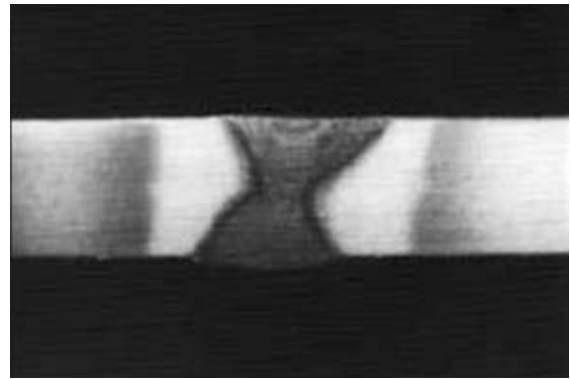


Рис. 9. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного сваркой ТИГ на токе 120 А

ставлены результаты моделирования процесса сварки ТИГ, осуществляемого с использованием тех же параметров.

Из рисунка видно, что проплавление шва частичное, обе сварочные ванны вытянуты вдоль осевой линии дуг, что свидетельствует о формировании зоны концентрации тепла между сварочными ваннами. Наличие зоны концентрации тепла ускоряет процесс увеличения размеров сварочной ванны. На рис. 9 представлен макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного сваркой ТИГ на токе 120 А, остальные параметры оставались такими же, как на рис. 7.

Влияние выталкивающей силы. Выталкивающая сила представляет собой разновидность силы, которая возникает в жидком металле вследствие разницы значений его плотности. В сварочной ванне эта разница вызвана температурным градиентом, который является причиной естественной конвекции в жидком металле.

При обычном способе сварки выталкивающая сила также играет важную роль в перемещении потока жидкого металла, но менее важную, чем поверхностное натяжение и электромагнитные силы. В данном случае выталкивающая сила вызывает течение жидкого металла, направленное вверх вдоль осевой линии сварочной ванны, что препятствует проплавлению шва.

Если проплавление шва при двухсторонней сварке ТИГ происходит частично, то в верхней сварочной ванне выталкивающая сила оказывает тот же эффект, что и при односторонней сварке, препятствует проплавлению шва. Но в нижней сварочной ванне этот эффект имеет иной характер: выталкивающая сила вызывает течение жидкого металла, направленное вверх вдоль осевой линии сварочной ванны. Направленный внутрь поток переносит жидкий металл с высокой температурой во внутреннюю часть сварочной ванны. Как и электромагнитные силы, этот эффект оказывает положительное влияние на проплавление шва.

На рис. 10 показано поле направления течения жидкого металла при двухсторонней сварке ТИГ, формирующееся при действии только выталкивающей силы. В обеих сварочных ваннах выталкивающая сила создает различные жидкие потоки металла, поэтому верхняя и нижняя сварочные ванны увеличиваются в противоположных направлениях. Благодаря этому нижняя сварочная ванна формируется быстрее, при

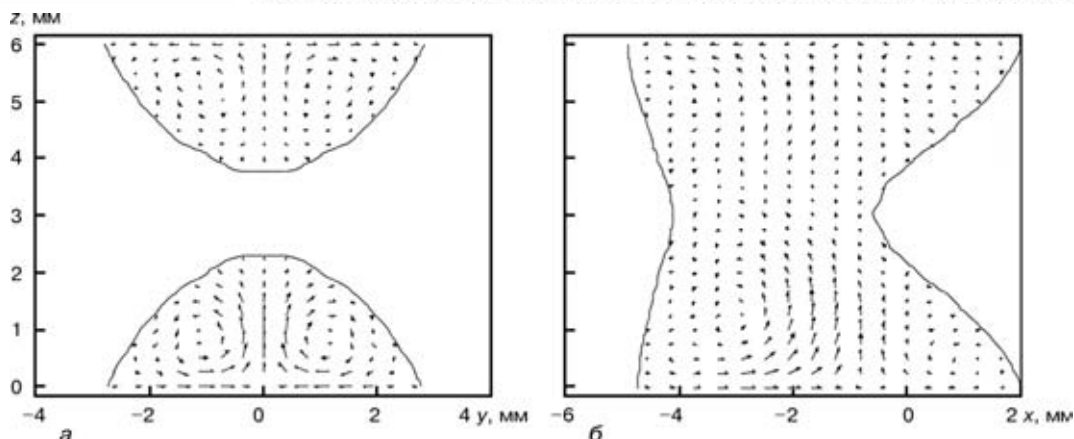


Рис. 10. Поле течения жидкости в течение 4 с при действии только выталкивающей силы при двухсторонней сварке ТИГ: $I_{cb} = 110$ А; $U = 15$ В; $v_{cb} = 10$ мм/с: *a* — поперечное, *б* — продольное сечение

этом она глубже, чем верхняя сварочная ванна, которая с свою очередь будет шире.

Выводы

1. При двухсторонней сварке ТИГ сварочный ток проходит непосредственно через зону сварки, что приводит к его концентрации, формированию электромагнитных сил и вызывает более интенсивный поток жидкости в сварочной ванне, способствуя процессу проплавления.

После частичного проплавления, между нижними частями двух сварочных ванн возникает зона накопления тепла с возрастанием температуры даже при меньшем количестве подводимого тепла.

2. Выталкивающая сила вызывает в нижней сварочной ванне поток, направленный внутрь, благодаря которому горячая жидкость перемещается

с поверхности сварочной ванны к ее дну и формирует более глубокую сварочную ванну.

1. *Welding handbook*. — Welding process and equipment. — Chinese machine press, 1995. — Vol. 1.
2. *Chen Yuchuan*. New welding techniques development in boiler manufacturing // Proc. of the 7th National annual welding conference, 1993, Qingdao, China. — Qingdao, China, 1993. — Vol. 1. — P. 26–36.
3. *Zhang Y. M., Zhang S. B.* Double-sided arc welding increases weld joint penetration // *Welding J.* — 1998. — June. — P. 57–61.
4. *Zhang Y. M., Zhang S. B.* Welding aluminum alloy 6061 with the opposing dual-torch GTAW process // *Ibid.* — 1999. — June. — P. 202–206.
5. *Zhang Y. M., Pan C., Male A. T.* Improved microstructure and properties of 6061 aluminum alloy weldments using a double-sided arc welding process // *Metall. and Mater. Trans.* — 2000. — **31A**. — P. 2537–2543.
6. *Cao H. M.* Research on the mechanism of double-sided arc welding process and the numerical simulation of temperature and fluid flow fields: Ph. D. thesis. — Harbin: Harbin Inst. of Technology, 2001.

Using theoretical analysis, experiments and numerical modelling, a mechanism of penetration of a doubled-sided TIG welding has been investigated. The results show that the welding current passes directly through the zone of welding, leads to a concentrated distribution of current, forms the stronger electromagnetic field and causes the stronger fluidity in the weld pool that contributes to penetration. In the process of TIG double-sided welding a zone of heat accumulation is formed at a partial penetration of weld between lower parts of two weld pools, where temperature can be quickly increased even at a small amount of heat supplied. In the lower weld pool, the forcing out force creates the flow directed inside, which can displace the hot fluid from the weld pool surface to its lower part, thus forming a deep weld pool.

Поступила в редакцию 10.07.2003



ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДУПЛЕКСНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

М. БЕЛОЕВ (KZU Holding Ltd., г. София, Болгария), **Ф. ХАРТУНГ** (Трирский техн. ин-т, Германия),
Н. ЛОЛОВ, Б. АЛЕКСАНДРОВ (Софийский техн. ун-т, Болгария)

Рассмотрены состав, структура, металлургические свойства современных дуплексных нержавеющей сталей. Показано влияние легирующих элементов, фазового состава сталей, а также термического цикла сварки на механические свойства и коррозионную стойкость различных участков сварных соединений дуплексных сталей.

Ключевые слова: дуплексные нержавеющей стали, классификация, легирующие элементы, микроструктура, фазовый состав, интерметаллиды, свариваемость, механические свойства, коррозионная стойкость

Дуплексные нержавеющей стали (ДНС) — относительно новая группа высоколегированных нержавеющей сталей, которые применяются на практике с 1970-х годов. Для них характерна микроструктура, состоящая из приблизительно равных частей аустенита и феррита, при этом количество аустенита несколько преобладает. Преимущества ДНС по сравнению с обычными аустенитными (АНС) и ферритными нержавеющей стали (ФНС) следующие:

более высокая коррозионная стойкость (особенно если речь идет о местной — питтинговой или щелевой коррозии в агрессивных средах, содержащих хлор и фтористые соединения);

более высокие механические свойства (предел текучести почти в два раза выше, чем в АНС, что может способствовать значительному снижению массы сварных конструкций и существенной экономии затрат);

меньше технологических проблем в процессе изготовления сварных конструкций благодаря хорошей свариваемости;

хорошая совместимость с низколегированными сталями благодаря близким коэффициентам теплового расширения, что обеспечивает более низкие уровни термического напряжения в сварных конструкциях.

ДНС находят широкое применение во многих отраслях: нефтедобывающей промышленности (в частности, строительство морских платформ); химической (изготовление оборудования для целлюлозно-бумажного производства и производства искусственных удобрений); энергетике (производство оборудования для очистки содержащих серу газов); горной (производство установок для извлечения минералов из руд); фармацевтической, а также в судостроении (строительство танкеров для транспортировки агрессивных химических соединений).

Маркировка ДНС. На сегодня нет единой маркировки ДНС. В США Американским инсти-

тутом железа и стали (AISI) введена трехзначная система маркировки, подобная используемой для АНС (например, AISI 304, AISI 316 и т. д.). Позже для обозначения новых марок ДНС Общество инженеров-автомобилестроителей (SAE) и Американское общество по испытанию материалов (ASTM) ввели одну букву S плюс обозначение из пяти цифр. «Инструкция по стальной продукции для нержавеющей сталей» и Унифицированная система нумерации (UNS), введенная SAE и ASTM, охватывает весь диапазон стандартизированных нержавеющей сталей. Обычно на практике букву S и первую цифру заменяют словом «Duplex» (например, Duplex 2304 вместо S32304 или Duplex 2205 вместо S32205) или вообще опускают слово «Duplex» — 2304, 2205.

В соответствии с европейскими стандартами (EN) для маркировки сталей используют пять цифр, первая из которых — единица — обозначение стали. После первой цифры ставят точку, за которой следует обозначение определенной марки стали из четырех цифр.

Кроме стандартных обозначений, производители ДНС также присваивают им различные торговые названия.

Современные ДНС делятся на четыре группы: ДНС с пониженным содержанием легирующих элементов (малодуплексные — с низким содержанием аустенита, нелегированные молибденом); стали группы 2205 (почти 80 % всех используемых на практике сплавов относятся к этой марке); дуплексные стали с 25 % Cr (сплав 255 и DP-3); супердуплексные нержавеющей стали (СДНС) с 25...26 % Cr и повышенным содержанием молибдена и азота по сравнению с дуплексными сталями с 25 % Cr.

В табл. 1 приведены соответствующие нормам SAE/ASTM и EN химический состав, маркировка, торговое название наиболее применяемых ДНС.

Роль легирующих элементов. Взаимодействие основных легирующих элементов (хрома, молибдена, азота и никеля) имеет очень сложный характер. Химический состав определяет фазовое равновесие и во многом влияет на формирование неблагоприятных интерметаллидных соединений при высоких температурах, поэтому для получения



Таблица 1. Химический состав наиболее используемых ДНС

ДНС		Торговое название	Массовая доля элементов, %						PRE _N	PRE _W **
SAE/ASTM	EN 10088		Cr	Ni	Mo	N	Cu	W		
S32304	1.4362	SAF 2304, UR 35 N	23	4	0,1	—	—	—	24	—
S31803	1.4462	UR 45 N	22	5	2,8	0,15	—	—	32/33	—
S32205		SAF 2205 UR 45 N+	22,8	6	3,3	0,18	—	—	36/36	—
S32550	1.4507	UR 52 N	25	6,5	3	0,22	1,5	—	38/39	—
S31200		Ferralium 255 UR 47 N	25	6,5	3	0,22	—	—	38/39	—
S31260		DP 3	27	7	3	0,16	0,5	0,3	37	38
S32550	1.4507	UR 52 N+ SAF 2507	25	7	3,5	0,25	1,5	—	41	—
S32750	1.4410	UR 45 N+	25	7	3,8	0,28	—	—	41	—
S39274		DP 3W	25	7	3	0,27	—	2	39	42,5
S32760	1.4501	Zeron 100	25	7	3,5	0,24	0,7	0,7	40	41,5
		DTS 25.7 NW	27	7,5	3,8	0,27	0,7	0,7	44	45
		DTS 25.7 NWCu	25	7,5	4	0,27	1,7	1	42,5	44

* Эквивалент сопротивления питтинговой коррозии PRE_N — Cr + 3,3Mo + 16N.
 **Эквивалент сопротивления питтинговой коррозии PRE_W — Cr + 3,3(Mo + 0,5W) + 16N.

стабильной дуплексной микроструктуры важно обеспечить необходимое содержание каждого из легирующих элементов. Их влияние на механические, физические и коррозионные свойства оценивается следующим образом.

Для формирования стабильной пассивной пленки оксида хрома, защищающей сталь от атмосферной коррозии, достаточно 10,5 % Cr. С увеличением его содержания коррозионная стойкость нержавеющей стали повышается. Хром является ферритообразующим элементом, а если его содержание возрастает, необходимо повышать также содержание никеля для получения дуплексной микроструктуры. Более высокое содержание хрома также вызывает образование интерметаллидных фаз. В АНС минимальное содержание хрома 18 %, в ДНС — 22.

Молибден дополняет хром с точки зрения коррозионной стойкости в хлористой среде. Он также является ферритообразующим элементом и повышает тенденцию к образованию интерметаллидных фаз. В ДНС содержание молибдена ограничивается до 4 %.

Азот увеличивает сопротивляемость питтинговой и щелевой коррозии, значительно повышает прочность ДНС и является наиболее эффективным легирующим элементом с точки зрения упрочнения твердого раствора. Обогащенные азотом ДНС также обладают высокой вязкостью. Азот препятствует выделению вредных интерметаллидных фаз и является мощным аустенитообразующим элементом, частично замещающим никель, поэтому для обеспечения желаемого фазового равновесия необходимо соблюдать его количество в пределах растворимости.

Никель стабилизирует аустенит. В составе ДНС никеля 3... 7 %, а в АНС — минимум 8. Благодаря более низкому содержанию никеля в ДНС по сравнению с АНС, влияние мирового роста цен на никель сказывается на колебании цен на ДНС гораздо меньше. Легирование никелем препятствует выделению вредных интерметаллидных фаз в АНС, но намного менее эффективно это влияние в ДНС. Благодаря объемно-центрированной кубической кристаллической решетке аустенит имеет высокую вязкость. Наличие около 50 % аустенита значительно повышает вязкость ДНС. Место дуплексных сталей по отношению к другим высоколегированным сталям (с учетом их химического состава) показано на рис. 1.

Металлургические свойства ДНС. Металлургические свойства ДНС исследованы с помощью диаграммы фазового равновесия трехкомпонентной системы Fe-Cr-Ni. Участок диаграммы, соответствующий 68 % Fe, приведен на рис. 2. Как видно из рисунка, ДНС затвердевают как феррит, некоторая часть которого превращается в аустенит. Температура фазового превращения зависит от химического состава сплава. При более низких тем-

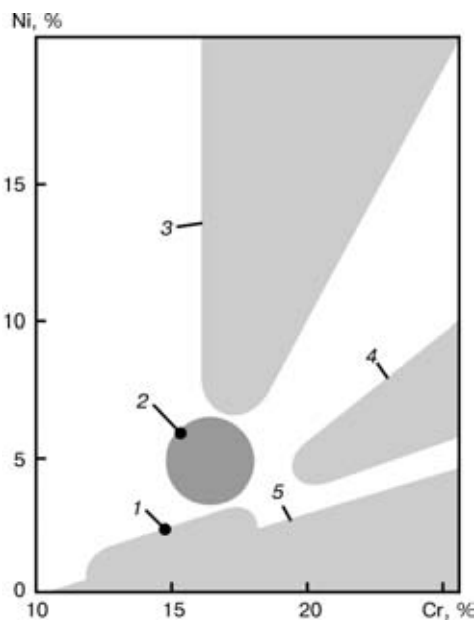


Рис. 1. Упрощенная диаграмма Шеффлера: 1 — мартенситные стали; 2 — стали с дисперсионным твердением; 3 — аустенитные стали; 4 — дуплексные; 5 — ферритные

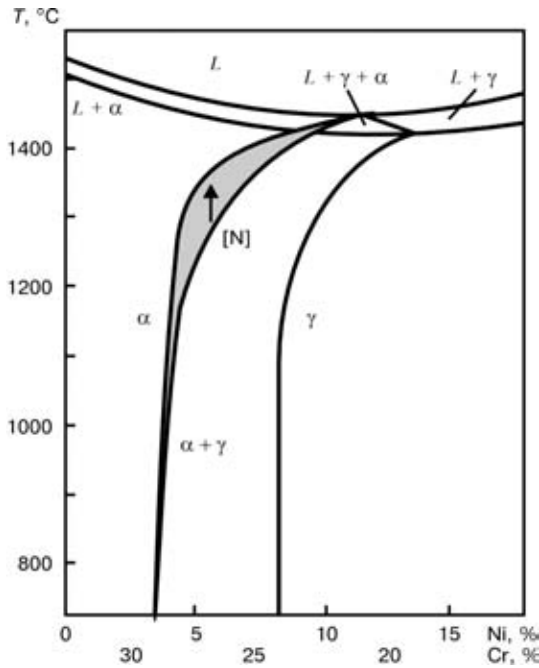


Рис. 2. Диаграмма фазового равновесия трехкомпонентной системы Fe-Cr-Ni

пературах полученное равновесие между аустенитом и ферритом практически не изменяется. На диаграмме также показано влияние увеличения количества азота.

Относительное количество феррита и аустенита в металле проката зависит не только от химического состава, но и от термической предыстории стали. Небольшие изменения химического состава могут существенно влиять на относительное количество двух фаз. В процессе дальнейшего охлаждения или последующей термической обработки ДНС могут выделяться различные вторичные фазы в температурном интервале 1000...300 °С. Такая тенденция во многом зависит от содержания легирующих элементов и, следовательно, существенно отличается в сталях различных марок. В СДНС и металле шва (МШ) выделение более интенсивно благодаря высокому содержанию в них легирующих элементов.

На рис. 3 приведена диаграмма «время-температура-выделение (ВТВ)», суммирующая приблизительные температурные интервалы, в которых происходит выделение вторичных фаз в ДНС.

Более высокое содержание легирующих элементов в СДНС обуславливает их большую склонность к выделению вторичных фаз. σ - и χ -Фазы, вторичный аустенит и карбид хрома являются наиболее важными вторичными фазами, выделяющимися в процессе изготовления и сварки стали и формирующимися при температуре 500 °С. Распад феррита до α' -фазы определяет верхний предел температур эксплуатации. При температуре ниже 500 °С реакции выделения вторичных фаз протекают сравнительно медленно и практиче-

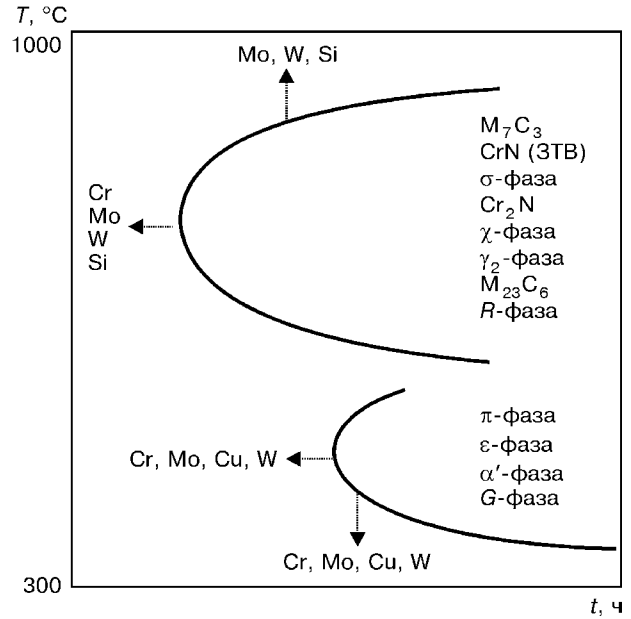


Рис. 3. С-образные кривые «время-температура-выделение»

ски не оказывают влияния на охрупчивание во время сварки. Вторичные фазы, выделяющиеся в металле ЗТВ ДНС и МШ при температурах выше 500 °С, приведены в табл. 2.

Аустенит, выделяющийся при температуре ниже 900 °С, обычно называют вторичным. Он выделяется при быстром охлаждении стали или МШ от высоких температур (где часть уравновешенного феррита больше), а затем вновь претерпевает нагрев в процессе сварки или термообработки. Аустенит, сформировавшийся при более низких температурах, содержит меньше азота, хрома и молибдена по сравнению с аустенитом, образовавшимся при высоких температурах. Морфология вторичного аустенита изменяется в зависимости от участка и механизма формирования: от видманштеттовой структуры с острыми краями, которая часто встречается в МШ, до зернистой, встречающейся как в МШ, так и в металле ЗТВ. В обоих случаях из-за низкого содержания азота,

Таблица 2. Вторичные фазы, формирующиеся в металле ЗТВ ДНС и МШ при температурах выше 500 °С

Тип выделения	Химическая формула	Температурный интервал, °С	Пространственная группа	Параметры решетки, нм
α -Феррит	—	—	$1m\bar{3}m$	$a = 0,286...0,288$
γ -Аустенит	—	—	$Fm\bar{3}m$	$a = 0,358...0,362$
Нитрид хрома	Cr_2N	700...900	$P\bar{3}1m$	$a = 0,480; c = 0,447$
Нитрид хрома	CrN	~1000	$Fm\bar{3}m$	$a = 0,413...0,447$
Фазы:				
σ	$Fe-Cr-Mo$	600...1000	$P4_2/mnm$	$a = 0,879; c = 0,454$
χ	$Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$	700...900	$143m$	$a = 0,892$
R	$Fe-Cr-Mo$	550...800	$R\bar{3}$	$a = 1,090; c = 1,934$
π	$Fe_7Mo_{13}N_4$	550...600	$P4_132$	$a = 0,647$
τ	—	550...650	$Fm\bar{m}m$	$a = 0,405; b = 0,484; c = 0,286$
$M_{73}C_3$	—	950...1050	$Pnma$	$a = 0,452; b = 0,699; c = 1,211$
$M_{23}C_6$	—	—	$Fm\bar{3}m$	—



хрома и молибдена она оказывает негативное влияние на стойкость к питтинговой коррозии. Выделение вторичного аустенита также способствует формированию зародышей фаз с высоким содержанием хрома и низким содержанием никеля (например, σ -фазы).

Интерметаллидные фазы. Самой обычной интерметаллидной фазой является σ -фаза, часто выделяющаяся в значительных количествах. Во многих ДНС и сварных соединениях из них можно наблюдать выделение χ - и R -фаз, но в меньших количествах. Во многих случаях σ -фаза является синонимом интерметаллидной фазы.

Тетрагональная σ -фаза является интерметаллидным соединением Fe-Cr-Mo. Ее термодинамическая устойчивость находится в интервале 600...1000 °С в зависимости от содержания легирующих элементов. Она обогащена хромом, молибденом, кремнием и вольфрамом, бедна никелем и марганцем.

Кубическая χ -фаза представляет собой интерметаллидное соединение, обогащенное молибденом и часто встречающееся в ДНС после выдержки в температурном интервале 700...900 °С. Она метастабильна и замещается σ -фазой в процессе более длительной термообработки.

Интерметаллидная R -фаза выделяется в ДНС в температурном интервале 550...800 °С.

Охрупчивание при температуре 475 °С вызвано спиноидальным распадом участков феррита, богатых фазами α -Fe и α' -Cr в процессе старения при 300...550 °С. Образование α' -фазы включает формирование зародышей и их рост. Однако оно всегда связано со значительным уменьшением ударной вязкости.

Процесс выделения гексагональных нитридов хрома Cr₂N может протекать в ДНС в температурном интервале 700...900 °С. Их выделение может быть результатом перенасыщения феррита азотом при высоких скоростях охлаждения от высоких температур в процессах изотермической обработки и сварки. Эти выделившиеся фазы могут оказывать негативное влияние на коррозионную стойкость и ударную вязкость.

Карбиды играют ограниченную роль в современных ДНС благодаря очень низкому содержанию в них углерода. Предполагается, что карбиды способствуют выделению других вредных фаз, таких как σ -фаза, обеспечивая наличие центров зародышеобразования.

Кинетика выделения интерметаллидных фаз.

Процесс выделения вторичных фаз в ДНС или в МШ протекает:

- внутри ферритных зерен;
- на границах ферритных и аустенитных зерен;
- на границах ферритных зерен.

По сути это результат нестабильности феррита при температурах ниже 1000 °С, чему способствует более высокая скорость диффузии в феррите по сравнению с аустенитом. Факторами, влияющими на кинетику выделения вторичных фаз и температурный интервал выпадения последних, являются химический состав феррита, а также коли-

чество и характер центров зародышеобразования внутри зерен и на границах.

Состав феррита зависит от химического состава стали или МШ, а также процентного содержания феррита. Температура термообработки, скорость охлаждения и нагрева при последовательном наложении швов также в значительной степени влияют на состав феррита.

При более высоком содержании феррита образуется менее легированный феррит, при более низком — феррит с более высоким содержанием легирующих элементов, стабилизирующих феррит (хром, молибден и кремний). Быстрое охлаждение сварных соединений (особенно однопроходных швов) обеспечивает меньшее время для распределения легирующих элементов, в результате образуется феррит и аустенит с более однородным составом, тогда как многопроходная сварка и более высокая погонная энергия обеспечивают большее время для распределения. В результате быстрого охлаждения содержание феррита увеличивается, что обеспечивает большее количество в нем легирующих элементов.

Термообработка при более высоких температурах приводит к увеличению объемного содержания феррита и более однородному распределению легирующих элементов. Благодаря этому феррит менее чувствителен к выделению интерметаллидных фаз, но риски формирования вторичного аустенита и при определенных условиях выделений нитридов, возрастут. Формирование интерметаллидных фаз в процессе охлаждения протекает медленнее при высокой температуре отжига. С ее увеличением скорость зародышеобразования уменьшается, но конечное количество σ -фазы при более длительных сроках старения остается без изменений.

Значительные изменения содержания и состава феррита могут протекать в швах. Обнаружено, что узкие ферритные участки обогащены легирующими элементами, что способствует формированию интерметаллидных фаз, выделение вторичных фаз также более вероятно на этих участках.

Более высокое содержание легирующих элементов (молибдена, вольфрама и кремния) повышает диапазон стабильности выделившихся фаз и сдвигает диаграмму (см. рис. 3) по направлению к более непродолжительному времени их появления. Рассмотрим влияние типичных легирующих элементов на выделение вторичных фаз.

Повышение содержания хрома и молибдена увеличивает скорость выделения вторичных фаз. Они также расширяют температурный интервал выделения σ -фазы. Кремний способствует выделению σ -фазы, обогащенной этим элементом. Повышение содержания никеля уменьшает количество феррита и соответственно уменьшает максимальное содержание σ -фазы. Однако уменьшение содержания феррита способствует обогащению феррита хромом и молибденом, что усиливает выделение σ -фазы. Никель расширяет диапазон стабильности последней по направлению к более высоким температурам. В современных ДНС азот является чрезвычайно важ-



ным легирующим элементом. Он препятствует образованию интерметаллидных соединений таких, как, например, σ -фаза. Предполагается также, что частичное замещение никеля азотом должно уменьшить скорость ее выделения, хотя необходимо учитывать повышенный риск образования нитридов.

Влияние деформации. Формирование зародышей интерметаллидных фаз происходит быстрее в деформированном металле (например, в горячекатаном или деформированном в холодном состоянии материале). Это связано с более высокой плотностью дислокаций, что обеспечивает наличие центров зародышеобразования, а также присутствие более коротких траекторий диффузии.

Эффективность межфазных границ в качестве центров зародышеобразования зависит от их когерентности. МШ на ДНС обычно затвердевает полностью как феррит с незначительной ликвацией, возникающей во время затвердевания. После этого формируются аустенит в твердом состоянии с ориентацией Курдюмова–Закса относительно феррита, способствуя формированию низкоэнергетических границ ферритных и аустенитных зерен. Однако эта зависимость ориентаций не так часто встречается в МШ со смешанным аустенитно-ферритным затвердеванием. Формируются высокоэнергетические границы со значительной ликвацией в процессе смешанного затвердевания. Следовательно, если феррит в некоторых участках высоколегированный, процессы зародышеобразования и выделения фаз протекают быстрее.

Интерметаллидные выделения, оставшиеся после несоответствующей термообработки или недостаточной обработки для растворения компонентов в твердом растворе, оказывают определяющий эффект на скорость образования фаз из-за сокращения стадии зародышеобразования. Следовательно, отжиг должен выполняться при достаточно высокой температуре во избежание выделения и растворения всех интерметаллидных фаз. Во время отжига при температурах выше 1100 °С все интерметаллидные фазы легко растворяются в большинстве ДНС. Отжиг менее легированных сплавов может выполняться при более низких температурах, высоколегированных СДНС — при более высоких. МШ должен быть обработан на твердый раствор при более высокой температуре, чем это необходимо для соответствующей марки стали, поскольку никель способствует расширению диапазона стабильности σ -фазы до более высоких температур. Наличие карбидов или нитридов также может способствовать зародышеобразованию.

Влияние термического цикла сварки. Формирование интерметаллидных фаз происходит быстрее при нагреве, чем при охлаждении, что препятствует выделению фаз на термокинетических диаграммах по сравнению с диаграммами изотермического превращения аустенита. Это связано с тем, что движущая сила зародышеобразования выше при более низких температурах в отличие от диффузии, протекающей быстрее при более высоких температурах. В результате процесс зародышеобразования протекает быстро при нагреве, а затем следует быстрый рост на второй стадии

при высоких температурах. Условия выделения фаз менее благоприятны при охлаждении (когда температурный интервал наиболее быстрого роста достигается раньше, чем температурный интервал наиболее быстрого зародышеобразования), или при изотермической обработке, когда процессы зародышеобразования и роста протекают при одинаковой температуре.

σ -Фаза в зависимости от химического состава стали стабильна в температурном интервале 600...1100 °С, в котором феррит отличается термодинамической метастабильностью и имеет склонность к распаду на смесь аустенита и σ -фазы. Благоприятным является тот факт, что σ -фаза формируется медленно из-за своих больших тетрагональных элементарных ячеек, состоящих из 32 атомов. Границы ферритных и аустенитных зерен представляют собой типичные центры зародышеобразования. Карбиды, находящиеся на межзеренных границах, являются причиной обеднения хромом ферритной матрицы и превращения феррита в аустенит, который локально обогащает феррит хромом и молибденом и способствует зарождению σ -фазы. Последняя также легко зарождается на стыке трех зерен.

Свойства металла. Выделение интерметаллидных фаз также оказывает неблагоприятное влияние на механические свойства основного металла и МШ. Основной проблемой, в частности, для аттестации операций сварки, является негативное влияние интерметаллидных фаз на ударную вязкость и стойкость к питтинговой коррозии. Очевидно, что потенциальный риск потери коррозионной стойкости и ударной вязкости должен фиксироваться, особенно для случаев СДНС, предназначенных для более ответственного применения. Пока недостаточно ясно как соотносить результаты, полученные при непродолжительных испытаниях в очень агрессивной среде, с поведением в процессе длительной эксплуатации в менее агрессивной.

Ударная вязкость. Выделение интерметаллидных фаз оказывает негативное влияние на ударную вязкость ДНС после выдержки в температурном интервале 600...1100 °С. Для основного металла и МШ выведена четкая корреляционная зависимость между кривыми ВТВ и ударной вязкости. Эта зависимость хорошо соответствует резкому понижению ударной вязкости при увеличении содержания интерметаллидных фаз (рис. 4). Даже содержание 1 % интерметаллидной фазы влияет на ударную вязкость, чрезвычайно же хрупким материал становится, когда ее содержание достигает 10 %.

Коррозионная стойкость. Интерметаллидные выделения снижают стойкость ДНС и МШ к питтинговой и щелевой коррозии (рис. 5). Из-за большого количества в них хрома и молибдена они отличаются стойкостью к общей коррозии в различных агрессивных средах. Негативный эффект от интерметаллидных выделений связан с обеднением матрицы легирующими элементами (аналогично тому, что происходит при формировании карбидов и нитридов). В результате преимущес-

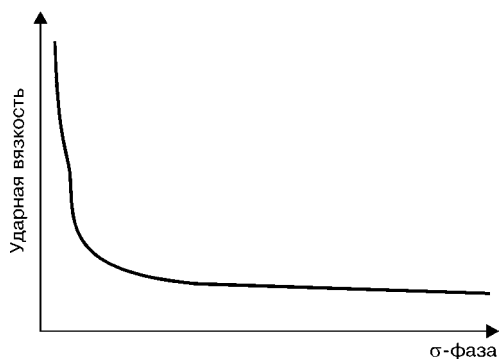


Рис. 4. Влияние интерметаллидной фазы на ударную вязкость

твенно корродирует бедный хромом и молибденом аустенит, формирующийся вблизи уже выделившихся фаз. Полагают, что стойкость к питтинговой коррозии в большей степени зависит от максимального размера интерметаллидных частиц, чем от их объемного содержания. Результаты коррозионных испытаний образцов, подверженных изотермической обработке, показали, что фазы, выделившиеся при более низкой температуре, оказывают больший отрицательный эффект, чем те, которые выделились при высоких температурах.

Фазы, выделившиеся в процессе сварки. Выделение интерметаллидных фаз в МШ и металле ЗТВ происходит немного быстрее по сравнению со временем, прогнозированным с помощью кривых изотермического старения, по двум причинам:

сварка создает значительное напряжение, усиливающее выделение;

выделение интерметаллидных фаз происходит быстрее при нагреве, чем при охлаждении или изотермической обработке.

Однако эти два эффекта оказывают довольно незначительное влияние на МШ и металл ЗТВ ДНС. Между МШ и основным металлом существует определенная разница в распределении легирующих элементов между аустенитом и ферритом, при этом в МШ это различие больше. Наиболее важным фактором является используемая технология сварки, которая должна предотвратить слишком быстрое охлаждение или чрезмерный многократный нагрев.

МШ обычно содержит большее количество никеля, чем основной металл, что способствует формированию достаточного количества аустенита. Поэтому важно обеспечить затвердевание МШ полностью по ферритному типу. Введение азота в ДНС улучшает их свариваемость путем увеличения содержания аустенита в металле ЗТВ, таким образом сварка с меньшими значениями погонной энергии обеспечивает снижение риска выделение.

Общее время выдержки МШ и металла ЗТВ в критическом температурном интервале при одной или многопроходной сварке определяется значением погонной энергии, количеством проходов, температурой перед наложением последующего слоя, толщиной и геометрией сварного соединения. Наиболее критическими являются зоны повторного (множественного) нагрева до максимальной температуры, которая достигает верхнего предела температуры стабильности интерметаллидных фаз.

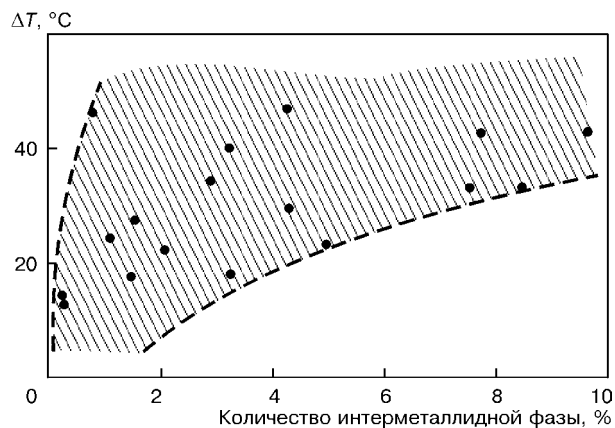


Рис. 5. Влияние количества интерметаллидной фазы на коррозионную стойкость (ΔT — снижение критической температуры питтингообразования)

Время выдержки в диапазонах выделения интерметаллидных выделений суммируется, что часто приводит к снижению коррозионной стойкости в многопроходных швах.

Обычно время выдержки в критическом диапазоне температур относительно короткое. Поэтому при сварке обычных ДНС отсутствует риск выделения интерметаллидных фаз, если не превышаются рекомендованные значения погонной энергии и температуры перед наложением последующего слоя. Однако сварка СДНС при некоторых условиях может оказаться более сложной для выполнения. Такие условия могут возникнуть при сварке труб из СДНС с тонкими стенками или малого диаметра.

Сертификация сварочных операций. Информацию, касающуюся проблемы выделения интерметаллидных фаз на этапах сертификации и применения сварочных технологий, можно найти в литературе редко. Имеется информация об их выделении в процессе сварки ДНС с 25 % Cr и СДНС. Иногда такие проблемы также возникают при сварке сталей с 22 % Cr. Можно легко обнаружить участки сварных соединений, выполненных с несоблюдением требований к сварке МИГ или с несоответствующей микроструктурой, что является результатом неправильно разработанных сварочных технологий, в которых используется чрезмерно высокая погонная энергия. Эти проблемы возникают преимущественно при сварке тонко- (менее 5 мм) и толстостенных (более 20 мм) сварных соединений. В случае сварки тонкостенных труб наиболее критической зоной является металл ЗТВ, толстостенных — МШ.

Наиболее часто негативные результаты сертификации сварочных технологий получают при определении твердости, ударных и коррозионных испытаний, металлографических исследованиях, что происходит вследствие выделения интерметаллидных фаз. Однако необходимо отметить, что во многих случаях требования к коррозионной стойкости и ударной вязкости не учитывают влияние выделившихся фаз, обнаруженных с помощью металлографических исследований.

Заключение. Следует отметить, что сварка может способствовать выделению интерметаллидных



фаз в металле ЗТВ и МШ ДНС. Их выделение в процессе сварки СДНС практически нельзя избежать. Интерметаллидные фазы могут в значительной степени снижать коррозионную стойкость и ударную вязкость, препятствуя выполнению требований технологии сварки, однако во многих случаях допускается их небольшое количество.

Присутствие интерметаллидных фаз — лишь один из факторов, влияющих на свойства сварных соединений. Существует и ряд других, а именно: тип и состояние поставки основного металла, технология сварки, окисление поверхности и термообработка после сварки.

Сварка ДНС 2205 или ДНС с пониженным содержанием легирующих элементов без превышения рекомендованных значений погонной энергии и температуры перед наложением после-

дующего слоя фактически уменьшает риск выделения интерметаллидных фаз. При сварке ДНС с 25 % Сг также можно избежать их выделения, но необходимо особенно четко соблюдать требования технологии сварки. Повторные температурные циклы в процессе многопроходной сварки могут вызвать усиление эффекта выделения интерметаллидных фаз. В частности, критическими участками являются корневые валики при многопроходной сварке и металл ЗТВ в сварных соединениях труб с тонкими стенками или малого диаметра.

Состояние поставки основного металла имеет большое значение, поскольку остаточные интерметаллидные фазы, сформировавшиеся в процессе несоответствующей термообработки, оказывают существенное влияние на выделение вторичных фаз.

Composition, structure, metallurgical properties of advanced duplex stainless steels are considered. The effect of alloying elements, phase composition of steels, and also a thermal cycle of welding on mechanical properties and corrosion resistance of different regions of welded joints from duplex steels is shown.

Поступила в редакцию 19.05.2003



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА И ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Академик РАН **К. В. ФРОЛОВ**, чл.-кор. РАН **Н. А. МАХУТОВ**, **М. М. ГАДЕНИН**, канд. техн. наук
(Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва, РФ)

Изложены основы методов и систем определения характеристик прочности, ресурса, живучести и безопасности сложных технических систем при комбинированном воздействии эксплуатационных поражающих факторов. При построении систем анализа и мониторинга штатных и аварийных ситуаций предложено учитывать конструктивные, технологические и эксплуатационные параметры форм, размеров, материалов, способов изготовления, контроля и режимов работы несущих элементов высокорисковых объектов. Важен также учет влияния широкого использования сварки при создании этих объектов.

Ключевые слова: технические системы, прочность, ресурс, живучесть, поражающие факторы, системы анализа, мониторинг, обобщенные модели

Целью развития исследований методов и систем по определению прочности, ресурса и живучести является создание основ теории катастроф и рисков в техногенной сфере, новых принципов, технологий и технических комплексов, образующих системы штатной и оперативной диагностики и мониторинга нормальных, аварийных и катастрофических ситуаций с наиболее тяжелыми последствиями [1–32]. Эти ситуации в рамках сложившихся нормативных подходов и методов, как правило, оставались наименее исследованными с научной и прикладной точек зрения в силу своей сложности, малой предсказуемости и повторяемости [1–5].

Решение поставленной задачи включает создание обобщенных математических и физических моделей сложных технологических, рабочих и аварийных процессов в технических системах для анализа условий перехода от штатных состояний к условиям возникновения и развития аварий и катастроф. Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей глобальные, локальные и объектовые аспекты безопасности. Разработки имеют междисциплинарный характер и лежат в основе нормирования безопасности и рисков. Принципиально важное значение при этом имеет то обстоятельство, что инициирование аварий и катастроф часто связывается с зонами сварки и наплавов.

Фундаментальные и основополагающие разработки по теории катастроф и безопасности, научным основам техники и технологий, развитию методов экспериментальной механики машин и конструкций предназначены для использования при анализе возникновения и развития аварийных ситуаций. Они получили свое отражение в опубликованных статьях и докладах журнала «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях» и в ряде томов серии «Безопасность России» [1, 2, 7, 10, 11].

Теория, техника и технологии предупреждения и предотвращения аварий и катастроф наряду с моделированием включают анализ новых предельных состояний при наиболее сложных сценариях развития аварийных ситуаций с учетом первичных и вторичных факторов повреждений в основном металле, металле швов и наплавов, развитие методов и создание систем оперативной диагностики аварийных ситуаций и поврежденных состояний технических систем в случае возникновения техногенных и природных аварий и катастроф, имеющих глобальный, национальный, региональный, местный и объектовый характер.

Если учесть, что потери от крупных аварий и катастроф [1–4, 7–12] постоянно возрастают, то априори можно предположить, что фактически в отечественной и международной практике пока отсутствуют как общепринятые методы анализа, расчетов и моделирования аварий и катастроф, так и нормативная количественная база для обеспечения живучести и безопасности при комбинированных воздействиях поражающих факторов. Это обстоятельство можно объяснить тем, что в целом усложнение создаваемых технических объектов и условий их работы шло существенно быстрее, чем исследование и нормирование их работоспособности. При этом государственные, межведомственные и ведомственные экспертизы крупнейших аварий и катастроф зачастую обнаруживали несоответствие их тяжести, причин, условий и характеристик реально существующей нормативной основе проектирования, изготовления и эксплуатации сложных и потенциально опасных технических систем.

Основы поэтапного анализа прочности и безопасности. Формирование направлений развития нормирования, определяющего работоспособность и безопасность сложных технических систем (СТС), шло по линии уточнения и усложнения применяемых методов и критериев [5, 6, 13–32]. При этом сами аварии и катастрофы служили исходной информационной базой (как элементом обратной связи) для такого развития нормативных материалов.

В целом при традиционном решении проблемы безопасности используют три подхода (рис. 1):

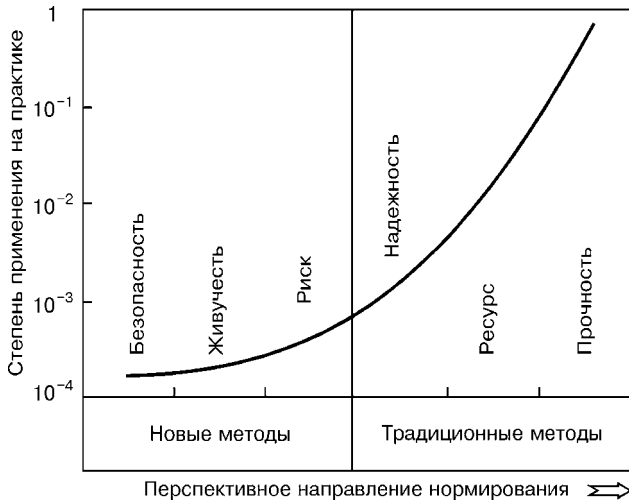


Рис. 1. Структура и развитие методов нормирования

- с позиций прочности (в ее многокритериальном выражении через напряжения σ);
- с позиций ресурса (во временной τ и цикловой N постановках);
- с позиций надежности (в многофакторном вероятностном P представлении).

В большинстве случаев техногенные аварии и катастрофы сопровождались разрушениями несущих элементов потенциально опасных объектов (независимо от причин и источников такого разрушения). Это привело к тому, что наиболее сложившейся на протяжении десятилетий и столетий стала практика первоочередного обоснования прочности создаваемых объектов. Традиционные методы обоснования прочности базировались на комплексе ставших стандартными характеристик и критериев разрушения ($\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{-1}, \sigma_{д.п}$). На основе параметров прочности и разрушения сформированы представления о запасах прочности ($n_\sigma, n_N,$

n_τ), вошедшие в справочную, учебную и нормативную литературу. На сегодня сложилась целая система критериев и запасов прочности, гарантирующая неразрушение объектов при соблюдении заданных условий эксплуатации. Для сварных конструкций в этих расчетах учитывали особенности напряженно-деформированных состояний, критериев прочности и ресурса в потенциально опасных зонах сварки. Однако в этих традиционных структурах и нормативных материалах часто не содержались прямые данные, количественно определяющие ресурс и живучесть СТС. В последние десятилетия этот пробел был восполнен, и в сферу традиционного анализа работоспособности объектов вошли теория и критерии ресурса и надежности, а потом живучести и безопасности [1–6, 13–32].

Более ориентированными на количественное решение проблемы безопасности сложных объектов, создающих крупные аварии и катастрофы, являются новые методы и критерии следующих групп:

- риск (в вероятностно-экономической постановке);
- живучесть (способность и устойчивость функционирования при возникновении недопустимых нормами повреждений на различных стадиях развития аварий и катастроф);
- безопасность (с учетом критериев и характеристик аварий и катастроф).

Вместе с тем объем и степень оценки нормирования и расчета новых характеристик безопасности в реальной инженерной практике для крупных аварий, национальных и глобальных катастроф даже в последнее время остаются чрезвычайно малыми — менее 0,1 % (рис. 2). Особенно это характерно для уникальных военных и гражданских объектов, изготавливаемых с применением различных технологий сварки и наплавки. Таким образом, задача сводится к перспективному изменению направления развития нормирования (рис. 1) — от основополагающего анализа безопасности, живучести и риска к традиционному определению надежности, ресурса и прочности.

Создание методов и систем определения базовых параметров по всей цепочке «прочность — безопасность» должно выстраиваться применительно к следующей приоритетности анализа аварийных и катастрофических ситуаций в техногенной сфере (по степени и возможности их реализации):

- гипотетические, которые могут возникать при непредсказуемых заранее вариантах и сценариях развития с максимально возможными ущербами и жертвами (защищенность от них низкая и прямому восстановлению объекты не подлежат, возможности аварийной диагностики и мониторинга сводятся к определению предвестников этих ситуаций и срабатыванию систем аварийного оповещения);
- запроектные, возникающие при необратимых повреждениях ответственных

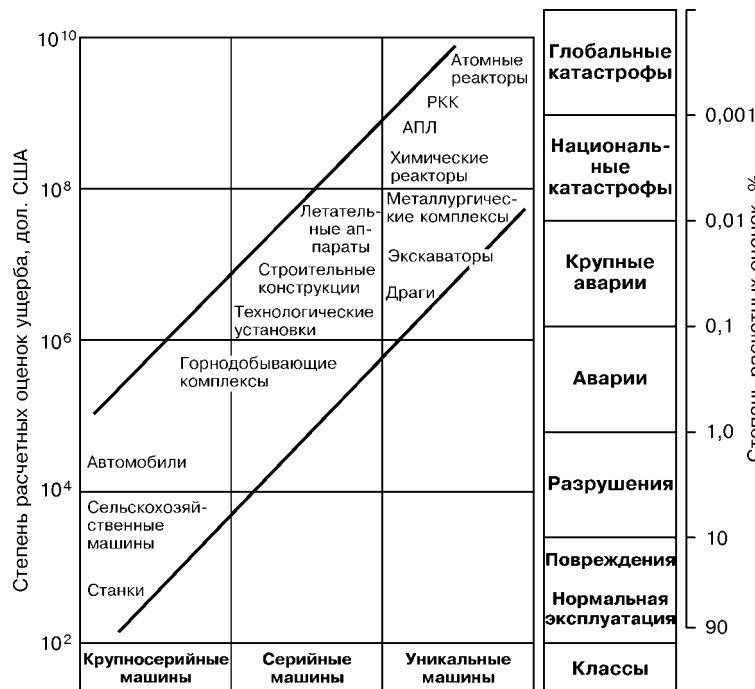


Рис. 2. Распределение экономических потерь от необеспеченности надежности и безопасности различных типов машин



элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами (степень защищенности от них недостаточная, необходимость проведения в последующем восстановительных работ, возможность аварийной диагностики и мониторинга в дополнение к гипотетическим прогнозам должны предусматривать включение систем автоматизированной защиты);

— проектные, возникающие при выходе за пределы штатных режимов с предсказуемыми и приемлемыми последствиями (защищенность от них достаточная, должны комбинированно взаимодействовать штатные и аварийные системы диагностики, мониторинга и защиты);

— режимные, возникающие при штатном функционировании потенциально опасных объектов (последствия от них предсказуемые, защищенность от них высокая, преимущественное значение при этом имеют штатные системы диагностики и мониторинга).

Приведенная в работе [12] номенклатура классов аварий и катастроф, типов аварийных и катастрофических ситуаций и уровней потенциальной опасности СТС указывает на большую научную и практическую необходимость их обоснованного ранжирования для решения проблем снижения рисков аварий и катастроф в природно-техногенной сфере.

Формирование общих принципов и требований к анализу прочности и безопасности. Определение прочности, ресурса и живучести в теории, технике и технологиях предупреждения и предотвращения аварий и катастроф наряду с моделированием включает анализ предельных состояний при наиболее сложных сценариях развития аварийных ситуаций с учетом первичных и вторичных факторов повреждений, развитие методов и создание систем оперативной диагностики аварийных ситуаций и поврежденных состояний, в том числе со сварными элементами конструкций. При этом для техногенной сферы факторами, инициирующими аварии и катастрофы, могут быть природные опасности, техногенные угрозы и все возрастающая роль человеческого фактора.

Научное направление фундаментальных и прикладных исследований по проблемам определения и повышения прочности, ресурса, живучести и безопасности машин с учетом сложных эффектов нелинейности сформировалось [1, 5, 12, 13] в последние годы на базе многочисленных научно-исследовательских работ, выполненных на протяжении многих десятилетий [5, 12–32].

Существенная роль в развитии исследований по нелинейной механике деформирования и разрушения (рис. 3) как научной основы обоснования исходной прочности, ресурса, живучести и безопасности принадлежит постоянно взаимодейству-



Рис. 3. Этапы развития исследований по прочности и безопасности

ющим научным центрам и школам — академическим, отраслевым, вузовским [13–32]. В значительной степени основные разработки относились к первой стадии жизненного цикла объектов — стадии проектирования, учитывающего технологическую наследственность и условия эксплуатации.

На первых этапах решение линейных задач теории упругости, теории колебаний, теории пластин и оболочек сводилось к определению статических и динамических номинальных и локальных напряжений σ^3 от эксплуатационных нагрузок P^3 . В качестве критериальных параметров исходной деформативности и прочности конструкционных материалов использовали модуль упругости E , пределы текучести σ_T и прочности σ_B

$$\sigma^j = f(P^j) \leq \left[\frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{\sigma_B}{n_B} \right], \quad (1)$$

где n_T, n_B — соответствующие коэффициенты запаса.

С учетом того, что сварные соединения в несущих элементах создавали с учетом их равнопрочности с элементами из основного металла, прямого отражения особенности сварки в уравнении



(1) не находили. Данное уравнение используется при создании автомобилей, сельскохозяйственной техники, энергетического и технологического оборудования, объектов строительных конструкций широкого применения.

В военные и первые послевоенные годы были поставлены исследования по усталости и долговечности. К основным параметрам эксплуатационной нагруженности были отнесены напряжения σ^y и количество циклов нагружения N^y . В дополнение к уравнению (1) сформулированы условия исходной циклической прочности

$$\sigma_a^{y'} = f(P^y, N^y) \leq \left\{ \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma (K_\sigma \sigma_a^{y'}) \epsilon_\sigma + \psi_\sigma \sigma_m^{y'}} \right\}, \quad (2)$$

где $\sigma_a^{y'}$, $\sigma_m^{y'}$ — амплитуда и среднее напряжение цикла; σ_{-1} — предел выносливости конструкционного материала; K_σ , ϵ_σ , ψ_σ — характеристики чувствительности материала соответственно к концентрации напряжений, абсолютным размерам и асимметрии цикла.

Для сварных соединений в расчет вводили значения σ_{-1} для различных зон сварки, а остаточные напряжения от сварки изменяли значение средних напряжений $\sigma_m^{y'}$. По уравнениям (1) и (2) рассчитывали прочность и долговечность несущих узлов в авиации, на транспорте, в гидроэнергетике. Для анализа местных напряжений были развиты методы фотоупругости и тензометрии.

Освоение районов Сибири и Севера, а также создание объектов криогенной техники в 1950–1960 гг. выдвинуло задачу об исследовании низкотемпературной прочности с определением характеристик хладноломкости. В анализ исходной прочности дополнительно были введены характеристики низкотемпературного локального сопротивления отрыву S_K

$$\sigma_a^{y'} = f(P^y, t^y) \leq \left\{ \frac{S_K}{n_s K_\sigma} \right\}, \quad (3)$$

где K_σ — коэффициент концентрации напряжений с учетом перераспределения напряжений за счет местных пластических деформаций.

Важное значение имело изучение локальных структурных физико-механических процессов формирования микродеформаций и микроповреждений в материале с использованием методов рентгенографии и микроскопии.

Для интенсивно развивавшихся в 1960-е г. отраслей авиационного, энергетического и нефтехимического машиностроения были поставлены систематические исследования по малоцикловой усталости. Создание в зонах действия концентрации и температурных напряжений областей неупругого циклического деформирования потребовало перехода от расчетов в локальных напряжениях к расчетам в локальных деформациях

$$\left\{ \sigma^y, e^y, N^y \right\} = f(P^y, N^y, t^y, m) \leq \left\{ \left[\left(\frac{\sigma_k}{n_\sigma} \right) \left(\frac{e_k}{n_e} \right) \left(\frac{N_k}{n_N} \right) \right] f(\sigma_\tau, \sigma_b, \psi_k, m_p, m_e) \right\}, \quad (4)$$

где σ_k , e_k , N_k — критические напряжения, деформации и количество циклов ($\sigma_k = S_K$, $e_k = 1/(1 - \psi_k)$); m — характеристика упрочнения в упругопластической области; ψ_k — сужение при однократном разрушении; m_p , m_e — характеристики кривой малоциклового разрушения.

Для зон сварки и наплавов в расчет вводили локальные характеристики прочности σ_τ , σ_b и пластичности ψ_k . Остаточные напряжения от сварки и наплавки в сочетании с разнородностью механических свойств швов создавали объемные напряженные состояния, изменяя пластичность в зоне разрушения и приводя к эффекту контактного упрочнения. Для определения σ^y , e^y были развиты методы фотоупругих наклеек, муара, малобазных сеток и малобазной тензометрии.

Применительно к новым задачам ракетно-космической техники, стартовых комплексов, сверхзвуковой авиации, теплоэнергетики, нефтехимии, металлургии были поставлены исследования по ползучести, высокотемпературной кратковременной, длительной и циклической (до 500... 3000 °C) прочности, в том числе при программных и двухчастотных режимах нагружения. К уравнениям (1), (2) и (4) при расчетах деталей машин были добавлены уравнения исходной длительной (по времени эксплуатации τ^y) прочности $\sigma_{д.п}^\tau$

$$\left\{ \sigma^y, e^y, \tau^y, N^y \right\} = f(P^y, \tau^y, N^y, t^y) \leq \left\{ \left[\left(\frac{\sigma_{д.п}^\tau}{n_\sigma} \right) \left(\frac{e_k^\tau}{n_e} \right) \left(\frac{\tau_k}{n_\tau} \right) \left(\frac{N_k}{n_N} \right) \right] f(m_\tau) \right\}, \quad (5)$$

где n_τ — запас по времени τ ; m_τ — характеристика кривой длительной прочности.

Для зон сварки и наплавов предполагали, что высокие температуры создают релаксацию остаточных напряжений и изменяют локальные механические свойства. Измерения локальных напряжений и деформаций выполняли высокотемпературными методами тензометрии и муара на различных технических объектах.

Развитие и обобщение большого цикла работ по прочности и долговечности в 1960–1970-е гг. привело к формированию одного из важных разделов проектирования, изготовления и эксплуатации машин — обеспечению их надежности и ресурса. Это в первую очередь относилось к изделиям авиационного и общего машиностроения, работающим при переменных режимах термоциклического нагружения. В расчет по кривым усталости $\sigma - N$ уравнений (1) и (2) вводятся коэффициенты вариации эксплуатационной нагруженности v_σ , пределов выносливости v_{σ_a} , а также конструкторско-технологических факторов (K_σ , ϵ_σ , ψ_σ). Эти подходы в дальнейшем были распространены и на исходную малоцикловую усталость.



В конце 1960 — начале 1970-х гг. большое внимание уделялось развитию линейной и нелинейной механики статического, циклического и динамического разрушения. При этом расчеты трещиностойкости машиц стали базироваться на местных напряжениях σ^y и деформациях e^y , на учете размеров дефектов l^y , коэффициентов интенсивности напряжений K_I и деформаций K_{Ie} , температурных условий нагружения t^y

$$\{\sigma^y, e^y, K_I^y, K_{Ie}^y\} = f(P^y, t^y, l^y) \leq \left\{ \frac{\sigma_k}{n_\sigma}, \frac{e_k}{n_e}, \frac{K_{Ic}}{n_k}, \frac{K_{Iec}}{n_{ke}} \right\}, \quad (6)$$

где n_k, n_{ke} — запасы по коэффициентам интенсивности напряжений и деформаций.

Уравнение (6) получило нормативное применение в расчетах исходной прочности атомных реакторов, сосудов давления, трубопроводов. При этом для сварных соединений и наплавов характеристики σ_k, e_k, K_{Ic} и K_{Ie} определяли на специальных образцах, исходные трещины в которых размещались в швах и переходных зонах. При этом трещины создавали существенное перераспределение остаточных напряжений и изменение коэффициентов интенсивности K_I . Особый интерес в экспериментальной механике для сварных соединений конструкций имело физическое моделирование полей активных и остаточных напряжений в вершине развивающихся трещин (методами фотоупругости, голографии, тензометрии, рентгенографии).

На базе ранее выполненных комплексных исследований с учетом новых задач в области авиационной техники, ракетостроения, атомной и термоядерной энергетики получили развитие методы анализа исходной прочности, ресурса в характеристиках трещиностойкости и живучести машин с учетом повреждений технологического и эксплуатационного происхождения. В последнем случае речь шла и об остаточных прочности и ресурсе.

К уравнениям (1)–(6) были добавлены уравнения для оценки исходного и остаточного ресурса с учетом длительного статического и циклического развития трещин в несущих конструкциях

$$\{\sigma^y, e^y, K_{Ie}^y, N^y, \tau^y, t^y\} = f(P^y, t^y, l^y) \leq \left\{ \frac{\sigma_k}{n_\sigma}, \frac{e_k}{n_e}, \frac{N_k}{n_N}, \frac{\tau_k}{n_\tau}, \frac{t_k}{n_t}, \frac{l_k}{n_l} \right\}, \quad (7)$$

где n_N, n_τ, n_t, n_l — соответственно запасы по количеству циклов, времени, температурам и размерам трещин.

Расчетные характеристики N_k и τ_k определяются путем интегрирования кинетических диаграмм разрушения

$$\{N_k, \tau_k\} = F \left\{ (\Delta K_{I1}^y, \Delta K_{Ie}^y), \left(\frac{dl^y}{dN}, \frac{dl^y}{d\tau} \right) \right\}, \quad (8)$$

где $\Delta K_{I1}^y, \Delta K_{Ie}^y$ — размахи коэффициентов интенсивности напряжений и деформаций.

Для анализа процессов повреждения в основном металле и сварных соединениях были использо-

ваны методы импульсной голографии, термовидения, тензочувствительных покрытий, рентгенографии, микроструктурного анализа, виброметрии.

Результаты исследований, подтверждающие обоснованность уравнений (1)–(8), отражены в соответствующих фундаментальных работах [5, 13–32].

В последнее десятилетие поставлены и начаты исследования живучести и безопасности машин и по механике катастроф. Применительно к потенциально опасным объектам с учетом комплексов повреждающих факторов эти разработки включают расчетно-экспериментальные исследования по всем перечисленным выше направлениям с применением аналитических, численных и экспериментальных методов анализа напряженно-деформированных и предельных состояний для установления исходных и остаточных параметров работоспособности. Актуальность проблемы определения остаточной прочности и ресурса, а также проблем продления ресурса стала очевидной для наиболее сложных и потенциально опасных объектов атомной и тепловой энергетики, ракетно-космической и авиационной техники, объектов нефтегазового комплекса, транспортных систем. Их особенность состоит в сложности, а в ряде случаев невозможности замещения новыми объектами с исходными параметрами прочности и ресурса. Наличие зон сварки и наплавов при этом чрезвычайно усложняет уточненную оценку прочности, ресурса и живучести за счет нелинейного перераспределения в них локальных напряжений и деформаций и изменения локальных механических свойств в процессе эксплуатации.

Из данных рис. 1–3 следует, что по мере усложнения объектов повышенного риска в основу технологий предупреждения и предотвращения аварий и катастроф должны быть положены комплексные методы обоснования, поддержания и повышения прочности, ресурса, живучести и в конечном счете безопасности несущих элементов конструкций.

Развитие методов экспериментальной механики для оценки прочности, ресурса и живучести. Основными задачами разработок по определению и обоснованию исходной и остаточной прочности, ресурса, живучести и безопасности технических систем являются [1]:

— фундаментальные исследования по механике деформирования и механике катастроф, лежащие в основе создания критериев и методов решения межотраслевых проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности СТС с повышенной потенциальной опасностью возникновения техногенных аварийных ситуаций;

— прикладные исследования и разработки инженерных методик, алгоритмов, программ, моделей, стендов, аппаратуры для расчетно-экспериментального обоснования конструкторско-технологических решений при проектировании, создании, эксплуатации и выводе из эксплуатации действующих и принципиально новых высокорисковых машин и конструкций с применением комплексных критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности в первую очередь для наиболее нагру-



женных зон (концентрация напряжений, сварные швы, наплавки).

На рис. 4 показана комплексная блок-схема решения проблем предотвращения аварий и катастроф на базе формирования принципов и требований по прочности, ресурсу и безопасности таких потенциально опасных объектов, как атомные электростанции (АЭС), ракетно-космические комплексы (РКК), летательные аппараты (ЛА), атомные подводные лодки (АПЛ), теплоэлектростанции (ТЭС), химические производства (ХП). Эти проблемы охватывают все стадии жизненного цикла объектов: проектирование, изготовление, испытания и эксплуатацию (с вводом и выводом из нее), все типы аварийных ситуаций и поражающих факторов.

Проектирование включает разработку и согласование технического задания (ТЗ) с введением базовых требований по исходной прочности, ресурсу и безопасности. Разработка проекта состоит из ряда стадий (принципиальные схемы, предэскизный, технический и рабочий проекты). На этой стадии разрабатываются физические и математические модели с применением вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования (САПР). На стадии проектирования на основании нормативных и дополнительных расчетов проводится анализ прочности и обосновывается исходный ресурс. Основными критериями и характеристиками таких расчетов являются: эксплуатационные нагрузки P , температура t , количество

циклов N , частота f , характеристики сопротивления материалов $R(\sigma_t, \sigma_b, \sigma_{д.п})$, деформации e , дефекты l . В качестве допустимых с использованием уравнений (1)–(8) обосновываются значения $[N]$, $[P]$, $[l]$ с заданными коэффициентами запасов n . По комплексу расчетных и эксплуатационных исследований составляется заключение о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. Таким образом, на стадии проектирования закладываются основы предупреждения и предотвращения аварийных и катастрофических ситуаций.

На стадии подготовки к изготовлению решаются вопросы формирования требований, выбора, обоснования и применения технологий, материалов и контроля. Для изготовленных элементов, систем и объектов в целом устанавливаются исходные состояния в зонах и вне зон сварки: фактические механические свойства и их отклонения от технических требований, уровень реальной дефектности несущих узлов, геометрические формы и их отклонения. Уточненные данные контроля заносятся в паспорта и банки данных на ЭВМ. Все эти данные являются исходной информацией о характеристиках прочности $R_m(\sigma_b)$, $R_f(S_K)$, деформативности Δl (удлинении), ψ (сужении), деформациях e , температуре t , скорости роста трещин dl/dN (или $dl/d\tau$). На их основе проводится уточнение проектных параметров исходной прочности, долговечности, ресурса, живучести и безопасности. В соответствии с изложенным на стадии изготовления обеспечиваются основы предупреждения и предотвращения тяжелых аварий и катастроф для реальных объектов с учетом комплекса принятых конструктивно-технологических решений.

Стадия испытаний включает различные их виды и комбинации: автономное испытание (АИ) узлов, стендовые испытания узлов, агрегатов и изделий, огневые и имитационные испытания. Завершающими оказываются штатные испытания головных образцов с воспроизведением реальных эксплуатационных и экстремальных режимов. С использованием тех же критериев, что и для стадий проектирования и изготовления, проводится дополнительное уточнение допустимых предельных нагрузок $[P]$ и долговечности $[N]$. На этой основе составляется уточненное заключение об исходном ресурсе, методах последующего контроля и назначаются уточненные режимы эксплуатации.

Для стадии ввода в эксплуатацию осуществляются предпусковые и пусковые испытания (гидро-, пневмоиспытания, холодная и горячая обкатка), физический пуск (с корректировкой всех систем поддержания эксплуатации) и ввод в эксплуатацию. При этом назначается и уточняется система штатной диагностики

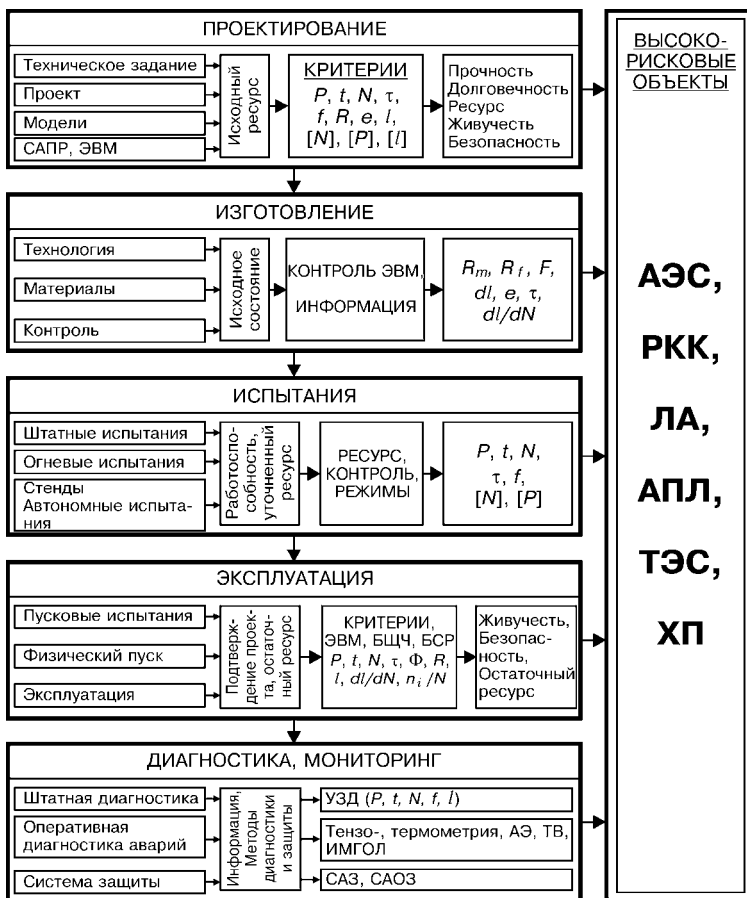


Рис. 4. Блок-схема анализа исходной и остаточной прочности, ресурса и безопасности машин и конструкций

основных параметров: нагрузок P , температур t , циклов N , частот f , дефектов l (с использованием преимущественно штатных систем ультразвуковой диагностики (УЗД)). Для объектов высокой потенциальной опасности разрабатываются, создаются и применяются методы и системы оперативной диагностики аварийных ситуаций — с использованием тензо- и термометрии, акустической эмиссии (АЭ), термовидения (ТВ), импульсной голографии (ИМГОЛ). Объем и уровень дефектоскопического контроля, как правило, резко увеличивается в зонах сварных соединений и наплавов. Получаемые при этом данные могут давать исходную информацию для включения систем автоматической защиты (САЗ) и систем автоматической оперативной защиты (САОЗ). По результатам исследований при вводе в эксплуатацию составляется заключение об уточненной исходной прочности и назначенном исходном ресурсе.

На начальной стадии эксплуатации должна быть получена важнейшая информация по подтверждению или корректировке проектных решений о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. По мере исчерпания уточненного проектного ресурса проводится оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Для согласования всей информации для всех стадий жизненного цикла объекта должны использоваться унифицированные критерии и компьютерные программы. При этом данные об исходном, использованном и остаточном ресурсе могут выводиться на блочные щиты управления (БЩУ) и бортовые счетчики ресурса (БСР) — n_i/N .

По мере исчерпания ресурса на повестку дня выходит проблема оценки живучести, продления ресурса, восстановления и повышения остаточной прочности. Применительно к стадии эксплуатации важным научно-техническим и экономическим вопросом становится вопрос о безопасном выводе объектов из эксплуатации (особенно в случаях накопленных остаточных радиоактивных излучений Φ , химических, рабочих и аварийных воздействий на объекты, персонал и окружающую среду).

Возможность предупреждения аварий и катастроф на высокорисковых объектах поддерживается определенным набором конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий с применением новых методов диагностики несущих элементов в штатных и аварийных условиях функционирования. В общем случае на основе уравнений (1)–(8) могут быть построены пространственные поверхности предельных и допустимых состояний (рис. 5). Координатными осями для этих поверхностей являются:

- ось показателей эксплуатационной нагруженности (усилий P , номинальных напряжений σ_n , коэффициентов интенсивности напряжений K_I , приведенных локальных максимальных напряжений $(\sigma_{пр})_{\max k}$ в зонах концентрации);
- ось температурно-временных и циклических параметров эксплуатации (температура t , время τ , количество циклов нагружения N);

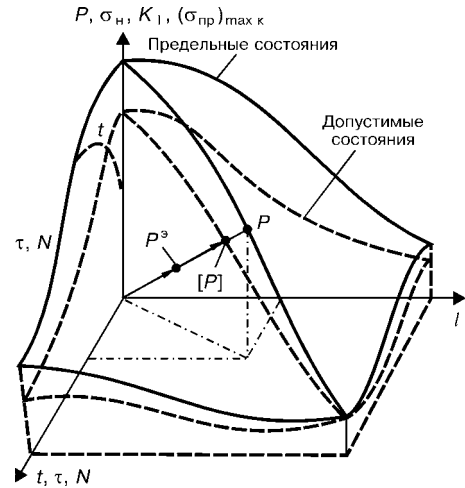


Рис. 5. Схема предельных и допустимых состояний при оценках прочности, ресурса и живучести

— ось состояния дефектности (размеры l дефектов с учетом их формы и пространственного расположения).

Образование разрушения, недопустимых пластических деформаций или трещин соответствует достижению предельного состояния (поверхности предельных состояний). Предельная нагрузка P в этом случае является вектором, проходящим через начало координат с углами, соответствующими данному состоянию конструкции (по $l, t, \tau, N, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k}$). Если ввести необходимые запасы n на основе соотношений (1)–(8), то от поверхности предельных состояний можно перейти к поверхности допустимых состояний и нагрузке $[P]$. На этой базе прочность, ресурс и живучесть можно считать обеспеченными, если вектор эксплуатационной нагрузки P^0 будет меньше или равен вектору допустимой нагрузки $[P]$ — $(P^0 \leq [P])$.

Классические (традиционные) методы расчета прочности и ресурса развивались в предположении бездефектного конструкционного материала ($l = 0$). В этом случае от предельных и допустимых поверхностей можно перейти к предельным и допустимым кривым (в плоскости « $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k} - t, \tau, N$ ») — статической (при заданной температуре t), длительной статической (по заданному времени τ) и циклической (по заданному количеству циклов N) прочности. Прочность и живучесть на первых этапах определяли по критериям линейной механики разрушения (статическая трещиностойкость) для плоскости « $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k} - l$ ».

Для современных расчетов прочности, ресурса и живучести с использованием предельных и допустимых состояний (рис. 5) становится важным принятие единых уравнений состояния, единых критериев разрушения и единых комплексов расчетных характеристик в уравнениях (1)–(8) независимо от типа конструкции, свойств конструкционных материалов и условий эксплуатационного нагружения. При этом наиболее перспективным является поэтапный переход от расчетов, учитывающих напряжения [5, 13–16] (что принято в большинстве нормативных документов), к расчетам, учитывающим деформацию [17–32].



При развитии и проведении комплексных расчетов на прочность, ресурс и живучесть в детерминированной постановке используют всю исходную информацию об усредненных характеристиках эксплуатационной нагруженности, о средних или гарантированных критериальных характеристиках сопротивления разрушению конструктивных материалов (основной металл, металл швов и наплавов), об усредненных характеристиках исходной дефектности, определяемой по нормам дефектоскопического контроля (преимущественно в местах сварки и наплавов).

Если для стадии проектирования или эксплуатации в расчеты вводят статистические характеристики (функции распределения и их параметры) нагруженности, механических свойств материалов и дефектности деталей, то представляется возможным определить вероятностные исходные характеристики прочности, ресурса и живучести, надежности, риска и безопасности конструкций.

Для уточненных оценок остаточной прочности, ресурса, живучести и безопасности базовые исходные уравнения должны учитывать изменяющиеся в процессе эксплуатации напряжения и предельные состояния с учетом их зависимости от условий эксплуатации — циклов, времени, температур, рабочих сред.

1. *Безопасность* России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. — М.: Знание, 1998. — Раздел 1. — 448 с.; Раздел 2. — 416 с.
2. *Научные основы обеспечения комплексной безопасности России* / Н. А. Махутов, В. И. Осипов, М. М. Гаденин и др. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — М.: ВИНТИ. — 2002. — Вып. 5. — С. 15–26.
3. *Воробьев Ю. Л.* Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций. — М.: Деловой экспресс, 2002. — 247 с.
4. *Безопасность* России. Безопасность промышленного комплекса. — М.: Знание, ГУП «НТЦ Промышленная безопасность», 2002. — 455 с.
5. *Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем* / Под ред. В. В. Москвичева, М. М. Гаденина. — Красноярск: Ассоциация КОДАС-СиБЭРА, 1997. — 520 с.
6. *Прочность, ресурс и безопасность машин и конструкций* / Под ред. Н. А. Махутова, М. М. Гаденина. — М.: ИМАШ РАН, 2000. — 527 с.
7. *Безопасность* России. Безопасность трубопроводного транспорта. — М.: Знание, 2002. — 752 с.
8. *Комплексная безопасность России* — исследования, управление, опыт. — М.: Информиздат, 2002. — 396 с.
9. *Безопасность* России. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. — М.: Знание, 1999. — 592 с.
10. *Безопасность* России. Экологическая диагностика. — М.: Машиностроение, 2000. — 496 с.
11. *Безопасность* России. Основополагающие государственные документы. — М.: Знание, 1998. — Ч. 1. — 512 с.; Ч. 2. — 496 с.
12. *Катастрофы* и общество. — М.: Контакт-культура, 2000. — 331 с.
13. *Серенсен С. В.* Избранные труды. — Киев: Наук. думка, 1985. — Т. 1. — 262 с.; — Т. 2. — 256 с.; — Т. 3. — 232 с.
14. *Малиновский Б. Н.* Академик Борис Патон: Труд на всю жизнь. — М.: ПЭР СЭ, 2002. — 271 с.
15. *Механическое* поведение материалов при различных видах нагружения / В. Т. Трощенко, А. А. Лебедев, В. А. Стрижало и др. — Киев: ИПП, 2000. — 569 с.
16. *Прочность* при малоцикловом нагружении. Основы методов расчетов и испытаний / С. В. Серенсен, Р. М. Шнейдерович, Н. А. Махутов и др. — М.: Наука, 1975. — 288 с.
17. *Поля* деформаций при малоцикловом нагружении / С. В. Серенсен, Р. М. Шнейдерович, Н. А. Махутов и др. — М.: Наука, 1979. — 278 с.
18. *Гусенков А. П.* Прочность при изотермическом и неизо-термическом малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1979. — 296 с.
19. *Уравнения* состояния при малоцикловом нагружении / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, Д. А. Гохфельд и др. — М.: Наука, 1981. — 245 с.
20. *Прочность* конструкций при малоцикловом нагружении / Н. А. Махутов, А. З. Воробьев, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1983. — 271 с.
21. *Механика* малоциклового разрушения / Н. А. Махутов, М. И. Бурак, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1986. — 264 с.
22. *Козаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
23. *Романов А. Н.* Разрушение при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
24. *Статистические* закономерности малоциклового разрушения / Н. А. Махутов, В. В. Зацаринный, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1989. — 253 с.
25. *Конструкции* и методы расчета водо-водяных энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, В. В. Стекольников, К. В. Фролов и др. — М.: Наука, 1987. — 232 с.
26. *Прочность* и ресурс водо-водяных энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1988. — 312 с.
27. *Экспериментальные* исследования деформаций и напряжений в водо-водяных энергетических реакторах / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, В. В. Стекольников и др. — М.: Наука, 1990. — 296 с.
28. *Конструирование* машин. Справочно-методическое пособие / Под ред. акад. К. В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1994. — Т. 1. — 528 с.; Т. 2. — 624 с.
29. *Проблемы* ресурса и безопасности энергетического оборудования / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, М. М. Гаденин и др. — М.: ФЦНТИ ПП «Безопасность» — ИМАШ РАН, 1999. — 286 с.
30. *Махутов Н. А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
31. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.
32. *Модельные* исследования и натурная тензометрия энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, Ю. Г. Драгунов и др. — М.: Наука, 2001. — 293 с.

Fundamentals and systems of determination of characteristics of strength, service life, survivability and safety of complex technical systems at a combined action of service damaging factors are described. When designing systems of analysis and monitoring of scheduled and emergency situations, it was suggested to take into account the design, technological and service parameters of shapes, sizes, materials, methods of manufacture and control and also conditions of operation of load-carrying elements of highly-hazardous objects. The wide application of welding in the creation of these objects should also be considered.

Поступила в редакцию 12.03.2003



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРАВИЛ РАСЧЕТА НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. Дж. МЭДДОКС (Британский ин-т сварки, г. Абингтон, Кембридж, Великобритания)

Действующие правила расчета усталости были пересмотрены в свете последних исследований и изменения потребностей промышленности. Полученные данные свидетельствуют о том, что в правила необходимо внести много изменений и расширить их рамки. Рассмотренные вопросы включают классификацию стыковых и крестообразных соединений, учитывают швы, выполненные недуговой сваркой, масштабный эффект, метод определения напряжения в горячей точке, а также методы расчета сложного комбинированного нагружения и кумулятивного повреждения.

Ключевые слова: расчет на усталость, кривая усталости $S-N$, сварные швы, электронный пучок, лазер, трение, эффект толщины, коррозионная усталость, напряжение в горячей точке, метод конечных элементов, напряжение сдвига, кумулятивное повреждение, сталь, нержавеющая сталь, алюминий

Правила расчета на усталость сварных конструкций [1, 2], используемые во всем мире, в достаточной мере согласованы. Они включают ряд кривых усталости $S-N$ (напряжение — долговечность), полученных в результате испытаний на выносливость реальных сварных элементов и выраженных в номинальных напряжениях S независимо от используемого значения коэффициента асимметрии цикла напряжений R . Эти кривые используются вместе с правилом Майнера для прогнозирования усталостной долговечности конструкций, подверженных случайным нагрузкам при эксплуатации. Продолжающиеся исследования и изменения приоритетов промышленности привели к улучшенному пониманию факторов, влияющих на усталостную долговечность сварных соединений.

В данном обзоре расчетные кривые усталости МИС [3] выбраны в качестве основных для сравнения с новыми результатами испытаний на выносливость, поскольку представлены в легкораспознаваемом формате и согласуются со многими другими расчетными кривыми $S-N$. Они имеют употребительную форму $S^m N = A$, где S — используемый размах напряжений; N — усталостная долговечность в циклах; A — постоянная; m — показатель наклона (обычно $m = 3$ или 5). Каждая из расчетных кривых усталости называется FAT x , где x — значение S (МПа) для базовой долговечности $N = 2 \cdot 10^6$ циклов. Далее для простоты предполагается, что все кривые усталости, подобранные по представленным данным, имеют тот же показатель наклона, что и соответствующие расчетные кривые.

Некоторые виды сварных швов, рассматриваемые в статье, могут содержать после сварки остаточные сжимающие напряжения (как и в конструктивных элементах). Между тем, большинство расчетных кривых усталости относится к более типичному состоянию сварных конструкций, ко-

торое характеризуется высокими растягивающими остаточными напряжениями, создающими условия эффективно высоких средних напряжений при циклической нагрузке. Однако поскольку остаточные растягивающие напряжения, возникающие при производстве или сборке, а также внешние нагрузки могут создавать условия появления высоких средних растягивающих напряжений, то, безусловно, есть смысл основывать расчет на результатах испытаний на усталость, полученных в условиях таких суммарных напряжений.

Классификация элементов. Поперечные стыковые швы, выполненные с обеих сторон. Недостаток базы данных, использованной при создании действующих расчетных кривых усталости для поперечных стыковых швов, заключался в том, что во внимание не принималась любая возможная несоосность в образцах для испытаний. Последующие исследования показали, что очень важно учитывать это отклонение, которое является, вероятно, основным источником широкого разброса в базе данных. Сейчас имеется широкая база данных для соединений с поперечным стыковым швом, оснащенных тензодатчиками для измерения любых прогибов вследствие несоосности [3], которая предлагает FAT 100. Она охватывает широкий диапазон геометрических размеров: от соосных соединений до соединений со смещением относительно оси почти на одну толщину пластины. Поэтому такая классификация может применяться к любым режимам или процессам дуговой сварки независимо от профиля шва. Это противоречит действующим правилам, которые, например, понижают в категории швы, выполненные сваркой под флюсом, или привязывают проектную классификацию к определенным профилям шва, что оказывается непрактичным для многих отраслей промышленности. Условие использования FAT 100 предполагает принятие допуска на любую несоосность (например, максимум, допускаемый производственным стандартом) при расчетах напряжения, испытываемого сварным соединением. При таком подходе изготовитель, применяя хорошую производственную практику для минимизации несоосности, может получить преимущества промышленного применения в смысле более высоких допустимых напряжений.

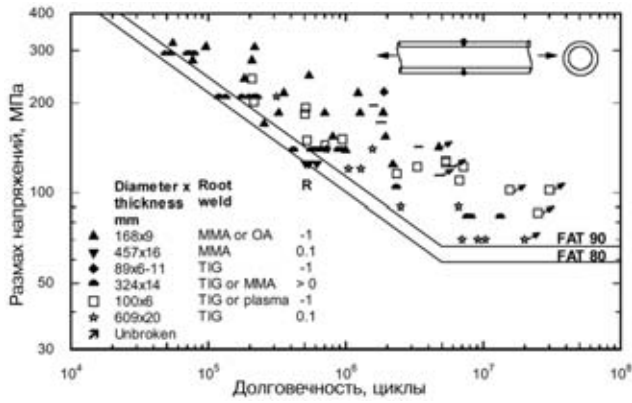


Рис. 1. Результаты испытаний на выносливость стальных труб с кольцевыми швами [4]

Поперечные стыковые швы, выполненные с одной стороны. Все больше фактов подтверждает, что у соединений со стыковым швом с полным проплавлением, выполненным с одной стороны, можно повысить категорию классификации из текущего низкого разряда (иногда FAT 45), который применяют в большинстве правил для угловых швов. Низкая классификация не отражает возможность выполнения и контроля швов с полным проплавлением с удовлетворительным профилем корневой выпуклости. Существующая информация о кольцевых швах труб с разрушением в корне, представленная в [4], предлагает FAT 80 (рис. 1). По-прежнему эта расчетная кривая могла бы применяться для совершенно соосных соединений. Широкий разброс отражает изменения размеров труб, типа швов, качества соединений, остаточных напряжений и режимов нагрузки. В этом отношении особенность кольцевых швов заключается в том, что в зависимости от размеров трубы и режимов сварки остаточные напряжения в корне шва могут быть сжимающими. Однако правила расчета усталости не должны включать никакого полезного эффекта, вызванного остаточными напряжениями сжатия, поэтому контрольные данные, полученные при высоком среднем напряжении циклического нагружения, наиболее полезны. Нет причины предполагать, что FAT 80 не может быть присвоена для односторонних стыковых швов с

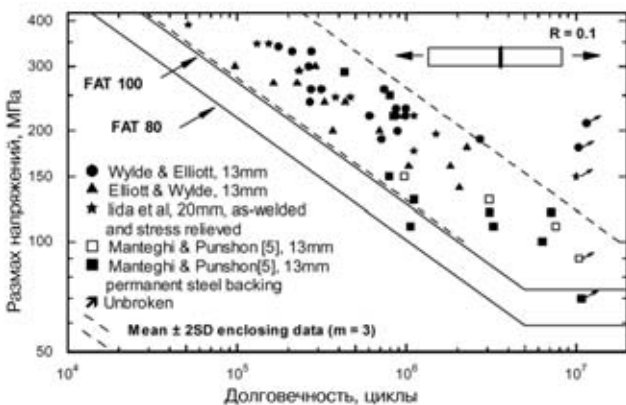


Рис. 2. Результаты испытаний на выносливость поперечных стыковых швов, выполненных электронно-лучевой сваркой с полным проплавлением стальной пластины [1]

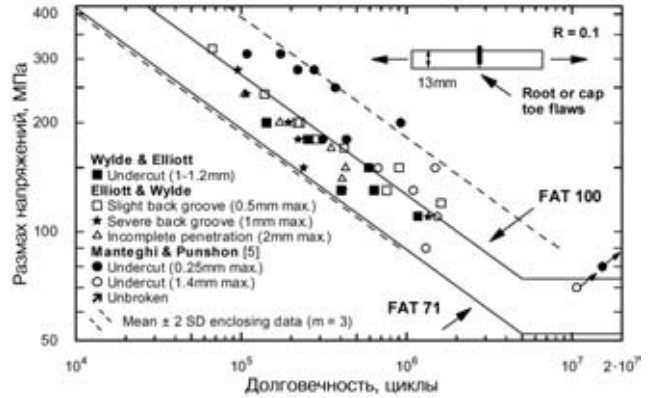


Рис. 3. Влияние поверхностных дефектов на сопротивление усталости швов, выполненных электронно-лучевой сваркой [1]

полным проплавлением на пластинах или других профилях.

Поперечные стыковые швы, выполненные недуговой сваркой. Результаты испытаний на выносливость, полученные с помощью образцов, выполненных дуговым способом, составляют базу текущих расчетных кривых усталости S-N. Соответствующие правила для швов, выполненных недуговой сваркой, давно устарели. Лучевая сварка (электронно-лучевая или лазерная), в частности, обеспечивает большие возможности для повышения производительности, способствуя быстрой сварке толстых сечений с одной стороны за один проход. Обобщение данных [1, 5] представлено на рис. 2. Они обеспечивают хорошую поддержку FAT 100, которой отвечают лучшие двухсторонние стыковые швы, выполненные дуговой сваркой. Полное проплавление должно завершаться легкоузнаваемой лицевой и корневой выпуклостями шва. Их профили менее критичны, и следующие пределы значений (угол сопряжения лицевой поверхности шва с основным металлом 10...50°; радиус сопряжения лицевой поверхности шва с основным металлом 0,4...4 мм; высота выпуклости шва 1...2,5 мм; ширина шва 5...25 мм) полностью совместимы с данными на рис. 2. Однако важным ограничением является то, что все данные получены при R = 0,1 на относительно небольших образцах, которые могли не содержать остаточных напряжений.

Для проектирования реальных конструкций целесообразно принять более низкую FAT 90. При быстром выполнении таких «одиночных» швов, безусловно, существует риск, заключающийся в трудности обеспечения полного проплавления, при этом потенциальными дефектами являются непровары и подрез. Данные на рис. 3 показывают, что дефекты глубиной до 1,4 мм могут снизить классификацию до FAT 71 [1, 5]. Однако FAT 80 удовлетворяет всем результатам для дефектов менее 1 мм глубиной. Конечно, швы с частичным проплавлением нельзя использовать преднамеренно, но такие данные помогают установить приемлемые уровни дефектов.

Меньше информации по швам, выполненным лазерной сваркой, но поперечные стыковые швы ведут себя подобно швам, выполненным электронно-лучевой сваркой (рис. 4). Данные по

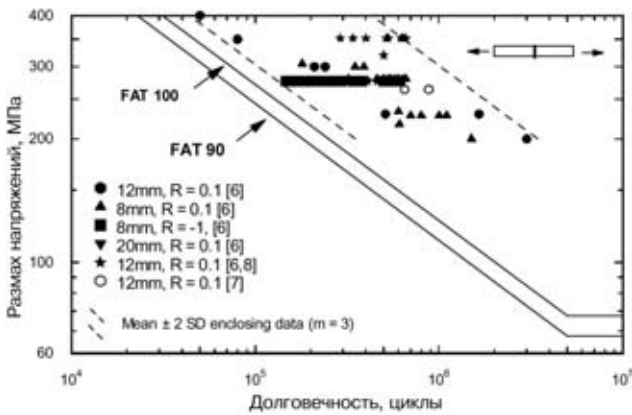


Рис. 4. Результаты испытаний на выносливость поперечных стыковых швов стальной пластины, выполненных лазерной сваркой с полным проплавлением [6–8]

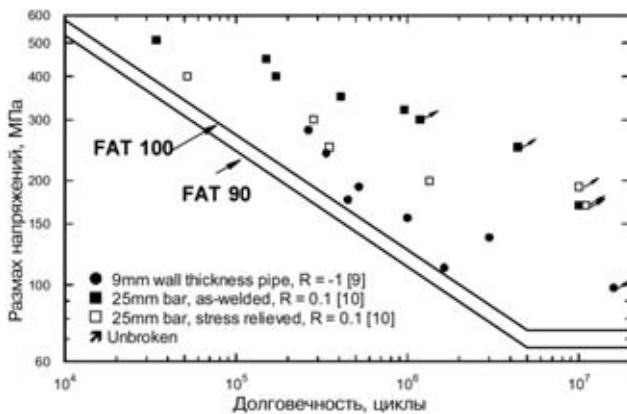


Рис. 5. Результаты испытаний на выносливость швов стальных труб и стержней круглого сечения, выполненных сваркой трением [9, 10]

соединениям с угловыми швами, выполненными лазерной сваркой [2], также согласуются с расчетными кривыми для швов, выполненных дуговой сваркой. Сварка трением также может использоваться для выполнения стыковых соединений (особенно стержней или труб). Данные на рис. 5 также поддерживают FAT 100. Однако при такой ограниченной базе данных более корректным на данном этапе кажется использование FAT 80.

Использование сварки трением с перемешиванием позволяет получать исключительно высокий уровень усталостной прочности стыковых соединений (рис. 6), приближающийся к усталостной прочности основного материала, не подвергавшегося сварке, а также выполнять нахлесточные соединения. Внимание исследователей главным образом сосредоточено на алюминиевых сплавах, но в настоящее время процесс разрабатывается и для сталей. Возможно, пока еще преждевременно предлагать данные расчета на усталость швов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, но можно предположить, что они будут похожи.

Поперечные угловые швы, несущие нагрузку. Анализ данных по крестообразным соединениям, которые разрушаются по шву, выполненный в рамках пересмотра британских правил расчета на усталость, показал, что некоторые текущие расчетные кривые усталости (например, FAT 45 по данным МИС) были слишком высокими [2, 12]. Вместо

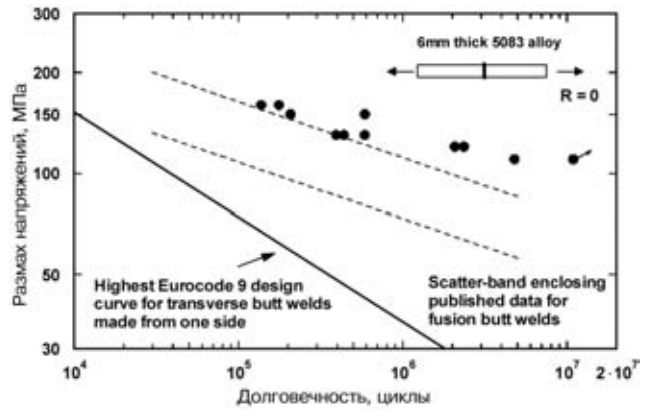


Рис. 6. Результаты испытаний на выносливость швов пластин толщиной 6 мм из алюминиевого сплава 5083, выполненных сваркой трением с перемешиванием [11]

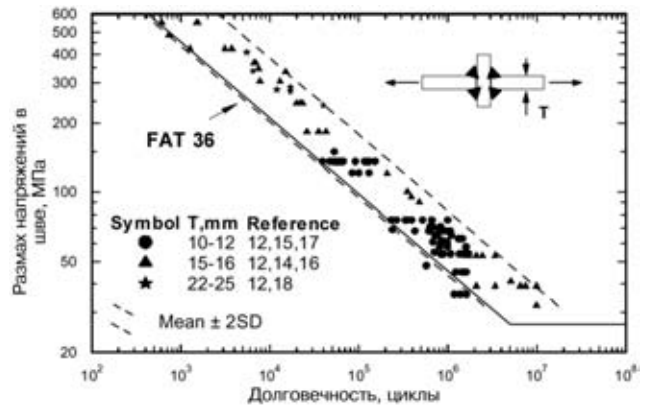


Рис. 7. Результаты испытаний на выносливость сварных крестообразных соединений с разрушающимися угловыми швами при высоких растягивающих средних или максимальных напряжениях

этого FAT 36 (используемая в Eurocode 3 [13]) лучше согласовывается с экспериментальными данными. Однако более тщательное исследование показало, что если не учитывать многие низкие результаты, полученные от швов, содержащих дефекты, то можно сохранить FAT 45. К тому же, анализ был ограничен результатами, полученными при значениях коэффициента асимметрии циклических напряжений R , близких нулю. Важным открытием, последовавшим за анализом, было то, что крестообразные соединения, весьма вероятно, содержат сжимающие остаточные напряжения в шве [14], которые способствуют повышению усталостной долговечности при $R \approx 0$. Безусловно, крестообразные соединения в реальных конструкциях также могут содержать сжимающие остаточные напряжения, однако, как замечено ранее, это не следует принимать в расчет (последний должен основываться на данных, полученных при высоком растягивающем среднем напряжении). Данные, полученные в [12, 14–18] (рис. 7), также свидетельствуют, что FAT 36 будет наиболее приемлемой классификацией.

Расчетные данные. Наиболее исчерпывающее руководство по расчету на усталость сварных конструкций составлено для сталей, хотя существуют также правила для алюминиевых сплавов [19]. Другие свариваемые материалы (например, нержа-

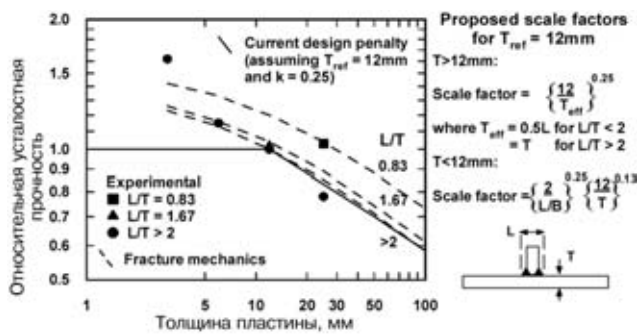


Рис. 8. Данные исследования сварного соединения алюминиевого сплава, обеспечивающие добавочный коэффициент эффекта толщины для тонких сечений [22]

вещая сталь) остаются без внимания. Появляются доказательства того, что расчетные данные для сварных соединений типичных углеродисто-марганцевых сталей могут применяться непосредственно и к сварным соединениям нержавеющей сталей [20]. Влияние окружающей среды, принципиально отличное поведение при коррозионной усталости сварных соединений углеродистых и нержавеющей сталей необходимо рассмотреть отдельно.

Коррозионная усталость. Имеется большое количество данных об испытаниях на усталость в морской воде. Однако большинство из них соответствует условиям Северного моря, где температура морской воды 6... 10 °С, а частота волновой нагрузки 0,17... 1 Гц. Опубликованы поправочные коэффициенты к основным кривым усталости $S-N$, применяемые в законе Великобритании об охране труда [21]. Влияние свободной коррозии заключается в уменьшении усталостной долговечности в 3 раза и ведет к неограниченному снижению предела усталости с увеличением базы испытаний. Катодная защита может подавлять коррозию, но может оказывать и негативное влияние на усталостную характеристику вследствие водородного охрупчивания. Следовательно, в данном расчете имеет место снижение долговечности в 2,5 раза при относительно высоком приложенном напряжении, а также влияние атмосферы, которое проявляется только при уровнях напряжений, близких к пределу усталости или ниже его.

Масштабный эффект. Сегодня допускают существование геометрического масштабного эффекта, при котором усталостная характеристика стремится к уменьшению с увеличением размеров сварного соединения. Поскольку расчетные кривые усталости $S-N$ основаны на данных испытаний относительно небольших образцов, при проектировании реальных конструкций их, возможно, необходимо уменьшить. Внимание главным образом уделяется эффекту толщины основного металла в сварных соединениях, разрушающихся по границам с лицевой поверхности шва. Полученный эффект толщины является особенностью многих правил расчета усталости и имеет форму $(T_{ref}/T)^k$, где T — фактическая толщина основного металла (обычно 13... 25 мм); T_{ref} — контрольная толщина основного металла, к которому непосредственно применимы расчетные кривые усталости $S-N$; $k \approx 0,25$. Однако признается более общий масштабный эффект, при котором k зависит от уровня концентрации напряжений в сварном соединении, а сам масштабный эффект возникает не просто за счет толщины основного металла. В результате некоторые правила расчета включают следующее: k , изменяющееся от 0,1 при низких уровнях концентрации напряжений до 0,3 при высокой концентрации напряжений. Использование эффективной толщины T_{eff} зависит от фактической толщины основного металла и пропорций сварного соединения (рис. 8).

Еще одним моментом, который не учтен во всех правилах расчета усталости, является потенциальное преимущество меньших размеров по сравнению с теми, которые связаны с базой данных расчетных кривых усталости $S-N$. Экспериментальные данные по-прежнему очень ограничены, но те, которые показаны на рис. 8 для алюминия [22], подтверждают общую тенденцию, прогнозируемую с помощью расчетов механики разрушения, и являются типичными. Масштабный коэффициент, учитывающий эффект толщины для $T < 12$ мм, дает расчетное повышение долговечности.

Другой масштабный эффект относится к соединениям с несущими поперечными швами, которые потенциально разрушаются от усталости. В таких случаях усталостная прочность, кроме того, зависит от толщины шва и глубины проплавления. В соединениях, сваренных угловыми швами с нулевым проплавлением, непроплавление равно толщине основного металла. Таким образом, возможно, потребуется корректировка толщины листа. Однако такие корректировки не были до сих пор включены в правила расчета усталости, расчетные кривые зависят только от уровня напряжений по толщине шва. Проведены исследования влияния толщины шва в крестообразных соединениях [12, 23, 24], которые основывались преимущественно на расчетах роста усталостной трещины, иногда подтверждаемых ссылкой на ограниченные результаты испытаний. В результате сделан общий вывод [23, 24] о том, что усталостная прочность уменьшается с увеличением толщины основного металла в соответствии с коэффициентом $(T_{ref}/T)^{0,15}$. Данные рис. 7 не показывают систематического влияния толщины основного металла порядка 9... 25 мм, следовательно, FAT 36 применима для всего этого диапазона и корректировка необходима только для более толстых пластин. Таким образом, значения напряжений, полученные из расчетной кривой FAT 36, можно уменьшить, если использовать коэффициент $(25/T)^{0,15}$ при $T > 25$ мм.

Метод определения напряжения в горячей точке. Недостаток действующих правил расчета усталости заключается в том, что они отстают от вычислительных разработок, особенно от использования анализа методом конечных элементов. Основной метод расчета, реализованный в действующих правилах расчета на усталость, фактически разработан более 30 лет назад, когда компьютеры были нововведением, а расчет конструкции в основном основывался на использовании стандартных формул и опыта. Таким обра-

зом, то, что правила расчета на усталость основываются на использовании номинальных напряжений, вполне обоснованно. Сегодня расчеты, основанные на применении вычислительной техники и метода конечных элементов, осуществляются по стандартным программам и с увеличением вычислительной мощности их возможности возрастают. Использование метода определения напряжения в горячей точке для расчета элементов сварного соединения с точки зрения потенциального разрушения по границе лицевой поверхности шва может устранить недостатки ранее применявшихся расчетов. Хотя этот метод применялся более 25 лет для трубчатых конструкций, имеется только экспериментальное руководство по его применению к сварным конструкциям из листов [25]. Есть две ключевые задачи: определение напряжения в горячей точке и его получение из анализа напряжений; выбор расчетных кривых усталости $S-N$ для напряжений в горячей точке. В отношении первой были усовершенствованы ранее разработанные МИС методы определения напряжений в горячей точке, основанные на экстраполяции поверхностных напряжений в основном металле вблизи границы шва, с использованием измеренных или расчетных напряжений [26]. Однако в контексте напряжений отличительное улучшение дает метод конечных элементов для расчетного определения распределения напряжений по толщине от лицевой поверхности вблизи границы шва [27]. В отношении второй задачи для экспериментальных напряжений в горячей точке были предложены расчетные кривые усталости $S-N$, основанные на имеющихся данных (рис. 9). Однако ограничение заключается в том, что информация об анализе напряжений позволила МИС использовать только метод экстраполяции для определения напряжения в горячей точке. Однако распределения напряжений в горячих точках, полученные методом конечных элементов при проектировании не используют. Пока следует использовать FAT 90 или FAT 100 вместе со значениями напряжений в горячей точке, отвечающими определению МИС. Гораздо более ограниченная база данных для алюминия предлагает использование FAT 40 в качестве подходящей кривой усталости $S-N$ для напряжений в горячей точке [28], но идеально для надежной рекомендации необходимо больше данных.

Комплексное нагружение. Одним из аспектов правил расчета на усталость, который был недавно выявлен как недостаток, является метод оценки элементов сварного соединения, подверженных комплексной, комбинированной или многоосной нагрузке [29]. Наибольшую важность имеют ситуации, в которых направления главного напряжения изменяются на протяжении всего периода нагружения (т. е. непропорциональное нагружение). Наиболее распространенный подход заключается в применении расчетов по максимальным размахам главного или эквивалентного напряжения с использованием кривых усталости $S-N$ для условий однонаправленного напряжения. Экспериментальные данные подтверждают такой

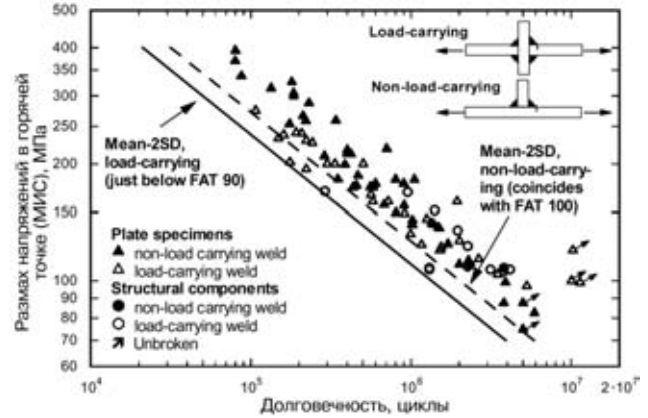


Рис. 9. Результаты испытаний на выносливость сварных образцов и элементов из стали, выраженные в значениях размаха напряжения в горячей точке, определенных методом линейной экстраполяции МИС [28]

подход для пропорционального нагружения, но демонстрируют гораздо меньшую усталостную долговечность, чем ожидается при непропорциональном нагружении [29]. По сути, альтернативный метод дает правила МИС и Eurocode 3, которые предусматривают различные кривые усталости $S-N$ для оценки нормального напряжения и напряжения сдвига с показателями наклона 3 или 5 соответственно [3, 13]. Срок усталостной долговечности будет определяться из следующего выражения:

$$\left(\sum \frac{n}{N}\right)_{\text{норм. нагр.}} + \left(\sum \frac{n}{N}\right)_{\text{напр. сд.}} \leq 1 \text{ (в Eurocode 3)} \quad (1)$$

или $\leq 0,5$ (в правилах МИС),

где n — количество приложенных циклов нагружения; N — предельная долговечность, полученная из соответствующей расчетной кривой усталости при данном напряжении.

Пониженное суммарное значение по МИС отражает предварительные показания того, что непропорциональное нагружение производит больший разрушающий эффект, чем пропорциональное. Однако, как видно из рис. 10, даже этот подход

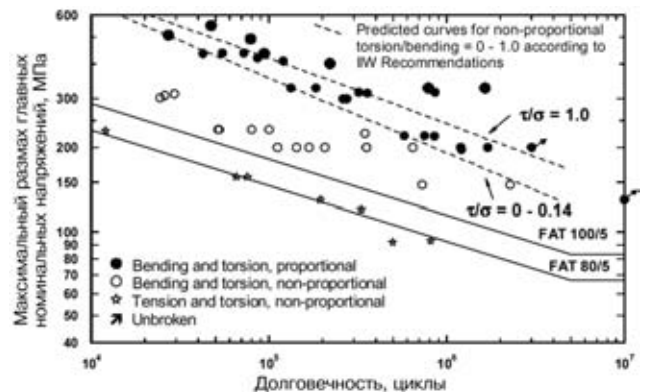


Рис. 10. Оценка результатов испытаний на выносливость угловых швов на стальных трубах с фланцем, разрушающихся по границе с лицевой поверхностью шва, при комбинации изгиба или растяжения и кручения [30]

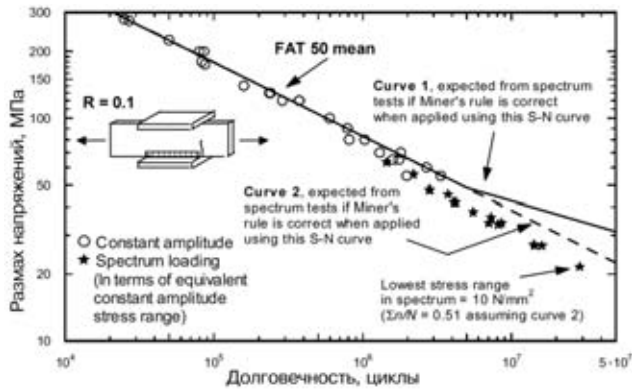


Рис. 11. Результаты испытаний на выносливость, иллюстрирующие разрушающий эффект от напряжений, меньших предела усталости, а также неточность правила Майнера [33]

может быть ненадежным применительно к фактическим данным [30].

Данная проблема послужила причиной ряда научных исследований и привела к альтернативным методам корреляции результатов испытания на усталость сварных соединений, полученных в состоянии простого одноосного и сложного комбинированного многоосного нагружения. Однако они по-прежнему считаются слишком сложными для общего применения в расчетах, поэтому предприняты попытки найти альтернативный промежуточный подход на основании анализа имеющихся результатов испытаний на выносливость [30]. Обнаружено, что состояние непропорциональной нагрузки является проблемой только тогда, когда распределение приложенного напряжения сдвига могло вызвать усталостное разрушение, обусловленное III видом деформированного состояния (согласно терминологии механики разрушения), как и в случае с кручением, приложенным к соединениям труб с пластинами. Иначе, как в случае с балками, подвергнутыми комбинации изгиба и кручения, нормальное распределение напряжений, похоже, доминирует, и размах главного напряжения достаточен для корреляции комбинированных данных напряжения с данными, полученными при однонаправленном нагружении, даже при непропорциональном нагружении [30]. Однако если компонента приложенного напряжения сдвига вызывает III вид деформированного состояния, это напряжение доминирует и полученная усталостная характеристика больше соответствует полученной только при нагружении сдвига, в результате чего кривая усталости $S-N$ получается более низкой, чем в условиях нормального напряжения. Значения данных ниже, чем данных, полученных только при напряжении сдвига, чему соответствует FAT 100/5 (т. е. FAT 100 при $m = 5$), и, следовательно, последним предложенным промежуточным вариантом расчетной кривой усталости является FAT 80/5 (рис. 10). Практической проблемой при выборе соответствующей расчетной кривой является необходимость оценки вероятности появления III вида деформированного состояния. Очевидно, что оно может быть вызвано приложенным кручением, и пока предложено, чтобы FAT 80/5 ограничивалась для случаев комбинации кручения

и осевых или изгибающих нагрузок. В противном случае может применяться FAT 80/3.

Кумулятивное повреждение. Важным вопросом является достоверность текущего метода оценки кумулятивного усталостного повреждения при нагрузке с переменной амплитудой. Все основные правила расчета на усталость определяют правило Майнера

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \text{ (при разрушении)}, \quad (2)$$

где n_i — количество циклов приложенных напряжений со значениями размаха S_i ; N_i — значения долговечности, полученные из расчетной кривой при S_i .

При расчете необходимо учесть, что поскольку усталостные трещины начали развиваться при уровнях напряжений ниже предела усталости с постоянной амплитудой, напряжения ниже этого предела постепенно становятся разрушающими и ими нельзя пренебрегать. Распространенным методом является экстраполяция кривой $S-N$ ниже предела усталости с постоянной амплитудой при меньшем показателе наклона (обычно при $m = 5$ вместо 3).

Имеется большое количество данных (полученных при испытаниях на выносливость, которые выполняли при случайном усталостном нагружении), свидетельствующих о двух потенциальных ошибках в описанном выше подходе:

большинство экспериментальных данных показывают, что $\sum n/N < 1$ при разрушении (обычно около 0,5) [31];

уровни напряжений ниже предела усталости с постоянной амплитудой оказываются более разрушительными, чем допускалось с использованием указанного выше подхода с «изогнутой кривой усталости» [32].

Последние данные результатов испытаний на выносливость [33] показаны на рис. 11. В этом случае при спектральной нагрузке напряжения всего 10 МПа около 25 % предела усталости с постоянной амплитудой и соответствующих $N = 5,7 \cdot 10^7$ циклов на экстраполированной кривой для постоянной амплитуды напряжений были такими же разрушающими, как следует из этой кривой. Более того, все образцы под воздействием спектральной нагрузки разрушались по истечении 50 % срока ожидаемой усталостной долговечности в соответствии с правилом Майнера. Как уже отмечалось ранее [2], полагают, что основная концепция линейного кумулятивного повреждения неприменима, поскольку условия закрытия трещины при данных переменных напряжениях отличаются при нагрузке с переменной и постоянной амплитудой, при этом переменная амплитуда является более разрушительной. Тот факт, что напряжения ниже предела усталости с постоянной амплитудой более разрушительны, чем ожидалось, объясняется их зависимостью от порогового коэффициента концентрации напряжения в соответствии с законами механики разрушения, который, как правило, прогнозирует



более низкий эффективный предел усталости, чем испытание с постоянной амплитудой [32]. Однако по-прежнему нет разумного количественного объяснения двух недостатков в распространенном методе кумулятивного повреждения. Необходимо дальнейшее исследование, но пока в качестве временного решения предлагается, что кривая усталости для постоянной амплитуды напряжений должна быть экстраполирована без изменения наклона кривой до эффективного предела усталости, соответствующего $N = 10^8$ циклов. В то же время кажется разумным принять более низкое суммарное значение по правилу Майнера (1,0 или даже 0,5).

Заключение

На основании анализа сопротивления усталости сварных конструкций рекомендованы следующие изменения правил расчета:

FAT 100 является подходящей расчетной кривой для различных соединений с поперечными стыковыми швами с полным проплавлением, выполненных с обеих сторон, при условии что будет принят в расчет прогиб, вызванный несоосностью;

большое количество данных, полученных при испытаниях труб, свидетельствуют в пользу повышения FAT до 80 для поперечных стыковых швов с полным проплавлением, выполненных с одной стороны, но требуется жесткий контроль соосности;

FAT 90 рекомендуется для поперечных стыковых швов с полным проплавлением, выполненных с одной стороны электронно-лучевой сваркой. Дефекты в корне шва глубиной до 1 мм допустимы при условии использования FAT 80;

расчетные диаграммы для соединений, выполненных дуговой сваркой, применимы к швам, выполненным лазерной сваркой;

опубликованные данные свидетельствуют о том, что швы, выполненные сваркой трением и трением с перемешиванием, обладают превосходными усталостными свойствами по сравнению со швами, выполненными дуговой сваркой. Однако база данных пока еще слишком невелика для подтверждения указанного повышения;

FAT 36 обеспечивает подходящую расчетную кривую для несущих поперечных стыковых швов потенциально разрушающихся по толщине, при этом нужно использовать поправочный коэффициент $(25/T)^{0,15}$, учитывающий эффект толщины;

если не учитывать внешние условия, правила расчета для углеродистых сталей могут в равной степени применяться для швов на нержавеющей сталях;

фактор эффекта толщины должен быть пересмотрен для введения поправки прироста для тонких сечений;

FAT 100 и FAT 90 рекомендованы для оценки потенциального разрушения на границе лицевой поверхности шва в случае несущих или ненесущих швов на сталях соответственно с использованием размаха напряжений в горячей точке МИС;

методы суммирования повреждения, разрешенные МИС и Eurocode для оценки комбинации

нормальных напряжений и напряжений сдвига, не надежны при непропорциональном напряжении. В качестве альтернативы рекомендовано использование FAT 80/5 в соединении с максимальным размахом номинального главного напряжения вместе комбинации кручения и изгиба или растяжения, или FAT 80/3 для других случаев;

правило Майнера должно использоваться с кривыми усталости $S-N$, экстраполированными к пределу усталости при 10^8 циклах, без изменения показателя наклона кривой и принятии суммарного повреждения 0,5.

1. Maddox S. J. Fatigue design of welded structures, Engineering Design in Welded Constructions, Pergamon, Oxford, (1992), p. 31.
2. Maddox S. J. Developments in fatigue design codes and fitness-for-service assessment methods, Proc. IAW Conf. on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures', Welding Research Council, New York, (1997), p. 22.
3. Hobbacher A. (Editor): Fatigue design of welded joints and components, International Institute of Welding, Abington Publ. Abington Hall, Cambridge, 1996.
4. MacDonald K. A., Maddox S. J., Haagenen P. J. 'Guidance for fatigue design and assessment of pipeline girth welds in free span', OTO 2000 043, HSE, Bootle (2000).
5. Manteghi S., Punshon C. S. Fatigue tests on electron beam welded C-Mn steel butt joints, TWI Research Report 520/1995, (1995).
6. Institute of Naval Architecture, Analytical and experimental examinations of the fatigue of thick plates, L-SHIP/WG2(94).20, IFS, (1994).
7. Nielsen S. E. Laser welding in ship construction, L-SHIP/WG2(94).24, TWI, (1994).
8. Weichel F., Petershagen H. Fatigue strength of laser welded structural steels with thicknesses between 8 and 20 mm, IAW Doc. XIII-1590-95, (1995).
9. Knight J. W. Fatigue tests on friction welded pipes, TWI Report 3/1976/E, (1976).
10. Manteghi S. Some fatigue tests on friction welded steel bars, IAW Doc. XIII-1681-97, (1997).
11. Threadgill P. L. Friction stir welding — the state of the art, TWI Research Report 7417.01/98/1012.02, (1998).
12. Gurney T. R., MacDonald K. A. 'Literature survey on fatigue strengths of load carrying fillet welded joints failing in the weld', Offshore Technology Report OTH 91 356, HSE, (1995).
13. Eurocode 3: Design of steel structures, prENV 1993-1-1, European Committee for Standardisation, Brussels, (1992).
14. Mori T., Kainuma S., Ichimiya M. A study of fatigue crack initiation points in load-carrying type of fillet welded joints, IAW Doc. XIII-1832-2000, (2000).
15. Anon: Fatigue investigation of typical welded joints in steel Fe E460 as compared to Fe E355, EUR-Report No.6340, European Commission, Luxembourg, (1979).
16. Friis L. E., Sperle J. O., Wallin L. E. Fatigue strength of welded joints — some Swedish results during recent years, Proc. Conf. Fatigue of Welded Structures, 1, The Welding Institute, Abington, Cambridge, (1971).
17. Anon. Etude due comportement en fatigue classique de joints types soudés qualite industrielle, EUR-Report No. 5266, European Commission, Luxembourg, (1975).
18. Watanabe M., Nagai K., Hioki S. 'An elasto-plastic fracture mechanics approach to fatigue crack propagation and its application to the estimation of the fatigue life of transverse fillet welded cruciform joints', IAW Doc. XIII-694-73, (1973).
19. Eurocode 9, Design of aluminium alloy structures, Part 2: Structures susceptible to fatigue, prENV 1999, European Committee for Standardisation, Brussels, (June 1996).
20. Branco C. M., Maddox S. J., Sonsino C. M. Fatigue design of welded stainless steels, ECSC Report EUR 19972, Official Publications of the European Community, Luxembourg, (2001).
21. HSE Offshore Installations: Guidance on design, construction and certification, Fourth Edition, 1990, Amendment No.3, UK Health and Safety Executive, London, (1995).
22. Maddox S. J. Scale effect in fatigue of fillet welded aluminium alloys, Proc. 6th Intern. Conf. on Aluminium Weldments, AWS (1995), p. 77.



23. *Nykanen T.* Geometric dependency on fatigue strength in transverse load-carrying cruciform joint with partial penetration K welds, IIW Doc. XIII-1709-98, (1998).
24. *Mori T., Kainumu S.* A study of fatigue strength evaluation method for load-carrying fillet welded cruciform joints, IIW Doc. XIII-1884-01, (2001).
25. *Niemi E.* Stress determination for fatigue analysis of welded components, International Institute of Welding, Abington Publ. Abington Hall, Cambridge, UK, (1996).
26. *Fricke W.* Recommended hot-spot stress analysis procedure for structural details of FPSOs and ships based on round-robin FE analysis, Proc. 11th Intern. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol IV, (2001). — P. 89–96.
27. *Dong P.* A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints, Intern. J Fatigue, 23, (2001). — P. 865–876.
28. *Maddox S. J.* Hot-spot fatigue data for welded steel and aluminium as a basis for design, IIW Doc. XIII-1900a-01, (2001).
29. *Sonsino C. M.* Multiaxial and random loading of welded structures, Proc. IIW Conference on «Performance of Dynamically Loaded Welded Structures», WRC, New York, (1997), p.317.
30. *Maddox S. J., Razmjoo G. R.* Interim fatigue design recommendations for fillet welded joints under complex loading, Fatigue Fract Engng Mater. Struct. 24, (2001), p. 329.
31. *Gurney T. R.* A summary of variable amplitude fatigue data for welded joints, OTH Report No. 91 395, HMSO, London (1992).
32. *Niemi E.* Random loading behaviour of welded components. Proc. IIW Conf on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, Welding Research Council, New York, (1997), 33.
33. *Gurney T. R.* Exploratory investigation of the significance of the low stresses in a fatigue loading spectrum, IIW Doc. XIII-1899-01, (2001).

Current fatigue design regulations have been revised from the point of view of the latest research and changes in the needs of the industry. The data obtained indicate that it is necessary to make many amendments in the regulations and broaden their limits. The issues considered include classification of butt and cruciform joints and allow for the welds made by the methods other than arc welding, scale effect, «hot spot» stress estimation method, as well as methods for calculation of complex combined loading and cumulative damage.

Поступила в редакцию 01.09.2003



ОЦІНКА КОРОЗІЙНО-ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЯК ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

Академік НАН України **В. В. ПАНАСЮК**, чл.-кор. НАНУ **І. М. ДМИТРАХ**
(Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України)

Описаны разработанные экспериментально-аналитические методы оценки локальной коррозии и локального разрушения сварных соединений типа «антикоррозионная наплавка–корпусная сталь». Построенные диаграммы электрохимической стойкости и коррозионной трещиностойкости многослойных сварных соединений могут служить базой для оценки остаточного ресурса рассмотренных соединений.

Ключові слова: зварні конструкції, корпусна сталь, корозійно-втомлена міцність, гетерогенні системи, електрохімічні властивості, щільна корозія, втомна тріщина, металева модель, циклічна тріщиностійкість, узагальнюючі діаграми, залишковий ресурс

Проблема ефективного забезпечення надійності та довговічності відповідальних зварних конструкцій, що експлуатуються в умовах дії агресивних корозійних середовищ, залишається актуальною для енергетики, хімічної промисловості та інших галузей індустрії. Це пояснюється тим, що все ширшого застосування набувають матеріали чи елементи конструкцій, які з електрохімічної точки зору є гетерогенними системами, і виникнення та протікання в них корозійних процесів має складний багатостадійний характер. Типовим прикладом цього є зварні з'єднання з різнорідних матеріалів та елементи конструкцій із захисними антикорозійними наплавками. Як свідчить інженерна практика [1], для таких елементів конструкцій є характерною певна непередбачуваність процесів корозії та корозійно-механічної пошкоджуваності, що виникають внаслідок нерегламентованої зміни умов експлуатації, порушення технологічних режимів тощо.

Суттєвим недоліком існуючих підходів [2, 3] для оцінки втомної довговічності елементів конструкцій зварних з'єднань є формалізоване та достатньо обмежене врахування чинника агресивного експлуатаційного середовища. Корозійне середовище розглядається як постійний (незалежний) параметр, який характеризує тільки умови випробувань, що не відбиває адекватно фізико-хімічної ситуації в зоні зварного шва, яка є визначальною в суттєвому зниженні експлуатаційної надійності зварних з'єднань під дією робочих середовищ. У такій неоднорідній (гетерогенній) системі, з тим чи іншим ступенем імовірності, може протікати цілий спектр, часто конкуруючих між собою, фізико-хімічних процесів, що призводять до деградації механічних властивостей зварного з'єднання як шляхом інтенсивного анодного розчинення матеріалу (виникнення пітингів, корозійних

виразок і т. п.), так і шляхом водневого окрихчення зварної зони (прискорення процесів утворення мікротріщин та зародження і розвиток макротріщин).

Враховуючи такі особливості, в роботі запропоновано методи оцінки корозійної стійкості та корозійно-втомної міцності такого специфічного зварного з'єднання, як «двошарова антикорозійна наплавка–корпусна сталь» [4], яке широко застосовується для протикорозійного захисту корпусних конструкцій в енергетиці та нафтопереробці.

Об'єкт та мета досліджень. Основу зварного з'єднання складала корпусна сталь 15X2МФА (1), на поверхню якої наплавлено два шари антикорозійних наплавок: перший із сталі 07X25Н13 (2) товщиною приблизно 4 мм і другий — 04X20Н10Г2Б (3) товщиною близько 3,5 мм (рис. 1, табл. 1).

Метою даних досліджень було встановлення електрохімічної поведінки окремих складових зварного з'єднання та зон їх сплавлення, а також визначення базових параметрів його корозійної циклічної тріщиностійкості. Методологічною основою досліджень були оригінальні методи фізико-хімічних та фізико-механічних досліджень, розроблені в ФМІ НАН України [5]. Всі дослідження проведено в 1 %-му водному розчині H_3BO_3 з додаванням КОН до рН 8 ($T = 25...80\text{ }^\circ\text{C}$), що був моделлю так званої реакторної води борного регулювання [6]. Частота корозійно-втомних вип-

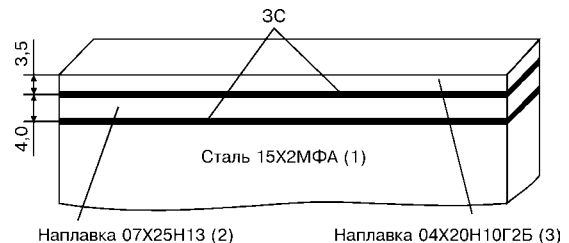


Рис. 1. Схема зварного з'єднання

Таблиця 1. Хімічний склад компонентів зварного з'єднання «двошарова антикорозійна наплавка–корпусна сталь»

№ з/п	Матеріал	Масова частка елемента, %						
		C	Cr	Ni	Mn	Cu	V	Fe
1	Сталь 15X2МФА	0,15	2	—	—	< 1	< 1	Решта
2	Наплавка 07X25Н13	0,07	25	13	—	—	—	»»
3	Наплавка 04X20Н10Г2Б	0,04	20	10	2	—	—	»»



робовувань становила $f = 0,017$ Гц при коефіцієнті асиметрії циклу навантаження $R = 0$. Для порівняльної оцінки впливу корозійного середовища на ріст втомних тріщин в досліджуваному з'єднанні проведено також випробування на повітрі ($f_1 = 1$ Гц, $R = 0$, $T = 25$ °С).

Оскільки в досліджуваному зварному з'єднанні, як у відповідній гетерогенній системі, найбільш потенційно небезпечними є зони сплавлення (ЗС) між матеріалами, то в першу чергу важливо оцінити їх реальний розмір (товщину). Для цього був використаний рентгеноструктурний аналіз зон сплавлення з метою встановлення розподілу в них таких базових елементів, як хром, нікель та марганець. Сканування проводили в діапазоні 1 мм ($\pm 0,5$ мм від видимої лінії розділу матеріалів з'єднання). За результатами сканування будували залежності «масова частка елемента у відсотках — діапазон сканування у мікрометрах» і на їх основі оцінювали протяжність відповідних зон сплавлення. Встановлено, що товщина зони сплавлення між наплавками 04X20H10Г2Б та 07X25H13 становить приблизно 300 мкм, а для зони сплавлення «наплавка 07X25H13 — корпусна сталь 15X2МФА» — в межах 150 мкм.

Електрохімічні характеристики матеріалів та зон сплавлення. Вольт-амперометричні дослідження [5, 7] окремих матеріалів з'єднання та зон їх сплавлення реалізовували шляхом пошарового зрізу зразка. З одержаних потенціодинамічних поляризаційних кривих визначали такі електрохімічні характеристики: потенціал корозії E_k та густину струму корозії i_k як параметри, що описують стан металевої поверхні за умови вільного кородування, а також анодні b_a та катодні b_k коефіцієнти Тафеля як якісні параметри реалізації початкових електрохімічних механізмів при відхиленні потенціалу на поверхні зразка в анодний чи катодний бік [8, 9].

Встановлено, що всі визначені базові параметри вказують на високу електрохімічну активність корпусної сталі 15X2МФА порівняно з матеріалами наплавки. Параметри зони сплавлення між корпусним матеріалом та наплавкою 07X25H13 займають проміжні значення щодо матеріалів, що її

утворюють. Матеріал в зоні сплавлення між двома наплавками має значно нижчі показники корозійної стійкості, ніж самі матеріали наплавки. При цьому зафіксовано, що значення потенціалу корозії (рис. 2, а) для базової сталі є нижчими від таких параметрів для наплавки на 250...300 мВ. Зона сплавлення між базовою сталлю та наплавкою 07X25H13 має потенціал корозії, близький до базової сталі. Значення потенціалу корозії зони сплавлення між двома наплавками досягає $-0,490$ В, що на 100...170 мВ нижче порівняно із такими параметрами для самих наплавки (відповідно $-0,320$ В для сталі 04X20H10Г2Б та $-0,390$ В для сталі 07X25H13). Аналіз густини струму корозії (рис. 2, б) показав, що для базової корпусної сталі їх значення коливаються в межах $0,0057$ А/м², а для наплавки 04X20H10Г2Б — не перевищують $0,0054$ А/м². Найнижчі значення густини корозійних струмів зафіксовано для випадку наплавки 07X25H13 ($i_k = 0,0023$ А/м²). Слід зазначити, що в зоні сплавлення між двома наплавками густина струму корозії досягає значення $0,0067$ А/м². Отже, в цій зоні електрохімічні процеси будуть протікати з найбільш високою швидкістю і вона є потенційно небезпечною зоною з точки зору корозійної стійкості.

Електрохімічна поведінка з'єднань «антикорозійна наплавка-корпусна сталь» в умовах щільної корозії. Випадки щільної корозії в елементах конструкції є досить поширеними в експлуатаційних умовах і вважаються одними з найбільш небезпечних щодо корозійної пошкодуваності металів [10]. З метою вивчення умов щільної корозії в зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка-корпусна сталь» була змодельована плоска щілина, яка утворювалась двома поверхнями досліджуваного матеріалу [4]. Фіксована ширина щілини (0,12 мм) створювалась за допомогою інертної плівки. При випробуваннях одна поверхня щілини під'єднувалась до потенціостата і являла собою робочий електрод (потенціал якого змінювався), а друга залишалась у стані вільної корозії. В результаті одержано анодні поляризаційні криві для складових матеріалів досліджуваного зварного з'єднання (наплавки 07X25H13

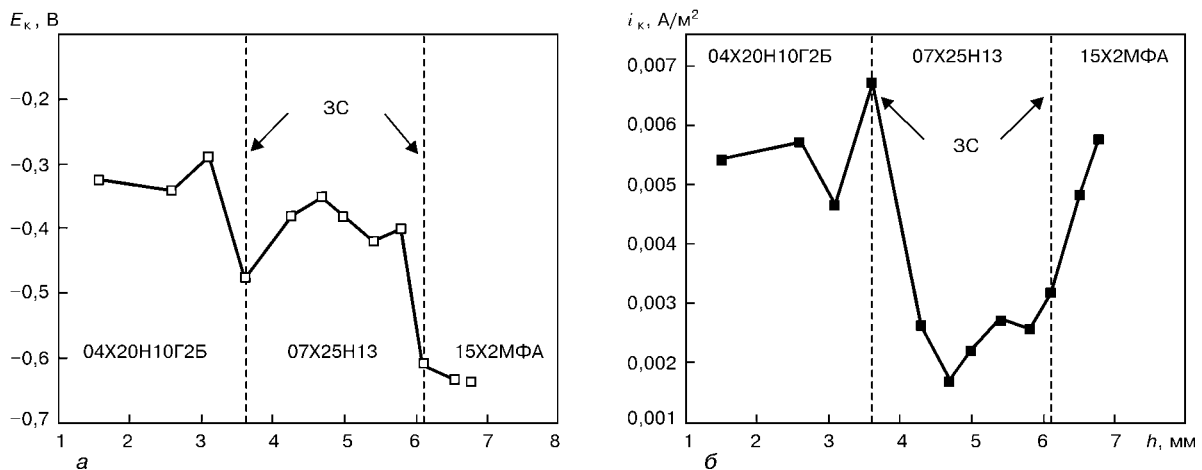


Рис. 2. Зміна потенціалу корозії (а) та густини струму корозії (б) від глибини зрізу зварного з'єднання «антикорозійна наплавка-корпусна сталь»

Таблиця 2. Порівняння значень потенціалів корозії E_k та густин граничних струмів $i_{гр}$ для випадків досліджень відкритої поверхні та у щілині

Матеріал	Об'єкт досліджень	$E_k, В$	$i_{гр}, А/м^2$	$\frac{i_{гр}(щілина)}{i_{гр}(поверхня)}$
15Х2МФА	Поверхня	-0,539	0,0334	5,31
	Щілина	-0,467	0,1772	
07Х25Н13	Поверхня	-0,330	0,0102	5,34
	Щілина	-0,397	0,0545	
04Х20Н10Г2Б	Поверхня	-0,422	0,00995	14,27
	Щілина	-0,469	0,1423	

та 04Х20Н10Г2Б, корпусна сталь 15Х2МФА) в умовах щілинної корозії, які були порівняні з аналогічними поляризаційними кривими, одержаними для випадку відкритої поверхні. На основі цих кривих визначено відповідні значення потенціалу корозії E_k та густин граничних струмів $i_{гр}$ [5] для випадків відкритої поверхні та щілини (табл. 2). З одержаних результатів видно, що для досліджуваного з'єднання «антикорозійна наплавка-корпусна сталь» анодні процеси в щілинах протікають значно інтенсивніше порівняно з відкритою поверхнею. Тут особливо слід наголосити на випадку щілинної корозії для наплавки 04Х20Н10Г2Б, де інтенсивність анодних процесів у щілині є більш як на порядок вищою порівняно з інтенсивністю цих процесів на відкритій поверхні.

Математична модель та аналітична оцінка електрохімічної корозії зварного з'єднання як багатоелектродної системи. Розглянемо [11, 12] корозійну виразку кругової циліндричної форми, яка проникає через двохшарову наплавку в базовий матеріал (рис. 3).

Запишемо необхідні в наступному розгляді два співвідношення для визначення густини i струму корозії. Перше з них [8, 9] таке:

$$i = (E_c - E)/b, \quad (1)$$

де E, E_c — рівноважний та стаціонарний (тобто встановлений при протіканні електричного струму) електродні потенціали; b — питомий поляризаційний опір.

З другого боку згідно з означенням електродного потенціалу як різниці електричних потенціалів металевої поверхні та електроліта на межі подвійного електричного шару можна записати так:

$$E_c = \psi_m - \psi_c, \quad (2)$$

де ψ_m, ψ_c — потенціали металу та електроліту. Оскільки електропровідність металу приблизно в 10^6 разів більша за електропровідність електроліту, то можна вважати, що

$$\psi_m = \text{const} \cong 0. \quad (3)$$

На основі рівностей (1)...(3) одержимо друге співвідношення для визначення i

$$i = - (E + \psi_c)/b. \quad (4)$$

Внутрішня поверхня виразки є триелектродною системою. Для дослідження в ній струму корозії введемо, як це зроблено в роботі [13], z — складову

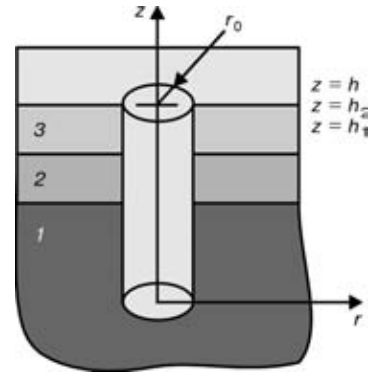


Рис. 3. Схема корозійної виразки

сумарного через переріз виразки електричного струму $i(z)$ та усереднений електричний потенціал $\psi(z)$, тобто виразку з точки зору електричних процесів будемо розглядати як довгу лінію. Такий підхід прийнятний, якщо поперечні розміри виразки малі проти її глибини [13]. Складемо для $i(z)$ і $\psi(z)$ балансові рівняння. З цією метою розглянемо зміну величин $i(z)$ і $\psi(z)$, коли $i(z)$ і z зростає на dz . В такому разі зміну di сумарного струму, коли z одержує приріст, обумовлено стоком (витоком) по боковій поверхні виразки, згідно із співвідношеннями (4), можна записати так:

$$di(z)/dz = - 2\pi r_0 [E(z) + \psi_c(z)]/b(z). \quad (5)$$

В рівнянні (5) і надалі електричний потенціал середовища приймається постійним по перерізу, тобто $\psi_c(r, z) = \psi_c(z)$. Із закону Ома для стовпчика середовища висотою dz маємо

$$d\psi_c/dz = - i(z)/(\pi r_0^2 k), \quad (6)$$

де k — питома електропровідність середовища.

Розглянемо тепер величину $\psi_c(z)$. Продиференціюємо з цією метою рівність (6) по z і підставимо в неї $di(z)/dz$ з рівності (5). Тоді одержимо

$$[d^2/dz^2 - s^2(z)] \psi_c(z) = s^2(z) E(z), \quad (7)$$

де

$$s(z) = \sqrt{2/[r_0 k b(z)]}. \quad (8)$$

В нашому випадку для кожної n -ї області ($n = 1, 2, 3$ відповідно для областей $0 < z < h_1, h_1 < z < h_2, h_2 < z < h$) рівноважні електродні потенціали E_n і питомі поляризаційні опори b_n вважаємо сталими. Введемо в розгляд нові функції:

$$\psi_n = \psi_c + E_n. \quad (9)$$

Тоді з рівняння (7) одержимо

$$(d^2/dz^2 - s_n^2) \psi_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \quad (10)$$

де

$$s_n = \sqrt{2/[r_0 k b_n]}. \quad (11)$$

Густина струму корозії згідно із співвідношеннями (4) і (9) буде



$$i_n = -\psi_n/b_n. \quad (12)$$

Конкретні значення коефіцієнтів s_n і відповідні розв'язки рівнянь (10) залежать від того, якими є питомі поляризаційні опори анодними чи катодними, а це визначається співвідношеннями між рівноважними електродними потенціалами і поляризаційними опорами окремих матеріалів та геометричними параметрами системи.

Якщо анодний і катодний опори кожного окремого електрода рівні один одному, то, підставивши їх значення в співвідношення (10)...(12), з них при відповідних граничних умовах (вони будуть сформульовані нижче) можна визначити для кожного електрода струми корозії, в тому числі і їх знак, і тим самим встановити, чи є анодом або катодом даний електрод. В загальному випадку, коли анодний і катодний опори є різні для конкретного n -го електрода, при виборі b_n необхідно заздалегідь знати, чим є в розглядуваній системі даний електрод: анодом чи катодом. Частково це питання вирішується на основі порівняння величин рівноважних електродних потенціалів окремих електродів. Проілюструємо це на прикладі, в якому $E_1 < E_2 < E_3$. Звідси випливає, що основний матеріал — анод, верхній шар покриття — катод, а нижній шар може бути в загальному випадку частково анодом і частково катодом. Розглянемо цей випадок. Нехай z_0 — границя розділу цих ділянок. Очевидно, що катодною ділянкою другого матеріалу повинна бути прилегла до першого ($h_1 < z < z_0$), а анодною — прилегла до третього матеріалу ($z_0 < z < h_2$). Тоді область щілини ($0 < z < h$) розіб'ється на чотири підобласті, в яких розв'язки рівнянь (10) будуть такими:

$$\begin{aligned} \psi_{1a}(z) &= c_1 \exp(-s_{1a}z) + d_1 \exp(s_{1a}z), \quad 0 < z < h_1, \\ \psi_{2k}(z) &= c_{2k} \exp(-s_{2k}z) + d_{2k} \exp(s_{2k}z), \quad h_1 < z < z_0, \\ \psi_{2a}(z) &= c_{2a} \exp(-s_{2a}z) + d_{2a} \exp(s_{2a}z), \quad z_0 < z < h_2, \\ \psi_3(z) &= c_3 \exp(-s_{3k}z) + d_3 \exp(s_{3k}z), \quad h_2 < z < h. \end{aligned} \quad (13)$$

Тут

$$\begin{aligned} s_{1a} &= \sqrt{2/[r_0 k b_{1a}]}, \quad s_{2k} = \sqrt{2/[r_0 k b_{2k}]}, \\ s_{2a} &= \sqrt{2/[r_0 k b_{2a}]}, \quad s_{3k} = \sqrt{2/[r_0 k b_{3k}]}, \end{aligned} \quad (14)$$

b_{na} і b_{nk} ($n = 1, 2, 3$) — питомі анодні та катодні поляризаційні опори n -го матеріалу. Таким чином, в рівняннях (13) дев'ять невідомих величин: $c_1, d_1, c_{2k}, d_{2k}, c_{2a}, d_{2a}, c_3, d_3, z_0$. Вони визначаються з граничних умов при $z = 0$ і $z = h$, умов неперервності при $z = h_1, h_2, z_0$.

1. Умова при $z = 0$ (дно виразки). Повний струм із дна згідно із співвідношенням (4) буде $i_{(z=0)} = -\pi r_0^2 (E_1 + \psi_{c(z=0)})/b_{1a}$. Підставимо в цю рівність $i_{(z=0)}$ із рівняння (6) та врахуємо рівність (9), одержимо

$$(d\psi_1/dz - v_0\psi_1)|_{z=0} = 0, \quad v_0 = (kb_{1a})^{-1}. \quad (15)$$

2. Умова при $z = h$ (верх виразки). Згідно з роботою [9, формула (19)] та наведеним вище (9) маємо

$$\begin{aligned} (d\psi_3/dz + v_h\psi_3)|_{z=h} &= 0, \\ v_h &= (1 - 2I(q))/(2kb_{3k}I(q)), \end{aligned} \quad (16)$$

$$F(q) = \int_0^\infty \frac{I_1^2(\lambda)d\lambda}{\lambda(1+q\lambda)}, \quad q = kb_{3k}/r_0,$$

де $I_1(\lambda)$ — функція Бесселя 1-го роду 1-го порядку. Відзначимо, що рівність (16), як показано в [9], враховує інтегрально електронейтральність системи — виразка+торцева поверхня ($r_0 < r < \infty, z = h$).

3. Умови при $z = h_1, z = h_2$ виражають неперервність потенціалу $\psi_c(z)$ та $d\psi_c(z)/dz$. З урахуванням (9) ці умови мають вигляд

$$(\psi_1 - \psi_{2k})|_{z=h_1} = E_1 - E_2, \quad d((\psi_1 - \psi_{2k}))/dz|_{z=h_1} = 0, \quad (17)$$

$$(\psi_{2a} - \psi_3)|_{z=h_2} = E_2 - E_3, \quad d((\psi_{2a} - \psi_3))/dz|_{z=h_2} = 0. \quad (18)$$

4. Три умови при $z = z_0$. Дві з них витікають з рівності нулеві густини анодного і катодного струмів в цій точці. Згідно із співвідношеннями (12) вони мають вигляд

$$\psi_{2k}(z_0) = 0, \quad \psi_{2a}(z_0) = 0, \quad (19)$$

третья — із неперервності $d\psi_c(z)/dz$

$$[d\psi_{2a}(z)/dz - d\psi_{2k}(z)/dz]|_{z=z_0} = 0. \quad (20)$$

Таким чином, система співвідношень (12)...(20) визначає густину корозійних струмів на внутрішній поверхні виразки. Система рівнянь (15)...(20) може не мати дійсних розв'язків. Це означає, що другий електрод (нижній шар покриття) є повністю анодом або повністю катодом. В основному така ситуація буде в розглядуваному нижче випадку. Очевидно, що при наявності в покритті більше двох шарів представлений вище метод може бути також застосований, якщо врахувати на нових границях розділу умови, аналогічні умовам (17) і (18).

Представлений вище аналітично-числовий метод не застосовний, коли дно виразки знаходиться на рівні границі розділу металів (наприклад $h_1 = 0$). В цьому випадку область $0 < z < h_1$ випадає, і в співвідношеннях (13) треба виключити ψ_{1a} , а процес у виразці описувати функціями ψ_{2a}, ψ_{2k} та ψ_3 . При цьому слід враховувати дію першого матеріалу тільки через дно виразки ($z = h_1 = 0$) формулюванням тільки для дна граничної умови, виведення якої дається нижче.

Повний струм із дна згідно зі співвідношеннями (4) і (9) буде

$$i_{(z=0)} = -\pi r_0^2 (E_1 + \psi_{2(z=0)} - E_2)/b_{1a}, \quad (21)$$

а згідно із (6) і (9) —

$$i_{(z=0)} = -(\pi r_0^2 k) d\psi_2/dz|_{z=0}. \quad (22)$$

З рівностей (21) і (22) одержуємо умову на дні виразки

$$(d\psi_2/dz - v_0\psi_2)|_{z=0} = v_0(E_1 - E_2), \quad v_0 = (kb_{1a})^{-1}, \quad (23)$$

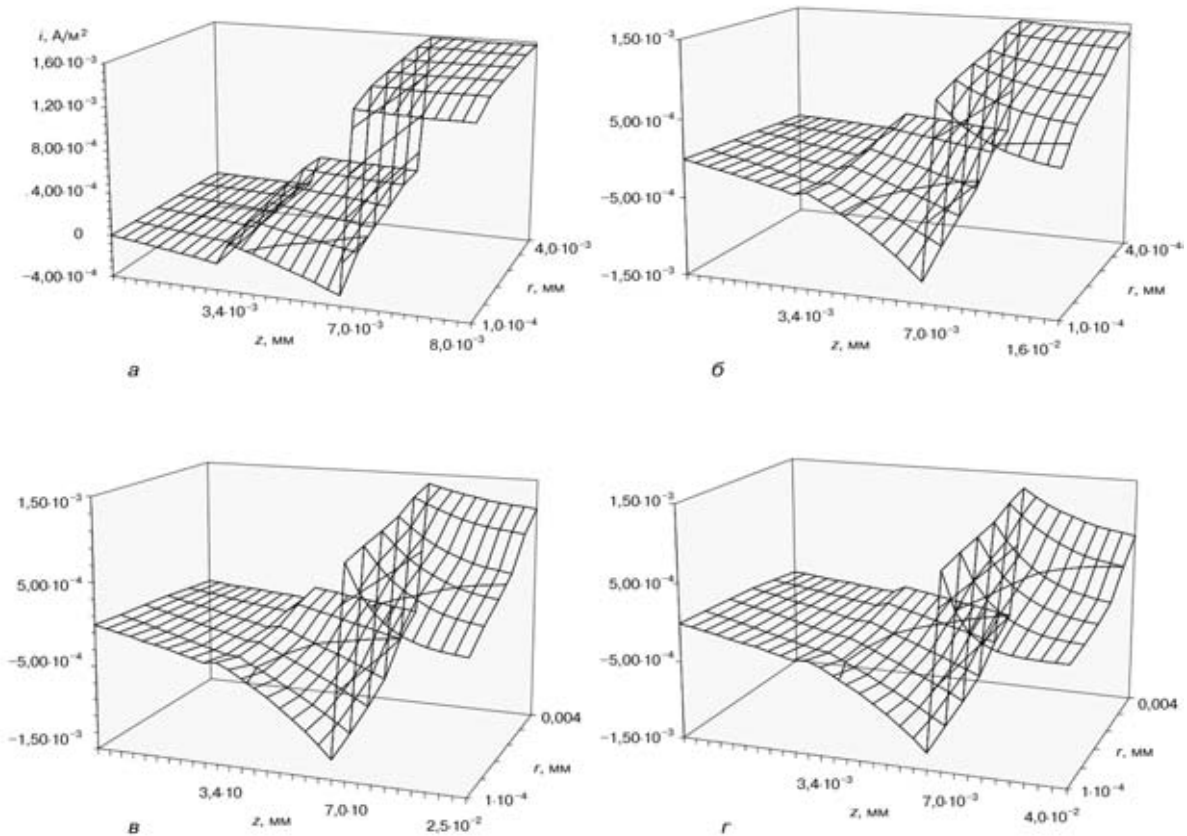


Рис. 4. Густина корозійного струму з поверхні циліндричної виразки змінного радіуса r та сталої глибини h у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка – корпусна сталь»: а – $h = 8$; б – 16; в – 25; г – 40 мм

яка заміняє умову (15). Рівності (17) виключаються із системи умов.

Продемонструємо реалізацію викладеного методу для оцінки густини струму корозії з поверхні циліндричної виразки змінного радіуса r та сталої глибини h у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Розглядали виразки різних розмірів, а саме: радіусом $r_0 = (0,1 \div 4,0)$ мм та загальною глибиною $h = 8; 16; 25; 40$ мм. Робочим середовищем служив 1-й % водний розчин $H_3BO_3 + KOH$ до рН 8 з електропровідністю $k = 1/6(Ом \cdot м)^{-1}$, що є моделлю реакторної води борного регулювання [6]. Для розрахунків методами стандартних потенціостатичних вимірювань [7] експериментально визначено рівноважні електродні потенціали матеріалів зварного з'єднання: $E_1 = -0,345$, $E_2 = -0,165$, $E_3 = -0,149$ В та їх питомі поляризаційні опори в $Ом \cdot м^2$: $b_{1a} = 120$; $b_{2k} = 130$; $b_{2a} = 45$; $b_{3k} = 80$.

Результати обчислень представлено на рис. 4, як розподіл густини корозійних струмів із бокової поверхні виразки по осі z дано від розкриття (крайні ліві точки) до дна (крайні праві точки). Одержані дані показують, що незалежно від глибини виразки базовий матеріал завжди є анодом і при збільшенні глибини виразки в ньому, густина анодного струму зменшується. При невеликому прониканні виразки в основний матеріал обидва шари наплавки є катодами, але при загальній глибині виразки $h \geq 15$ мм прилеглий до основного матеріалу шар наплавки частково стає анодом. При цьому в усьому

діапазоні зміни радіусів виразки ($0,1 \leq r_0 \leq 4,0$) мм із збільшенням r_0 густина анодного струму зростає.

Отже, залежно від розмірів виразки можлива реалізація різних комбінацій «анод–катод» у зварному з'єднанні як в багатоелектродній системі. Таким чином, виникнення різних електрохімічних умов і визначатимуть характер корозійно-втомного руйнування такої гетерогенної системи.

Електрохімічні умови у корозійно-втомних тріщинах при їх різному розташуванні у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». З метою оцінки електрохімічних механізмів впливу середовища на процес корозійно-втомного руйнування даного зварного з'єднання були проведені дослідження електрохімічних умов, що можуть виникати у корозійно-втомних тріщинах при різному їх розташуванні щодо матеріалів з'єднання та зон сплавлення. Для цього випробувано п'ять партій зразків, що відрізняються довжиною початкової втомної тріщини: в першій партії вершина тріщини була розміщена в наплавці 04X20H10Г2Б, в другій партії – в зоні сплавлення між наплавками 04X20H10Г2Б і 07X25H13, в третій партії в наплавці 07X25H13, в четвертій партії – в зоні сплавлення між наплавкою 07X25H13 і корпусною сталлю 15X2МФА, в п'ятій партії – в корпусній сталі 15X2МФА. Це дозволило встановити електрохімічні умови у вершині стаціонарної тріщини окремо для кожної складової зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь».



Таблиця 3. Стабілізовані значення електрохімічних параметрів pH_{BC} та E_{BC} на базі випробувань 100 год

Матеріал	pH_{BC}	E_{BC} , мВ	Механізм розчинення	
			ВО	АР
04X20H10Г2Б	10,9	-500	-	+
ЗС-I	9,6	-495	-	+
07X25H13	9,2	-505	-	+
ЗС-II	6,0	-500	+	+
15X2МФА	9,8	-525	+	+

Примітка. ВО — водневе окрихчення; АР — анодне розчинення металу.

Локальні електрохімічні дослідження в порожнинах втомних тріщин були здійснені за спеціальною методикою з використанням вимірних міні-капілярів [5]. За результатами досліджень встановлено часові залежності зміни водневого показника середовища pH_B та електродного потенціалу E_B у вершині тріщин при їх різному розташуванні щодо складових з'єднання та зон сплавлення. На їх основі були визначені усталені (стабілізовані) значення зазначених електрохімічних параметрів pH_{BC} та E_{BC} на базі випробувань 100 год (табл. 3).

На основі одержаних значень pH_{BC} та E_{BC} електрохімічні умови в корозійно-втомних тріщинах різноманітного розташування нанесено на діаграму термодинамічної стійкості води [14]. Це дало змогу оцінити термодинамічну ймовірність протікання тих чи інших електрохімічних реакцій у вершині тріщин, і тим самим оцінити ймовірність реалізації механізму анодного розчинення металу та водневого окрихчення при корозійно-втомному руйнуванні компонентів зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Встановлено (табл. 3), що у всіх досліджених випадках електрохімічні умови у вершині стаціонарної статично навантаженої тріщини сприяють протіканню електрохімічної корозії, а отже, й дії механізму анодного розчинення, при його найбільшій інтенсивності для корпусної сталі 15X2МФА. Утворення водню в результаті електрохімічних реакцій у вершині тріщини, а отже, і реалізація механізму водневого окрихчення термодинамічно можлива лише для тріщин, вершини яких розташовані у зоні сплавлення «наплавка 07X25H13–корпусна сталь 15X2МФА», а також у самій корпусній сталі 15X2МФА.

Особливості розвитку втомних тріщин у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» та узагальнені діаграми його циклічної корозійної тріщиностійкості. Відомо, що при профілактичних оглядах енергетичних реак-

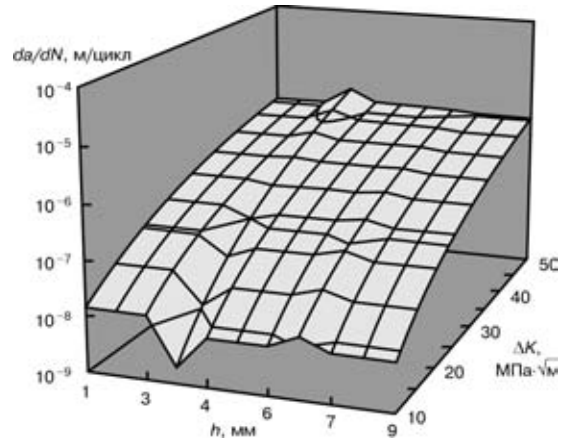


Рис. 5. Узагальнена діаграма циклічної тріщиностійкості зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» (повітря, $f = 1$ Гц, $R = 0$)

торів виявлено, що в процесі їх експлуатації в антикорозійній наплавці утворюються корозійно-втомні тріщини [15], які розвиваючись можуть проникнути в основний матеріал корпусу реактора. Тому для оцінки безпечної експлуатації (роботоздатності) таких об'єктів, а також призначення своєчасних термінів їх профілактичних оглядів, необхідні дані про циклічну корозійну тріщиностійкість матеріалів та зон сплавлення зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь».

З цією метою були реалізовані такі випробування. За спеціальною методикою [5], що забезпечувала сталість електрохімічних умов у вершині корозійно-втомної тріщини, були експериментально встановлені інваріантні [16, 17] діаграми циклічної тріщиностійкості ($da/dN - \Delta K_I$ діаграми) досліджуваних матеріалів і зон сплавлення зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Під час експериментів частота циклічного навантаження зразків становила $f = 0,017$ Гц, що є найбільш близьким до реальних експлуатаційних умов енергетичних реакторів [15]. Як базис, були визначені також діаграми циклічної тріщиностійкості матеріалів зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» на повітрі, коли частота навантаження $f = 1$ Гц, а коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0$ (рис. 5). Результати досліджень представляли залежностями швидкості росту втомної тріщини da/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I . Одержані експериментальні дані аналітично описано за допомогою відомої степеневі залежності Періса [16]:

$$da/dN = C(\Delta K_I)^n, \quad (24)$$

Таблиця 4. Значення констант у рівнянні (24) для опису діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалів та зон сплавлення зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» при різних умовах випробування

Матеріал	Повітря, $f = 0,1$ Гц			pH 8, $f = 0,017$ Гц		
	C	n	R^2	C	n	R^2
04X20H10Г2Б	$3 \cdot 10^{-11}$	2,68	0,98	$1 \cdot 10^{-13}$	4,67	0,92
ЗС-I	$8 \cdot 10^{-14}$	4,37	0,99	$2 \cdot 10^{-14}$	5,05	0,84
07X25H13	$5 \cdot 10^{-12}$	3,17	0,98	$1 \cdot 10^{-13}$	4,45	0,91
ЗС-II	$2 \cdot 10^{-11}$	2,79	0,98	$2 \cdot 10^{-16}$	6,08	0,88
15X2МФА	$7 \cdot 10^{-12}$	3,04	0,98	$2 \cdot 10^{-13}$	4,02	0,87

де C, n — константи системи «матеріал–середовище» і умов випробувань. Для розглянутих умов випробувань їх значення наведено в табл. 4.

На цій основі розраховано узагальнені діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості, що дозволяють оцінювати та прогнозувати розвиток втомних тріщин як в да-

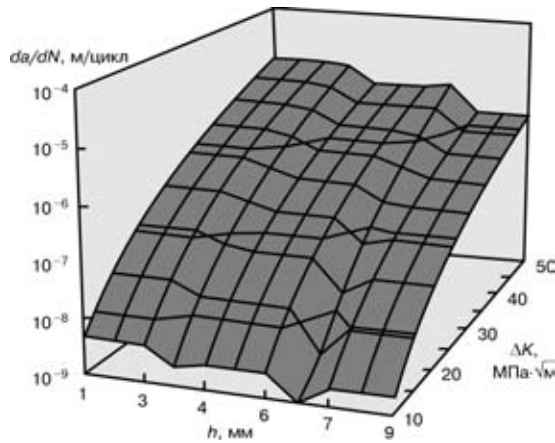


Рис. 6. Узагальнена діаграма циклічної корозійної тріщиностійкості зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» (середовище рН 8; 80 °С; $f = 0,017$ Гц; $R = 0$)

ному зварному з'єднанні в цілому, так і в його окремих елементах залежно від умов випробувань (рис. 5, 6).

З одержаних результатів витікає, що наявність водного робочого середовища суттєво змінює параметри циклічної тріщиностійкості матеріалів та зон сплавлення зварного з'єднання як в якісному, так і в кількісному сенсі. В даному випадку їм властиві риси, що характерні для корозійної втоми з одночасною дією процесу корозійного розтріскування під напруженням [5, 16]. За цих умов найнижчу циклічну корозійну тріщиностійкість має наплавка 04X20H10Г2Б, а найвищу — корпусна сталь 15X2МФА. Наплавка 07X25H13 займає проміжне місце, і це властиво для всього досліджуваного діапазону швидкостей росту корозійно-втомної тріщини. При цьому циклічна корозійна тріщиностійкість зон сплавлення є вищою від тріщиностійкості суміжних матеріалів. Особливо це помітно для зони сплавлення «наплавка 07X25H13–корпусна сталь 15X2МФА» у низькоамплітудній області діаграми. Зростання рівня прикладеного навантаження (збільшення значення) призводить до втрати зоною сплавлення характеристик міцності й у високоамплітудній області діаграми швидкість росту тріщини в ній є вищою ніж у наплавці 07X25H13 та сталі 15X2МФА.

Висновки

1. Розроблено нові експериментально-аналітичні методи оцінки локальної корозії та локального руйнування зварних з'єднань типу «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Сформована розрахункова модель та аналітично-чисельний метод визначення густини корозійних струмів на поверхні кругової циліндричної виразки у зварному з'єднанні, що являє собою багатопарове тіло, і показано, що густина корозійного струму з поверхні циліндричної виразки в такому тілі зростає із збільшенням радіуса виразки,

The paper describes experimental-analytical methods of evaluation of local corrosion and local fracture of welded joints of the type of «anticorrosion cladding–casing steel». The constructed diagrams of electrochemical resistance and corrosion crack resistance of multilayer welded joints may be the basis for evaluation of the residual life of the considered joints.

а також зменшується із ростом глибини проникання виразки в базовий матеріал. При цьому встановлено також, що при всіх глибинах виразки базовий матеріал є анодом.

2. Побудовано діаграми електрохімічної стійкості та корозійної тріщиностійкості багатопарових зварних з'єднань типу «антикорозійна наплавка–корпусна сталь», які є базовими для оцінки залишкового ресурсу такого з'єднання, та розробки інженерно-технічних заходів для запобігання їх корозійно-механічних пошкоджень в умовах довготривалої експлуатації.

1. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів* // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2002. — Спец. випуск № 3. — Т. 1–2.
2. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components* // ISO Standard Proposal. Intern. Inst. of Welding; XIII-1539-96. — XV-845-96.
3. *Eurocode 3 «Design of steel structures» and National Application Document — Part 1-1: General rules and rules for buildings. — Chapter 9: Fatigue. — 1992. — P. 22-311-9.*
4. *Дослідження та оцінка процесів корозійного руйнування зварних з'єднань різної геометрії на основі розгляду локальних синергетичних чинників концентрації напружень та робочого середовища в зоні зварного шва* // НДР № 0100U004860: ФМП ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2002. — 193 с.
5. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. — Львів: Вид. ФМП ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 1999. — 341 с.
6. *Никитин В. И.* Исследование коррозионной стойкости стали в водном теплоносителе ВВЭР с борным регулированием // Энергомашиностроение. — 1980. — № 3. — С. 21–24.
7. *Фрейман Л. И., Макаров В. А., Брыскин И. Е.* Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. — Л.: Химия, 1972. — 240 с.
8. *Скорчелетти В. В.* Теоретическая электрохимия. — Л.: Госхимиздат, 1963. — 608 с.
9. *Скорчелетти В. В.* Теоретические основы коррозии металлов. — Л.: Химия, 1973. — 263 с.
10. *Розенфельд И. Л.* Коррозия и защита металлов (локальные коррозионные процессы). — М.: Металлургия, 1970. — 448 с.
11. *Колодій Б. І., Дмитрах І. М., Білий О. Л.* Метод еквівалентного електрода при визначенні корозійних струмів в тріщинах і щілинах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2002. — № 5. — С. 27–31.
12. *Дмитрах І. М., Колодій Б. І., Білий О. Л.* Визначення густини електрохімічного струму з поверхні корозійних виразок в тришаровому матеріалі // Там же. — 2003. — № 3.
13. *Turnbull A., Ferris F. H.* Mathematical modelling of the electrochemistry in corrosion fatigue cracks // Corrosion Chem. Pits, Crevice and Cracks: Procon. Conf. Teddington, 1–3 Oct., 1984. — London, 1987. — P. 357–395.
14. *Pourbaix M.* Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solution. — Oxford: Pergamon press, 1966. — 174 p.
15. *Анализ размеров дефектов в сварных корпусах энергетического оборудования и их влияние на сопротивление разрушению* / В. В. Аниковский, В. А. Игнатов, Б. Т. Тимофеев и др. // Вопр. судостроения. Сер. Сварка. — 1982. — № 34. — С. 17–32.
16. *Panasjuk V. V.* Strength and fracture of solids with cracks. — Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute. — 2002. — 468 p.
17. *Панасюк В. В., Ратвич Л. В., Дмитрах И. Н.* Определенные базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости сталей с учетом экстремальных электрохимических условий в трещине // Докл. АН СССР. — 1986. — 266, № 5. — С. 1128–1131.

Надійшла до редакції 07.05.2003



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены характерные особенности сварных соединений ответственных конструкций длительного срока эксплуатации, требующие определенных подходов при оценке проектного ресурса, особенно остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Рассмотрена возможность использования для этих целей современных подходов механики разрушения в сочетании с достаточно быстро развивающимися методами риск-анализа.

Ключевые слова: остаточный ресурс, мониторинг реальной нагруженности, диагностика состояния, горячие точки, остаточные напряжения, диаграмма определения разрушения, вероятностные подходы, обеспеченность расчета, риск-анализ

Современные ответственные сварные конструкции длительного срока эксплуатации (магистральные трубопроводы, мосты, крупные нефте- и газохранилища, корпуса энергетических атомных реакторов, хранилища химических активных и радиоактивных материалов и пр.) — дорогостоящие сооружения, к которым предъявляются высокие требования безопасности эксплуатации, обеспечиваемые соответствующими мероприятиями, предусмотренными при проектировании и особенно в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных мероприятий следует выделить мероприятие, связанное с оценкой остаточного ресурса безопасной эксплуатации конкретной конструкции.

В общем случае такая оценка производится на основе результатов мониторинга реальной нагруженности конструкции, диагностики состояния материала и наличия дефектов, а также соответствующих расчетных схем (кодов) оценки крити-

ческих состояний в «горячих точках» конструкции. Как показывает статистика, 70...80 % отказов в сварных конструкциях связано со сварными соединениями, хотя объем зоны сварных соединений в современных конструкциях не превышает 1,0...1,5 % общего объема. Иными словами, значительная часть «горячих точек» в современных сварных конструкциях приходится на сварные соединения, поэтому методические вопросы оценки остаточного ресурса последних, с учетом их характерных особенностей являются достаточно актуальными. Характерными особенностями сварных соединений с позиций прочности принято считать следующие:

появление после сварки остаточных сварочных напряжений, роль которых может быть весьма значительной в условиях хрупкого разрушения [1], переменных нагрузок [2], коррозионных разрушений [3] и др.;

наличие высоких концентраторов напряжений (рис. 1, 2), связанных с конструктивными особенностями (например, примыкающими острыми полостями) либо технологическими дефектами (непроварами, подрезами, горячими и холодными

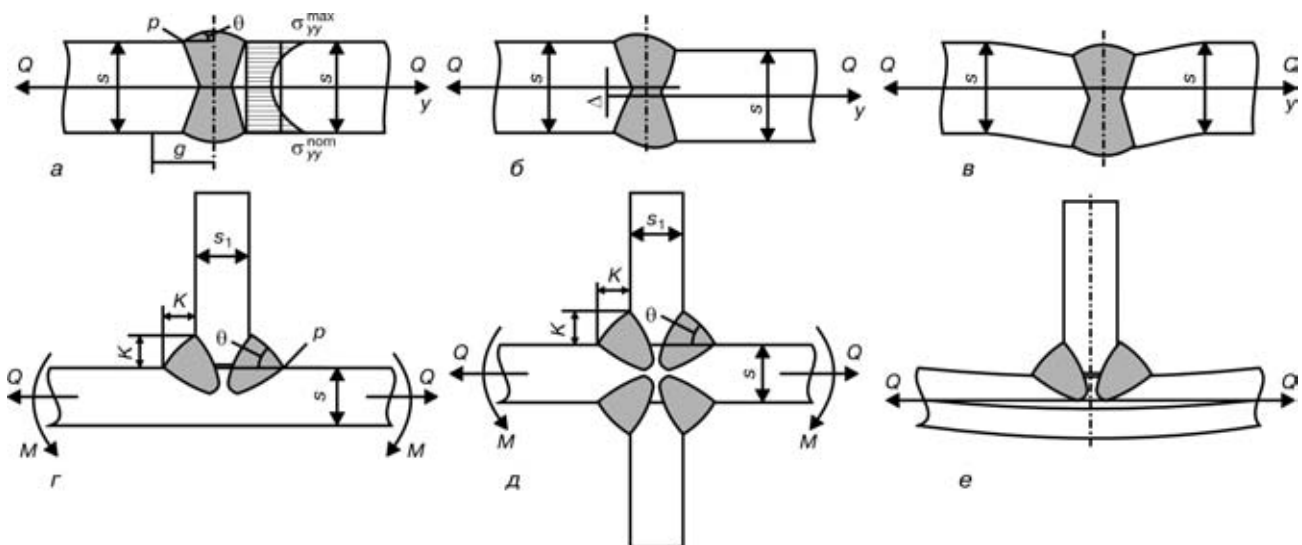


Рис. 1. Геометрические особенности сварных соединений со стыковыми (а-в) и угловыми (г-е) швами [4]



трещинами и пр.), роль которых также весьма существенна в условиях хрупких и усталостных разрушений;

неоднородность физико-механических свойств в зоне сварного соединения (рис. 3), обусловленная различием в химическом составе (зона плавления, зона термического влияния (ЗТВ)), и термических циклов при сварке, что требует специальных подходов при диагностических измерениях и выборе расчетных значений [4, 5].

Следует отметить, что за последние 10...15 лет сделано очень много для учета указанных особенностей в прочностных расчетах сварных соединений [4–6 и др.]. Этому способствовало развитие вычислительной техники, на основе которой появился ряд работ по термомеханике сварки [7, 8 и др.], по использованию механики разрушения тел с трещинами для расчета сварных соединений [6, 9 и др.], по использованию вероятностных методов для отражения стохастичности в количественных оценках характерных параметров, связанных с геометрией соединения, его нагруженности и сопротивлением соответствующему деформированию либо разрушению [10, 11 и др.]. Не менее важным благоприятствующим фактором являлось развитие методов диагностики сварных соединений как для выявления дефектов с определением их формы и размеров, так и количественной оценки степени деградации характеристик сопротивления материала тому или иному виду разрушения [12, 13 и др.].

Тем не менее, еще многое следует сделать для эффективного использования разработанных подходов в практике эксплуатации рассматриваемых конструкций, значительная часть которых проектировалась еще в 1950–1960-х гг. и их эксплуатационные коды отражают научно-технический уровень того времени.

В настоящей работе рассмотрены некоторые результаты исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона, в части, связанной с совершенствованием методов оценки остаточного ресурса сварных соединений на основе современных подходов, учитывающих указанные особенности. В частности, рассматриваются вопросы о критериях предельных состояний, остаточных напряжениях, диагностике дефектов и деградации свойств; вероятностных подходах и риск-анализе.

1. Критерии предельных состояний сварных соединений рассматриваемых конструкций. Этот вопрос достаточно освещен в современной литературе [4]. В рамках подходов к местной прочности с учетом большого риска трещинообразных дефектов (примыкания острых полостей) широкое признание получил критерий ненарушения равновесия трещинообразного дефекта соответствующего происхождения (конструктивного, технологического, эксплуатационного, гипотетического) в виде функции от двух параметров [14]

$$f(K_r, L_r) = 0, \tag{1}$$

где K_r характеризует сугубо хрупкое разрушение в рассматриваемой зоне сварного соединения с заданным трещинообразным дефектом; L_r — вязкое разрушение для той же зоны и того же трещинообразного дефекта. Параметры K_r и L_r — комплексные параметры и состоят из характеристик (инвариант) напряженно-деформированного состояния, формы и размеров дефекта, а также свойств материала в «горячей точке», определяющих сопротивление соответственно хрупкому и вязкому разрушению [14].

Существуют различные представления для (1), основанные главным образом на обобщении экспериментальных данных, типа приведенных на рис. 4 из работы [14]. Кривые рис. 4 хорошо аппроксимируются зависимостью [14]

$$K_r(L_r) = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)] \text{ при } L_r < L_r^{\max},$$

$$K_r(L_r) = 0 \text{ при } L_r > L_r^{\max}, \tag{2}$$

где $K_r = K_1/K_{IC}\eta$; $L_r = P/P_L(\sigma_r)$; K_1 — коэффициент интенсивности напряжений на контуре трещинообразного дефекта; K_{IC} — сопротивление материала хрупкому разрушению (критическое значение K_1); $\eta \geq 1$ — поправка, учитывающая частично отличие рассматриваемого дефекта от трещины в условиях плоской деформации; $P_L(a, \sigma_r)$ — значение параметра P_L , вызывающего пластическую не-

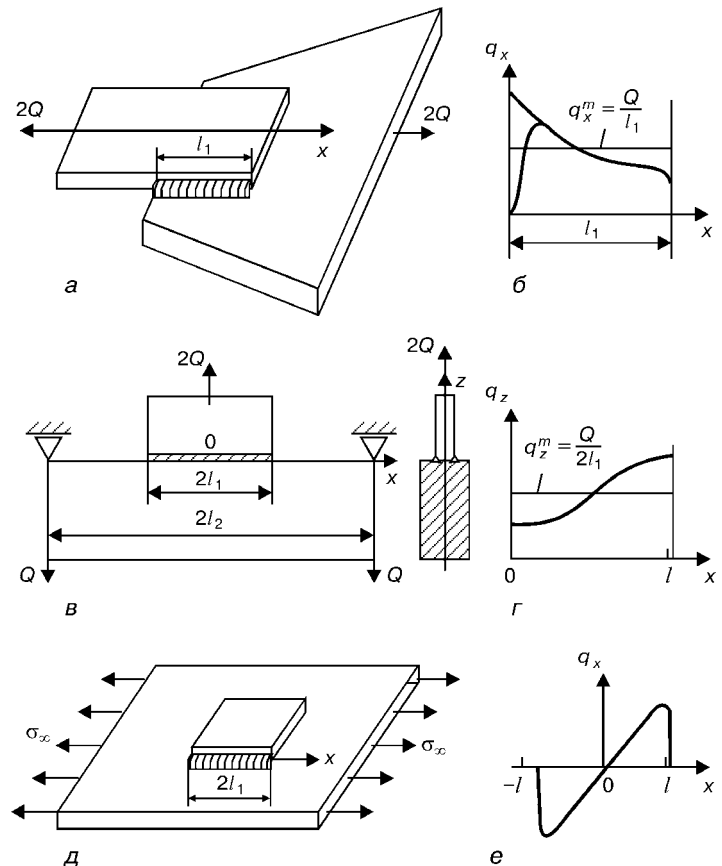


Рис. 2. Геометрические особенности соединения, обусловленные формой сварного узла с угловыми швами (а, в, д), и схемы распределения усилий вдоль сварного шва (б, г, е) [4]

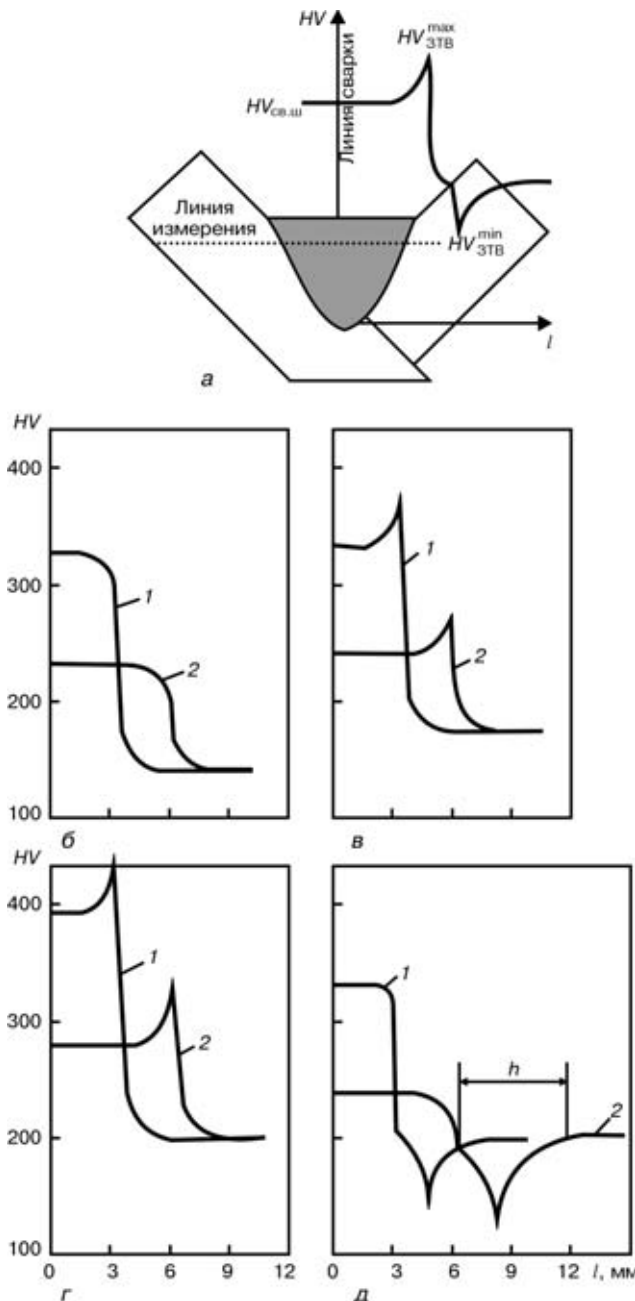


Рис. 3. Распределение твердости HV в сечении соединения с угловым швом катетом 4 (1) и 8 мм (2) по схеме измерения (а) при сварке сталей ВСтЗ (б), 10Г2С (в) и 16Г2АФ (г) в неупрочненном состоянии и стали ВСтЗ (д) в упрочненном

устойчивость в зоне этой же трещины с геометрическими размерами a при условии идеальной пластичности материала, имеющего предел текучести $\sigma_T = \sigma_{0,2}$; $L_r^{\max} = \sigma_B + \sigma_T/2\sigma_T$; σ_B — временное сопротивление материала.

В случае многоосного напряженного состояния у вершины трещины зависимость (2) можно использовать в рамках теории обобщенного нормального отрыва [1, 5], подставив вместо K_I параметр $K_{\omega\theta}^{\max}$ — максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в соответствующей точке вершины по [15]. С учетом нерелаксированных остаточных напряжений σ_{ij}^r величина $K_{\omega\theta}^{\max}$ рассчитывается по следующей формуле:

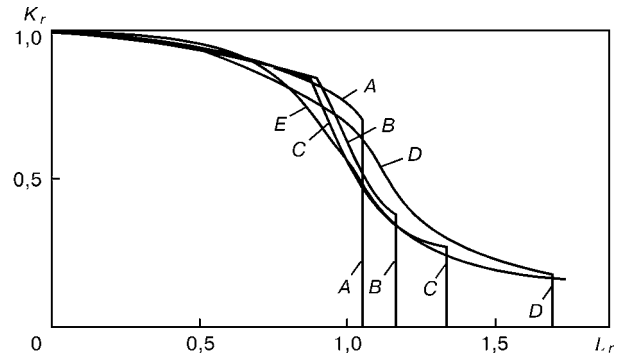


Рис. 4. Диаграммы предельного состояния $K_r = f(L_r)$ для конструкционных сталей разного типа: А — высокопрочная сталь EN 408; В — сталь для сосудов давления А533В; С — низкоуглеродистая сталь с марганцем; D — аустенитная сталь; E — расчетная кривая по (2)

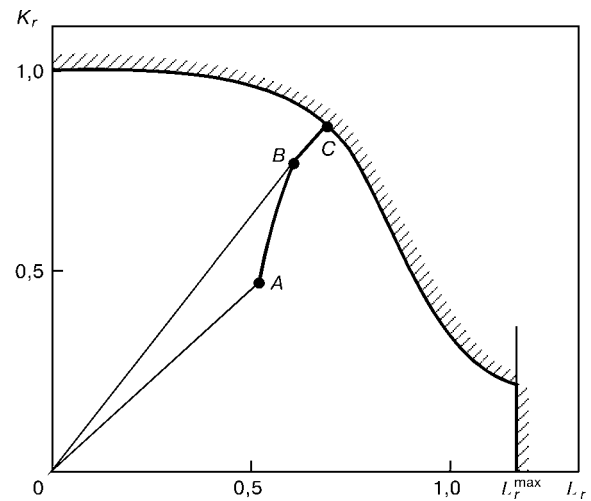


Рис. 5. ДОР и схема траектории ABC кинетики развития разрушения в «горячей точке»

$$K_{\omega\theta} = [(K_I + K_I^r) \cos^3 \frac{\omega}{2} - 3(K_{II} + K_{II}^r) \cos^2 \frac{\omega}{2} \sin \frac{\omega}{2}] \cos^2 \theta + (K_{III} + K_{III}^r) \cos \frac{\omega}{2} \sin 2\theta \quad (3)$$

при значениях углов $\omega = \omega_*$, $\theta = \theta_*$, определяемых условиями

$$\frac{\partial K_{\omega\theta}}{\partial \omega} = 0; \quad \frac{\partial K_{\omega\theta}}{\partial \theta} = 0,$$

где K_I, K_{II}, K_{III} — моды коэффициента интенсивности напряжений от внешней нагрузки, определяемой параметром P ; $K_I^r, K_{II}^r, K_{III}^r$ — то же от нерелаксированных остаточных напряжений.

Величины $P_L(a, \sigma_T)$ также определяются с учетом многоосности напряженного состояния при наступлении пластической неустойчивости.

Характерно, что остаточные напряжения не оказывают влияния на величину $P_L(a, \sigma_T)$, поскольку успевают почти полностью релаксироваться до наступления пластической неустойчивости. То же имеет место и относительно эксплуатационных температурных напряжений, поэтому в работе [14] рекомендуют при расчете L_r не учитывать как остаточные, так и эксплуатационные температурные напряжения.

В процессе эксплуатации возрастает вектор геометрических размеров дефекта a , а также происходит в определенной степени деградация свойств (в частности, снижение K_{IC}), что приводит к увеличению величин K_r и L_r по диаграмме оценки разрушения (ДОР) (рис. 5), т. е. состояние в рассматриваемой «горячей точке» в процессе эксплуатации будет определяться точкой B вдоль траектории ABC .

Если в точке A коэффициент запаса прочности n определяется отношением отрезков $n = OC/OA$, то в точке B $n = OC/OB$, а в точке C $n = 1$. Таким образом, по мере развития дефекта и деградации материала по ДОР можно оценить риск наступления недопустимого для безопасной эксплуатации состояния.

Из приведенного выше следует, что в рассматриваемом случае оценка ресурса безопасной эксплуатации тесно связана с оценкой скорости развития вектора геометрических размеров дефекта a и степени деградации свойств материала, в частности вязкости разрушения K_{IC} .

Вопросы роста геометрических размеров трещинообразного дефекта в настоящее время достаточно широко освещены в современной литературе. Здесь в основном выделяют три характерных механизма образования этого дефекта: усталостный при переменных нагрузках, за счет коррозии и за счет ползучести при статических нагрузках.

В общем случае с определенной степенью идеализации, т. е. считая, что все три эти механизма могут проявляться независимо, для трещины нормального отрыва получаем

$$\frac{da}{dt} = \frac{C_y}{t_{\text{ц}}} \Delta K_I^m (K_I^{\text{max}})^s + C_{\text{кор}} (K_I^{\text{cp}})^q + C_{\text{пол}} (K_I^{\text{cp}})^p,$$

где t — текущее время; $t_{\text{ц}}$ — время одного цикла; C_y , m , s — экспериментальные параметры диаграммы циклической трещиностойкости; $C_y = 0$ при ΔK_I — размахе коэффициента интенсивности напряжений меньше порогового значения ΔK_{th} [4]; $C_{\text{кор}}$, q — параметры роста трещины межкристаллитной коррозии под напряжением [16]; $C_{\text{пол}}$, p — параметры роста трещины ползучести [17]; $K_I^{\text{cp}} = K_I^{\text{max}} - \Delta K_I/2$. Особенности сварного соединения здесь проявляются только в необходимости учета остаточных напряжений при вычислении K_I^{max} , а также в достаточно высокой стохастичности в численных значениях указанных параметров.

2. Остаточные напряжения. Из изложенного выше следует, что роль нерелаксированных остаточных напряжений при оценке остаточного ресурса сварных соединений может быть достаточно существенной, особенно при наличии дефектов, переменных циклических нагрузок, коррозионной среды. С помощью ДОР (см. рис. 5) нетрудно сделать определенные оценки влияния остаточных напряжений. Поскольку остаточные напряжения не влияют на L_r , а величину K_r^A в точке A на ДОР можно представить в виде суммы $K_r^A = K_r + K_r^r$, где K_r определяется внешней на-

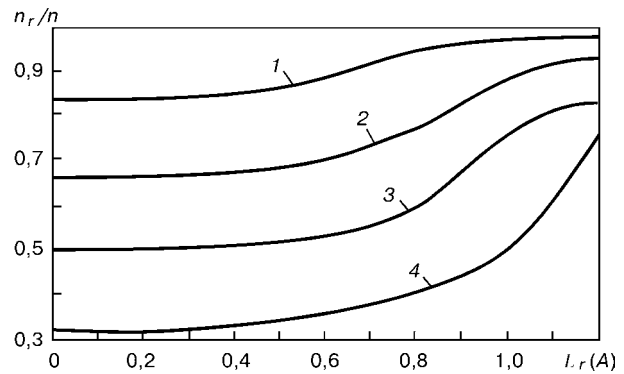


Рис. 6. Влияние остаточных напряжений на n_r/n в зависимости от $L_r(A)$: 1 — $K_r^r/K_r(A) = 0,2$; 2 — 0,5; 3 — 1,0; 4 — 2,0

рузкой (силовой либо температурной), а K_r^r — остаточными напряжениями. Отношение запасов прочности соответственно с учетом остаточных напряжений n_r и без учета последних n находится из выражения

$$\frac{n_r}{n} = \frac{L_r^r}{L_r},$$

где $L_r(K_r^A)$ и $L_r(B_1)$ — решения трансцендентного уравнения

$$\frac{K_r}{L_r} = \frac{f_1(L_r)}{L_r}, \quad \frac{K_r + K_r^r}{L_r^r} = \frac{f_1(L_r^r)}{L_r^r},$$

здесь $f_1(x)$ — правая часть выражения (2) при $x = L_r, L_r^r$. На рис. 6 приведены отношения n_r/n в зависимости от $L_r(A)$ и K_r^r/K_r . Как видно из рисунка, чем больше значения $L_r(A)$, тем меньше влияние остаточных напряжений. При $L_r(A) < 0,7$ роль остаточных напряжений заметна уже при $K_r^r/K_r > 0,2$. Поскольку даже высокий отпуск сварной конструкции обычно оставляет в зоне сварных соединений нерелаксированные напряжения на уровне 50... 120 МПа, то при эксплуатационных нагрузках, соответствующих рабочим напряжениям 250... 350 МПа, влиянием нерелаксированных остаточных напряжений не следует пренебрегать при оценке ресурса сварных соединений в рассматриваемой постановке задачи. Иными словами, одной из задач диагностики состояния сварных соединений конструкций на различных стадиях эксплуатации является определение нерелаксированных остаточных напряжений. К сожалению, пока большинство неразрушающих (полунанализирующих) методов [18] позволяет определить только остаточные напряжения в поверхностных (доступных для измерения) слоях либо средние по толщине листа напряжения [19, 20], что далеко не всегда достаточно для расчета K_r^r .

Более информативны с этих позиций современные методы нейтронной дифракции [21] и высокоэнергетической синхротронной дифракции [22]. Однако их использование возможно пока в основном в лабораторных условиях, при этом необходимо дорогостоящее оборудование.

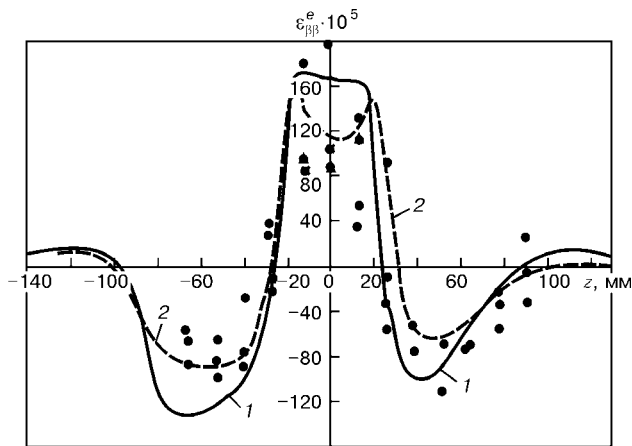


Рис. 7. Сопоставление расчетных (кривые) и экспериментальных (точки) данных по распределению остаточных деформаций ϵ_{pp}^e на внутренней (1) и наружной (2) поверхностях трубы (зазор 4...6 мм) вдоль оси трубы

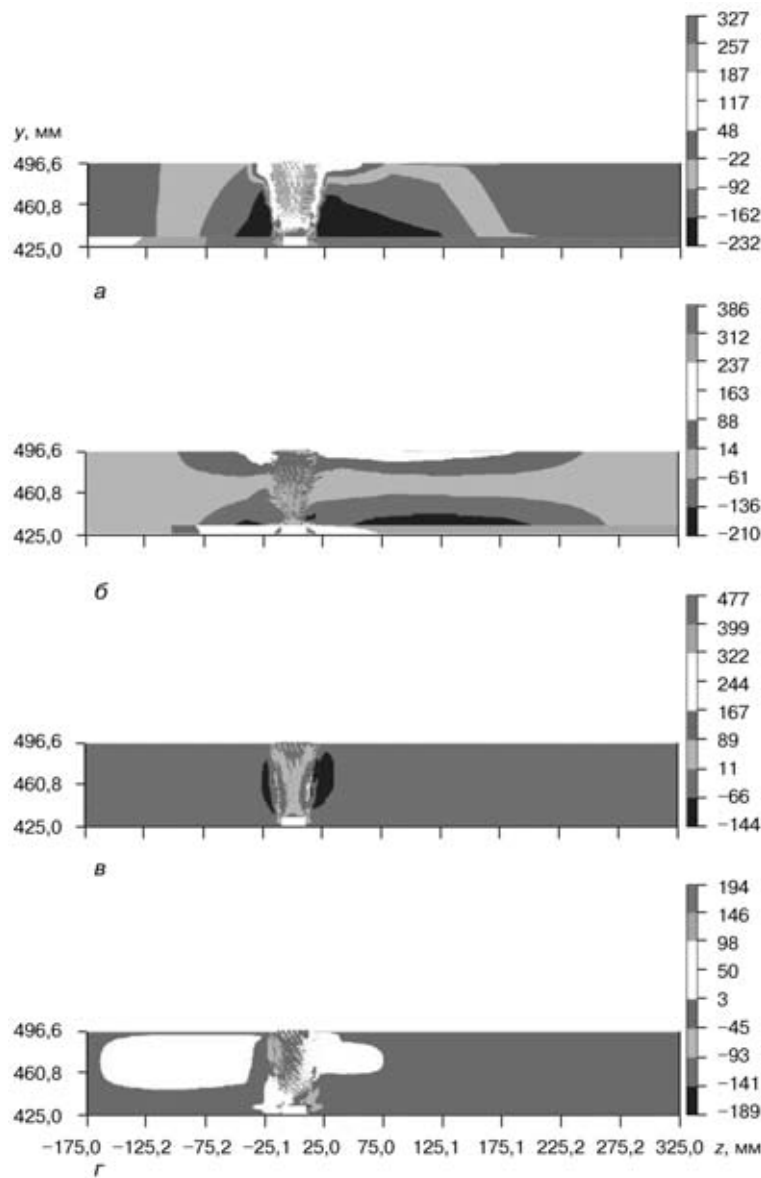


Рис. 8. Расчетные данные по распределению остаточных сварочных напряжений после сварки и отпуска кольцевого стыка трубопроводов ДУ 850: а — σ_{pp} ; б — σ_{zz} ; в — σ_{rr} ; г — σ_{rz}

В этой связи, наиболее реальным для применения является сочетание математического моделирования в определенной степени истории формирования остаточных напряжений, включая сварку и релаксационные воздействия (отпуск, силовое нагружение), с экспериментальными измерениями в отдельных точках поверхности неразрушающими (полуразрушающими) методами. Цель такого эксперимента — валидация расчетных данных, используемых при определении K_r^r .

Примеры применения указанного сочетания приведены на рис. 7–9. Результаты, приведенные на рис. 7, соответствуют оценке остаточных напряжений в зоне кольцевого стыка трубопроводов ДУ 300 3-го блока Чернобыльской АЭС. Эта работа выполнена в связи с необходимостью обоснования допустимости отдельных выявленных дефектов ЗТВ (типа межкристаллитных коррозионных трещин) на период эксплуатации до предстоящего планового ремонта. Полученные результаты детально освещены в работе [9], поэтому останавливаться на этом подробно нет необходимости.

Следует только отметить, что работа выполнена в 1998 г., т. е. более пяти лет назад. За это время возможности вычислительной техники заметно возросли — появились доступные коммерческие пакеты программ для подобных вычислений, например SISWELD.

На рис. 8, 9 приведены данные, связанные с оценкой остаточных напряжений в зоне кольцевых швов трубопроводов ДУ 850 Южно-Украинской АЭС. Эти данные, полученные в 2002 г., свидетельствуют о решении более сложной задачи: многослойная сварка за 112 проходов, наплавка коррозионностойкого слоя, высокий отпуск при температуре 650 °С, основной металл — сталь 10ГН2МФА, весьма чувствительная к микроструктурным изменениям при сварке и пр.

Несомненно, что в ближайшем будущем можно ожидать еще больших успехов в развитии расчетных методов, основанных на возрастающих возможностях вычислительной техники, поэтому указанный путь определения остаточных нерелаксированных напряжений в зоне сварных соединений достаточно перспективен.

3. Диагностика дефектов и деградация свойств. Диагностика состояния сварных соединений включает выявление различных геометрических дефектов и оценку изменения механических свойств, ответственных за безопасную эксплуатацию.

Геометрические дефекты обычно выявляют с помощью неразрушающих методов. В этом направлении сосредоточено внимание многих специалистов из раз-

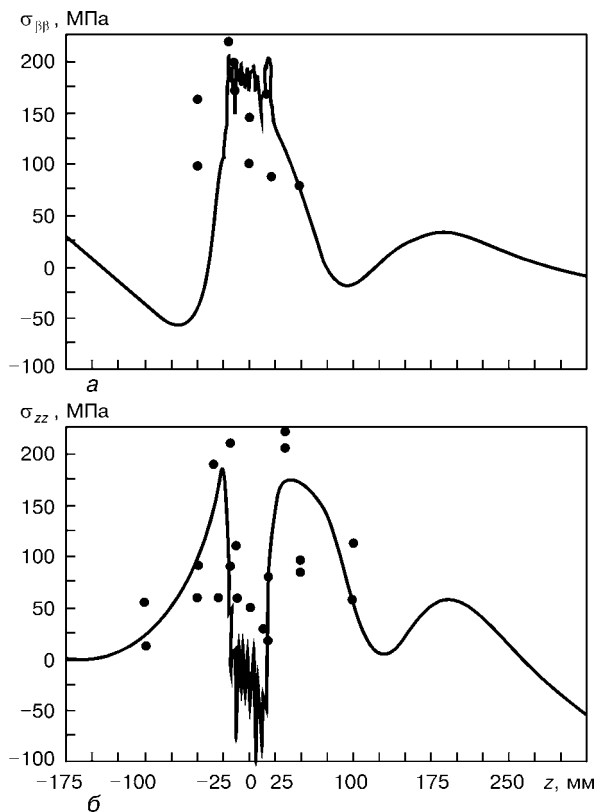


Рис. 9. Сопоставление расчетных данных (кривые) остаточных напряжений $\sigma_{yy}(z)$ (а) и $\sigma_{zz}(z)$ (б) на наружной поверхности в зоне стыка после высокого отпуска с экспериментальными (точки)

ных стран мира. Геометрические дефекты делят обычно на две группы. К первой относятся дефекты формы, обусловленные изменением конструктивных геометрических размеров в процессе эксплуатации или изготовления (эксплуатационные вмятины либо угловатости в зоне сварных стыков при изготовлении и др.); ко второй группе — дефекты сплошности материала, которые характеризуются локальным нарушением последнего (эксплуатационные и технологические трещины, подрезы, непровары, поры, коррозионные дефекты и т. д.).

С позиций оценки работоспособности сварного узла (соединения) с геометрическими дефектами очень важно знать размеры и положение дефекта, а также его происхождение. В этом направлении, особенно в отношении трещинообразных дефектов сплошности, существует еще много проблем в современной диагностике, рассмотрение которых не входит в рамки настоящей работы. Следует только отметить, что мировая научно-техническая мысль работает в этом направлении весьма активно, о чем свидетельствуют ежегодные международные конференции по неразрушающим методам контроля в Европе и по количественным неразрушающим методам определения (QNDE, которые обычно проводятся в США), на которых обсуждаются сотни докладов, связанных с совершенствованием методов обнаружения и идентификации геометрических дефектов сплошности материала.

Значительно хуже обстоит дело с диагностикой количественных характеристик сопротивления материала тем или иным видам разрушения. В час-

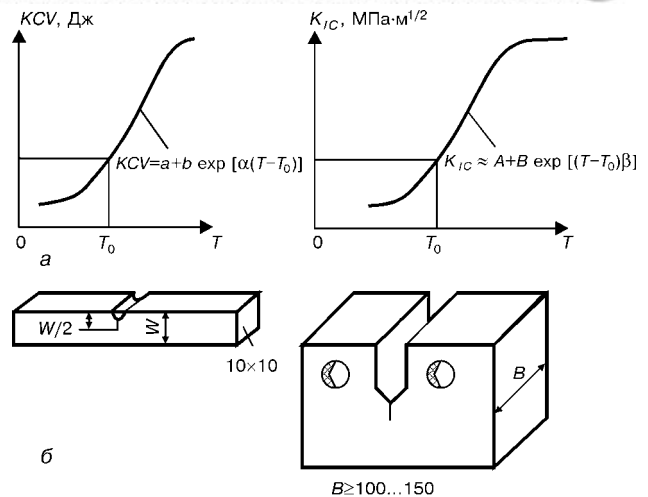


Рис. 10. Результаты испытания на ударную вязкость на образцах Шарпи (а) и определение K_{IC} на компактном образце толщиной B (б), а также эмпирические зависимости, описывающие эти результаты

тности, определение характеристик ДОР (см. рис. 5) связано с необходимостью получения данных по вязкости разрушения материала K_{IC} . При этом требуются достаточно крупные образцы, изготовить которые из материала исследуемой конструкции во многих случаях физически невозможно. Обычно в таких случаях используют результаты косвенных испытаний на маломерных образцах, например результаты испытаний на ударную вязкость на образцах Шарпи с определенным пересчетом, основанном на допущении, что в результате деградации свойств происходит изменение критической температуры хрупкости на величину ΔT_k и соответственно происходит смещение температурной кривой $K_{IC}(T)$ по температуре на ΔT_k . Величина ΔT_k определяется путем сопоставления кривых $KCV(T)$ в исходном состоянии и на данном этапе эксплуатации (рис. 10). К сожалению, далеко не всегда такой подход применим и правомерен, поэтому поиск способов оценки K_{IC} на маломерных образцах представляет значительный практический интерес.

Следует отметить, что в этом направлении существует много различных предложений типа $K_{IC} = C\sqrt{KCV}$, где для стали $C = 19$; KCV , Дж, и K_{IC} , $MPa \cdot m^{1/2}$, что позволяет использовать только испытания на ударную вязкость.

Более сложная зависимость

$$K_{IC} = \sqrt{\rho \tau_s \frac{E}{1 - \nu^2} \ln(1 - \psi)^{-1}}, \quad (4)$$

где ρ — линейный размер структурного элемента; τ_s — предел текучести на срез; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуансона; ψ — поперечное сужение при разрушении растяжением стандартных образцов небольшого сечения.

Примеры расчета по (4) приведены на рис. 11. К сожалению, эта зависимость также не является универсальной, как и многие другие, не учитывающие физику деградации материала.

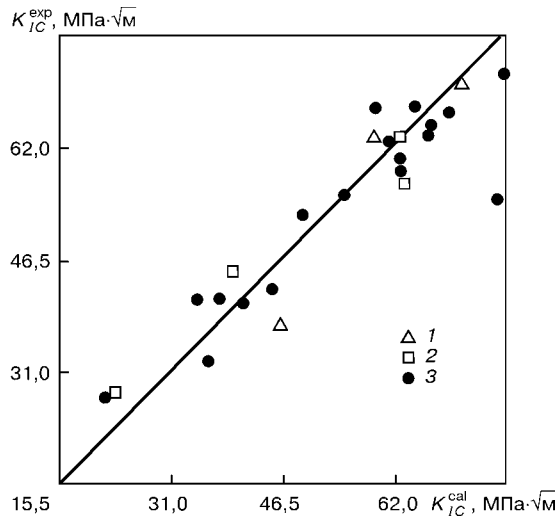


Рис. 11. Сопоставление результатов расчетных данных K_{IC}^{cal} по (4) и экспериментальных K_{IC}^{exp} для сталей 4340 (1), 45ХН2МФА (2) и 40Х (3)

Например, в случае радиационного облучения корпусной стали при температурах порядка 300 °С грубая микроструктура в первом приближении сохраняется, т. е. $\rho = const$, величина τ_s немного возрастает, а ψ несколько снижается. В этом случае из (4) трудно получить резкое уменьшение K_{IC} , связанное с диффузией фосфора и приводящее к снижению прочности границ зерен и др. [23]. Иными словами, характеристики ρ , τ_s , E , ψ , ν недостаточно чувствительны к влиянию перераспределения фосфора при радиационном облучении корпусной стали, в то время как величина K_{IC} достаточно чувствительна к этому явлению. Приведенный пример показывает, что при неразрушающих методах измерения механических свойств вектор измеряемых параметров X_i должен быть достаточно чувствителен к физическим изменениям в материале, от которых зависит искомая трудноизмеряемая характеристика, например K_{IC} .

В последние годы для оценки K_{IC} в тонкостенных конструкциях на основе испытания достаточно ограниченных образцов применяется метод «Master Curve». Согласно этому методу при ис-

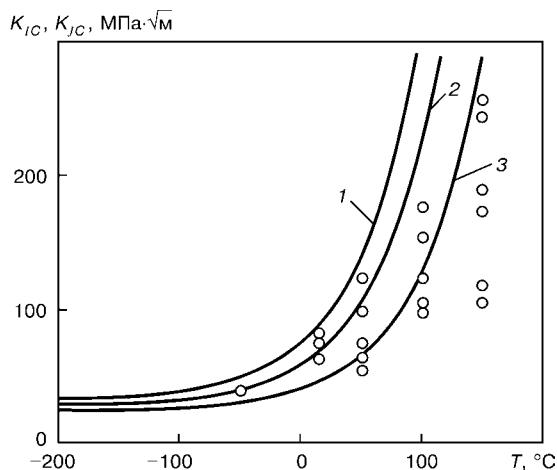


Рис. 12. Сопоставление результатов расчета по методу «Master Curve» и экспериментальных данных, полученных на образце толщиной $B = 50$ мм [24]: 1 – $P_f = 0,95$; 2 – 0,50; 3 – 0,05

пытании образцов ограниченных размеров, например 1Т-СТ на рис. 10, толщиной $B_1 = 25$ мм, определяют вероятность $P_f(K_{IC}, B_1)$, экспериментальная величина K_{I1} , при которой происходит разрушение, меньше $K_{IC}(B_1)$. Делают допущение, что эта величина определяется трехпараметрическим распределением Вейбулла в виде

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_{IC}(B_1) - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)^\eta \frac{B_1}{B_0} \right], \quad (5)$$

где K_{min} , K_0 , B_0 и η – параметры указанного распределения. Если $\eta = 4,0$, то из (5) следует известная формула пересчета

$$K_{IC}(B_1, P_f) = [K_{IC}(B_1, P_f) - K_{min}] \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1/4} + K_{min}.$$

Использование такого пересчета также далеко не всегда удовлетворяет практику. Пример такого расхождения показан на рис. 12, что свидетельствует о недостаточно обоснованном допущении, связанном с зависимостью (5).

В этой связи заслуживают внимания методы, основанные на удобных измерениях и достаточно глубоких математических моделях, которые учитывают физику локальных изменений в материале, ответственных за величину K_{IC} . Один из таких методов, развиваемый российским специалистом Б. З. Марголиным, заслуживает особого внимания.

Рассматривается образец для стандартного испытания при определении K_{IC} растяжением (см. рис. 10) либо трехточечным изгибом. Напряженное состояние в зоне у вершины трещины (рис. 13) однозначно определяется условиями нагружения, с помощью которых находят по стандартным зависимостям [24] текущее и критическое значения K_{IC} .

Поликристаллический материал образца представляется как совокупность элементарных ячеек, размеры ρ которых соответствуют среднему размеру зерен. Этот параметр может быть определен неразрушающими методами в зоне «горячих точек».

Для ячейки принят локальный критерий хрупкого разрушения в виде

$$\sigma_1 \geq \sigma_d - m_r(T)m_\epsilon(K)(\sigma_{eq} - \sigma_y); \quad \sigma_1 \geq S_C(K), \quad (6)$$

где σ_1 – максимальное главное напряжение; σ_{eq} – эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений); σ_d – эффективная прочность зарождения микротрещин скола в данной ячейке, которая является стохастической величиной. Для описания функции распределения этой величины используется трехпараметрическое распределение Вейбулла в виде

$$P(\sigma_d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_d - \sigma_{d0}}{\bar{\sigma}_d} \right)^\eta \right],$$

где $P(\sigma_d)$ – вероятность того, что минимальная прочность хрупкого разрушения по указанному ме-

ханизму в элементарной ячейке меньше чем σ_d ; σ_{d0} , $\bar{\sigma}_d$, η — параметры Вейбулла.

В зависимости (6) $m_T(T)$ учитывает влияние температуры. В работе [24] предлагается $m_T(T)$ вычислять в виде

$$m_T(T) = |\sigma_y(0) - \sigma_y(T)| m_0,$$

где $\sigma_y(T)$, $\sigma_y(0)$ — предел текучести материала соответственно при температуре T и $T = 0$; m_0 определяется экспериментально;

$$m_\epsilon(K) = \frac{S_0}{S_C(K)} \dots ;$$

где $S_C(K)$ — критическое напряжение хрупкого разрушения; K — параметр Одквиста; $\int d\epsilon_{eq}^p$; $d\epsilon_{eq}^p$ — приращение эквивалентной пластической деформации; $S_0 = S_C(K)$ при $K \equiv 0$.

Величины $\sigma_y(T)$, $S_C(K)$ определяются на образцах малых размеров [24].

Зная напряженное состояние во всех элементарных ячейках зоны у вершины трещины при данном K_I , можно вычислить вероятность хрупкого разрушения образца с трещиной при температуре T

$$P_f(K_I)_T = 1 - \exp \left[- \sum_{i=1}^M \left(\frac{\sigma_e^i - \sigma_{d0}}{\bar{\sigma}_d} \right)^\eta \right] = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_W}{\bar{\sigma}_d} \right)^\eta \right], \quad (7)$$

где $\sigma_W = \left\{ \sum_{i=1}^M (\sigma_e^i - \sigma_{d0})^\eta \right\}^{1/\eta}$ — напряжение Вейбулла; M — количество элементарных ячеек в рассматриваемом объеме V (рис. 13).

При этом $\sigma_e^{(i)} - \sigma_{d0} \equiv 0$, если условия (6) не соблюдаются, т. е. такие ячейки имеют 100%-ю вероятность неразрушения. Если же условия (6) имеют место, то

$$\sigma_e^{(i)} - \sigma_{d0} = \sigma_1^{(i)} + m_T(T) m_\epsilon(K) (\sigma_{eq} - \sigma_y) - \sigma_{d0}.$$

Поскольку условие (6) выполняется в определенной области V вблизи вершины трещины, то это позволяет ограничить величину M . Естественно, что чем толще образец, тем больше значение M . Использование гипотезы плоской деформации, как в [23], позволяет рассматривать напряженное состояние только в плоскости x, y (рис. 13) и величина M уменьшается в V/ρ раз, но при этом соответствующий множитель появляется перед суммой в (7), как в [23]. В рассматриваемой модели параметры Вейбулла не зависят от температуры и могут быть определены на небольших образцах с трещиной (см. рис. 9) при определенной температуре в области низких температур, обеспечивающих хрупкое разрушение, путем моделирования деформационных процессов и обработки эк-

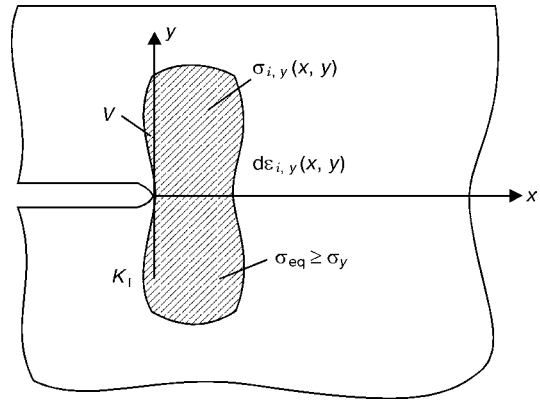


Рис. 13. Схема деформирования в зоне V у вершины трещины экспериментальных данных по (17). После чего можно получить данные для K_{IC} в зависимости от толщины образца и температуры по описанной выше процедуре моделирования деформационных процессов уже в образцах определенной толщины при соответствующих температурах. Пример применения такого подхода [23] приведен на рис. 14.

4. Вероятностные подходы и риск-анализ. Из изложенного выше относительно уровня остаточных напряжений в зоне сварных соединений, диагностирования геометрических размеров дефектов и степени деградации свойств материала следует, что в большинстве случаев детерминистический подход для оценки остаточного ресурса сварных соединений и узлов должен быть заменен вероятностным, учитывающим стохастичу величин остаточных напряжений, размеров дефектов, сопротивления материала разрушению. Вероятностные подходы достаточно успешно применяются при прочностных расчетах в современных областях техники (авиации, отдельных отраслях машиностроения и др.). Теоретические основы таких подходов хорошо известны [24, 25 и др.]. В последние годы эти методы активно распространяются и на сварные конструкции [26].

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан пакет компьютерных программ [27] для расчета на прочность различных сварных соединений с приме-

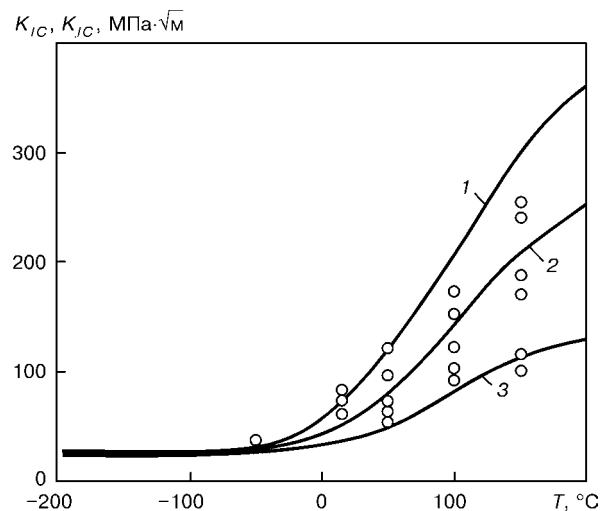


Рис. 14. Сопоставление результатов расчетов (кривые) по методу Б. З. Марголина с экспериментальными данными (точки) из работы [24]: 1-3 — то же, что и на рис. 12



Рис. 15. Схема оценки остаточного ресурса на основе риск-анализа

кающими острыми полостями, в котором наряду с детерминистическим расчетом по заданным коэффициентам безопасности n , включающим коэффициент условия работы m , коэффициент надежности по материалу K_m , коэффициент надежности по назначению K_n , коэффициент надежности по нагрузке K_p , предусмотрен расчет вероятности разрушения P_f по заданным вариациям нагрузки, геометрическим размерам, свойствам материала. Расчетное значение P_f принято называть обеспеченностью расчета [25, 26].

Характерно, что одинаковая обеспеченность расчета, т. е. величина P_f в зависимости от коэффициента вариации ω исходных параметров, требует различных коэффициентов безопасности, что наглядно демонстрируют приведенные в таблице данные из [11] для угловых швов крестообразного сварного соединения, нагруженных статической нагрузкой.

Из таблицы видно, что между значениями коэффициента безопасности n и обеспеченностью расчета P_f нет однозначной зависимости. Важную роль играет коэффициент вариации исходных данных, который далеко не полностью учитывается при назначении коэффициента безопасности. Этот пример показывает, что расчеты, основанные на вероятностном подходе, т. е. учитывающие вариацию исходных данных, более прогрессивны, нежели детерминистические расчеты на основе коэффициента безопасности.

Естественно, вероятностные расчеты более громоздкие, однако при современном уровне вычислительной техники это не столь затруднено. Наиболее существенное препятствие на пути широкого применения вероятностных методов при расчете сварных соединений и узлов связано с отсутствием норм на допустимые значения коэффициентов обеспеченности расчета P_f для различных случаев, в отличие от коэффициентов безопасности.

В этой связи представляет интерес применение подходов, основанных на риск-анализе. Сущность таких подходов схематически показана на рис. 15 применительно к оценке ресурса безопасной эксплуатации сварного соединения (узла).

В системе координат время эксплуатации t и расходы приведены две основные кривые: кривой 1 обозначены расходы, связанные с немедленным

Изменение значений коэффициента безопасности n в зависимости от вероятности разрушения P_f и коэффициента вариации исходных параметров ω угловых швов крестообразного сварного соединения из [11]

P_f	ω	Катеты угловых швов, мм		n
		K_y	K_z	
0,9	0,05	4,39	12,67	1,25
	0,10	7,33	14,12	1,50
	0,15	9,02	17,62	1,75
0,89	0,05	5,65	16,31	1,45
	0,10	10,00	19,72	1,90
	0,15	13,67	26,70	2,40

ремонтом данного сварного соединения (узла) конструкции в момент времени t , кривой 2 произведение $\Pi_{ор}(1 - P_f)$, где $P_f(t)$ — вероятность отказа; $\Pi_{ор}$ — расходы в случае отказа данного сварного соединения (узла) в момент времени t . Точка пересечения этих кривых B определяет границу зоны $t > t_B$ неразумного риска; соответственно зона $t < t_A$ — зона разумного риска или остаточный ресурс безопасной эксплуатации сварного соединения (узла).

Выводы

1. Совершенствование методов оценки ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений (узлов) конструкций длительного срока эксплуатации тесно связано с использованием современных подходов механики разрушения, вероятностных методов, а также методов риск-анализа.

2. Большое значение имеют эффективные методы оценки состояния сварных соединений (узлов) в эксплуатируемой конструкции с позиций уровня нерелаксированных остаточных напряжений, наличия геометрических дефектов и степени деградации характерных свойств материала, определяющих сопротивление разрушению в «горячих точках».

3. Процедура оценки остаточного ресурса является комплексной. В ней вопросы механики разрушения, диагностики состояния по нерелаксированным остаточным напряжениям, размерам дефектов, свойствам материала тесно увязаны с экономическими и социальными проблемами риск-анализа.

4. Представляет интерес создание соответствующей специальности для подготовки специалистов по остаточному ресурсу ответственных конструкций длительного срока эксплуатации, что позволит более эффективно решать практические задачи, в том числе и для сварных соединений и узлов.

1. Уэллс А. А. Влияние остаточных напряжений на хрупкое разрушение // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. — М.: Машиностроение, 1977. — Т. 4. — С. 290–332.
2. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
3. Стеклов О. И., Акулов А. И. О влиянии остаточных напряжений и вида напряженного состояния на коррозионное растрескивание сварных соединений // Автомат. сварка. — 1965. — № 2. — С. 38–43.
4. Сварные строительные конструкции. В 3 т. Т. 1. Основы проектирования конструкций / Под ред. Л. М. Лобанова. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.



5. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. — М.: Высш. шк., 1982. — 272 с.
6. *Guidance on assessment of the fitness for purpose of welded structures*. S. I., [1990]. — 322 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIS-SSI-1157-90).
7. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
8. *Establishment of computation welding mechanics* / J. Ueda, H. Murakawa, K. Nakacho, N. X. Ma // *Trans. of JWRI*. — 1995. — 24, № 2. — P. 73-86.
9. Махненко В. И., Махненко О. В. Развитие расчетных методов оценки допустимости выявленных дефектов в сварных соединениях ответственных конструкций // *Автомат. сварка*. — 2000. — № 9/10. — С. 83-91.
10. Bokalrud T., Koragren P. Some aspects of the application of probabilistic fracture mechanics for design purposes // *Colloquium practical applications of fracture mechanics to the prevention of failure of welded structures*, Bratislava, July 10, 1979. — Bratislava, 1979. — P. 198-205.
11. Махненко В. И., Рябчук Т. Г. Обеспеченность расчета и размеры угловых швов различных соединений // *Автомат. сварка*. — 1993. — № 1. — С. 3-6.
12. Гроицкий В. А., Радько В. П., Демидко В. Г. Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения. — Киев: Вища шк., 1983. — 144 с.
13. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий*: Справочник / Под ред. В. В. Клюева: В 2 т. — М.: Машиностроение, 1976. — Т. 1. — 328 с.; Т. 2. — 391 с.
14. *Assessment of the integrity of structure containing defects* / R. P. Harrison, K. Loosmore, J. Milne, R. Dowling // *Report R/H R6-Rev 2 of Central Electricity Generating Board*. — Bekeley, 1980. — 193 p.
15. Андрейкив А. Е. Пространственные задачи теории трещин. — Киев: Наук. думка, 1982. — 345 с.
16. Horn R. M., Kass J. N., Ranganath K. Evaluation of the growth and stability of stress corrosion cracking in sensitised austenitic pipings // *Trans. ASME, J. of Pressure vessel Technology*. — 1984. — 106, № 2. — P. 201-208.
17. *Оценка ресурса сварных соединений конструкций, работающих при высоких температурах* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак // *Автомат. сварка*. — 1995. — № 1. — С. 3-9.
18. *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*: Справоч. пособие. — Киев: Наук. думка, 1981. — 583 с.
19. Гуца О. И., Махорт Ф. Г., Чернооченко А. А. Применение акустоупругости объемных волн для определения напряжений // *Материалы III Всесоюз. симп. «Технологические остаточные напряжения (г. Кутаиси, 1988)*. — М., 1998. — С. 134-145.
20. *Ultrasonic instrumentation for measuring applied stress on bridges* / P. A. Fuchs, A. V. Clark, M. G. Lozer et al. // *J. Non-Destructive Eval.* — 1998. — 17, № 3. — P. 129-140.
21. *Measurement of residual and applied stress using neutron diffraction* / Eds M. Hatchings and A. Krawitz. — Dordrecht-Boston, London: Kluwer Acad. publ., 1989. — 471 p.
22. *Evaluation of residual stresses in bulk of materials by high energy synchrotron diffraction* / W. Reimers, M. Broda, G. Brusck et al. // *J. Non-Destructive Eval.* — 1998. — 17, № 3. — P. 129-140.
23. *Прогнозирование трещиностойкости корпусной реакторной стали на основе концепции «Master curve» и вероятностной модели* / Б. З. Марголин, В. А. Швецова, А. Г. Гуленко и др. // *Пробл. прочности*. — 2002. — № 1. — С. 5-21.
24. Болотин В. В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. — М.: Стройиздат, 1982. — 350 с.
25. Райзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1986. — 190 с.
26. *ISO SD 16708 Standart. Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems. Reliability — based limit state methods*. — 2000. — Oct.
27. Махненко В. И., Рябчук Т. Г. Компьютеризация расчета сварных соединений с угловыми швами // *Автомат. сварка*. — 1991. — № 11. — С. 1-6.

Characteristic peculiarities of welded joints in durable critical structures requiring certain approaches to estimation of specified service life, residual safe life in particular, are considered. The possibility of using modern fracture mechanics approaches combined with rapidly developing risk analysis methods is examined.

Поступила в редакцию 12.02.2003



РАСЧЕТ НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО НАПРЯЖЕНИЯМ В ЗОНЕ КОНЦЕНТРАТОРА

А. Ф. ХОББАХЕР (Ун-т прикладных наук, г. Вильгельмсхафен, Германия)

Конструкции под воздействием переменных нагрузок подвержены усталостному разрушению. Помимо классических методик испытаний элементов на усталость, разработаны методы расчетной оценки. Наиболее часто применяется метод номинальных напряжений, который базируется на расчете средних напряжений в исследуемом сечении. Более широкие возможности для разработки универсальных методик дает метод конечных элементов. Новый метод анализа с использованием эффективного концентратора относится непосредственно к методикам инициации усталостной трещины в концентраторе. На основании теории Нойбера и результатов свыше 80 серий усталостных испытаний более 1000 образцов установлено, что вместо надреза в шве можно использовать фиктивное нагружение соответствующего радиуса. Для стали этот радиус составляет 1 мм. Данный метод включен в рекомендации МИС по расчету усталости.

Ключевые слова: сварные конструкции, конструкционные стали, сварное соединение, усталость, сталь, напряжения в концентраторе

Конструкции под воздействием переменных нагрузок подвержены усталостному разрушению. На этот процесс влияет ряд параметров, например, уровень и вид нагрузки, частота и последовательность нагружения, свойства материала, состояние поверхности, остаточные напряжения, геометрия, внутренние дефекты и пр. Из-за преобладающего влияния концентратора в шве и остаточных напряжений усталостные аспекты доминируют при расчете и анализе большинства сварных соединений. Помимо классических методик испытаний образцов, разработано несколько других методов расчета оценки на усталостные разрушения.

Наиболее часто применяется метод расчета по номинальным напряжениям, который базируется на определении средних напряжений в исследуемом сечении. Допустимые напряжения для каждого конструктивного элемента сведены в табл. 1. Однако с помощью этого метода невозможно выполнить расчетную оценку сопротивления усталости конструктивных элементов новой формы и размеров.

Другая проблема заключается в установлении самого понятия номинальное напряжение, до сих пор не имеющего четкого определения (рис. 1, 2).

Широкие возможности для разработки более универсальных методов расчетов на усталость дает метод конечных элементов. В настоящее время

важное значение приобрели два метода. Первый из них основан на исследованиях механики разрушения и требует сложных дорогостоящих расчетов. Второй — базируется на анализе напряжений конструкции и связан с некоторой произвольностью процедуры экстраполяции напряжений в критическую точку. Главным преимуществом метода конечных элементов является простота его применения.

Метод напряжения конструкции (рис. 3) позволяет рассчитать уровень напряжения по границе наружной поверхности шва, но он неприемлем для оценки влияния изменения как профиля шва, так и его корня. С помощью этого метода невозможно решить проблемы, связанные с неполным проплавлением или отклонением от заданного зазора между кромками.

Метод напряжения в эффективном концентраторе. Новый метод анализа с использованием эффективного концентратора относится к методикам инициации усталостной трещины в концентраторе, т. е. в корне шва или по границе его наружной поверхности. Непосредственное моделирование геометрии надреза методом конечных элементов невозможно из-за неправильной формы шва. Эту проблему удалось решить путем введения эффективного радиуса закругления в концентраторе, т. е. эффективного концентратора (рис. 4), который можно моделировать методом конечных элементов.

Таблица 1. Различные методы оценки усталостных напряжений

Учитываемые нагрузки	Процедура оценки
Усилия на элементы	Испытание элемента
Среднее напряжение, рассчитываемое по упрощенным формулам	Метод номинальных напряжений
Напряжения по границе наружной поверхности шва при изгибе пластин и оболочек	Метод аппроксимации поверхностных напряжений
Полное напряжение в концентраторе	Метод напряжения в эффективном концентраторе
Интенсивность напряжений в вершине трещины	Методы механики разрушения

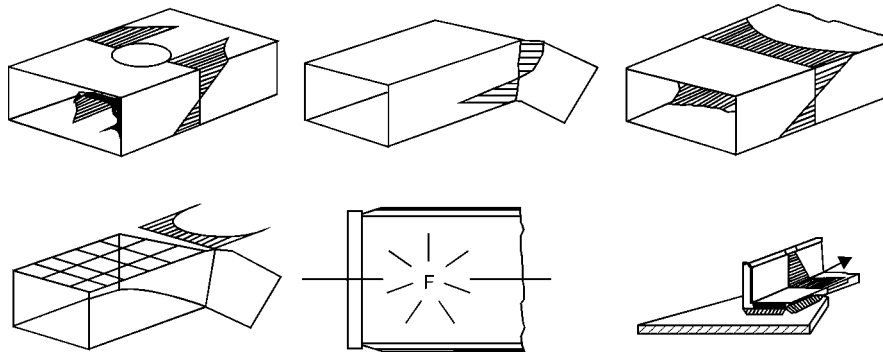


Рис. 1. Иллюстрация номинальных напряжений по Ниэми

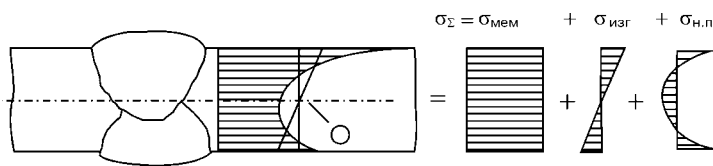


Рис. 2. Схема разложения напряжения в концентраторе на три составляющие

Определение универсального радиуса эффективного концентратора является дополнением к теории надрезов Нойбера. Помимо теоретических дискуссий, корректность этого подхода была подтверждена результатами свыше 80 серий усталостных испытаний более 1000 образцов сварных соединений различной формы и размеров. График распре-

деления вероятностей результатов показал, что можно найти совместный радиус эффективного концентратора (для стали он составляет 1 мм), когда все результаты принадлежат единой статистической совокупности [1].

Первыми нормами на расчет усталости, в которые включен этот метод, были рекомендации МИС [2, 3]. В них для оценки эффективного концентратора значение предела усталости установлено на уровне 225 МПа, т. е. при этом $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений с 95%-й вероятностью соответствует средней 95%-й доверительной вероятности долговечности. При практической оценке оно равно среднему значению минус два стандартных отклонения. Следующими нормами, в которые включен метод, стали рекомендации Немецкой ассоциации машиностроительных компаний [4]. С помощью этого нового метода можно выводить параметрические формулы расчета на усталость с учетом вариантов размеров типа соединения, например крестообразных несущих соединений. Пример параметрических формул для расчета крестообразных соединений с разными зазорами в корне шва и для стыковых соединений приведен в работе [4].

Примеры применения. Основная несущая конструкция стальной башни, находящаяся под сильной ветровой нагрузкой, представляет собой коническую трубу высотой 60 м, диаметром 3,5 м в нижней части и 1,5 м в верхней. Внутри башня разделена несколькими перекрытиями, доступными со стороны внутренних лестниц. Для обеспечения доступа и инспекции предусмотрено несколько дверей. Проемы упрочнены дверными коробками (сечение боковых элементов) размером 20×200 мм, которые по проекту должны привариваться к листовой обшивке башни встык швами с К-образной разделкой с полным проплавлением. По такому проекту построен целый ряд башен. Через некоторое время после начала эксплуатации в нескольких башнях обнаружены трещины (рис. 5). Очевидно, разрушения вызваны уста-

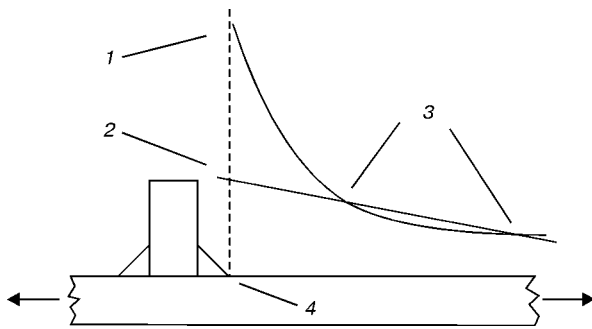


Рис. 3. Схема метода напряжения конструкции: 1 — расчетное общее; 2 — геометрическое; 3 — точки измерения; 4 — критическая точка

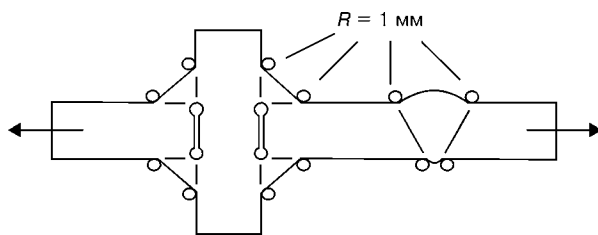


Рис. 4. Концепция радиусов эффективного концентратора

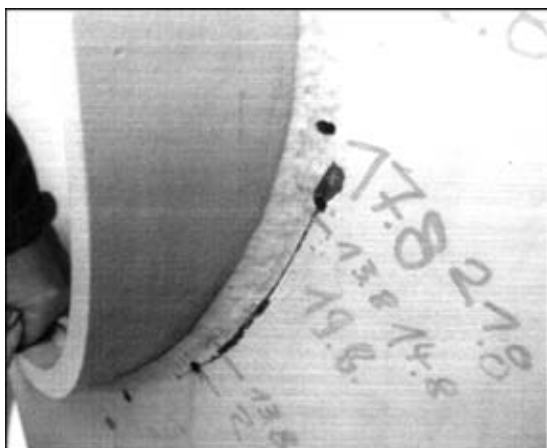


Рис. 5. Трещины в усилении дверного проема



Таблица 2. Различные способы выполнения швов и их типы по нормам (DIN 4133)

Тип 5 (стыковой шов)	Тип 6 (непровар)	Тип 8 (зазор в корне шва)
Стыковой шов со скосом кромки с двусторонними галтелями без зазора в корне	Шов со скосом и притуплением с двусторонними галтелями с незаваренным зазором глубиной 2 мм	Угловой шов с двухгалтельным зазором в корне
Шов, указанный на чертеже	Шов, выполненный в действительности	Наихудший вариант шва

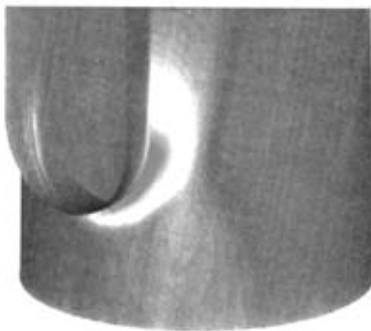


Рис. 6. Область высоких напряжений

лостью. Возникла необходимость в контроле состояния дверных коробок и башни, а также в выяснении причины разрушения. Далее следовало разработать предложения по ремонту. Работы по сварке стальной конструкции выполнял субподрядчик. Таким образом, необходимо было установить финансовую ответственность за компенсацию убытков.

После обнаружения первых трещин сварные швы зачистили строжкой для дальнейшего исследования. Однако трещина развивалась изнутри башни наружу в области высоких напряжений (рис. 6). Она начиналась от границы наружной поверхности шва, соединяющего лист обшивки с дверной коробкой, и затем распространялась по обшивке. Кроме того, ультразвуковая дефектоскопия зафиксировала наличие непроваров во всех

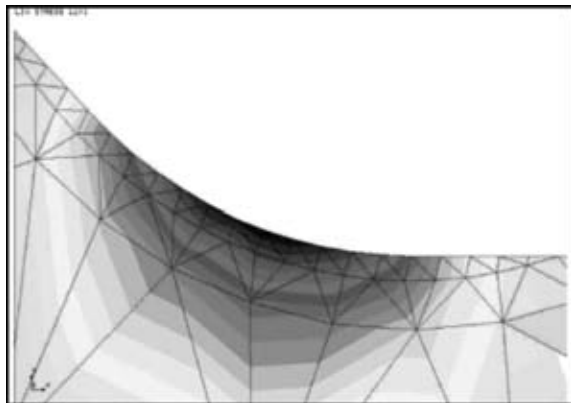


Рис. 7. Модель для построения сеток по методу конечных элементов

остальных стальных башнях, построенных из конструкций одной серийной партии. Состояние башни иллюстрируют рисунки из табл. 2. Непровар шел от линии на уровне внутренней поверхности обшивки башни наружу на глубину 2 мм (табл. 2, тип 6).

Полный анализ методом конечных элементов показал области повышенных напряжений в башне (рис. 7), расположенные под углом 45° к ее оси, что совпадало с местонахождением обнаруженной трещины.

Для данного типа сварных соединений нормами предусмотрены три варианта. Во-первых, шов типа 5 (табл. 2) — К-образный стыковый шов с полным проваром (рис. 8). Начало разрушения в этом типе соединения предполагается по границе наружной поверхности шва. Во-вторых, шов типа 6 (табл. 2) — К-образный стыковый шов с неполным проваром (максимальный непровар 2 мм). Здесь также разрушение ожидается по границе, но в этом случае допустимые напряжения ниже. В-третьих, шов типа 8 (табл. 2) — двухгалтельный угловой шов с зазором в корне по проекту. Предполагается, что разрушение начнется с корня шва.

Шов с неполным проваром можно было бы классифицировать как шов типа 6 (табл. 2), но тут зафиксировано несколько несоответствий. Нормами предусмотрен зазор в середине листа, тогда как в данном случае зазор асимметричен центральной линии листа. Более того, нормы касаются полного изменения размерных параметров. Естественно возникает вопрос: снижает ли этот дефект сопротивления усталости данного сварного соединения по сравнению со стыковым К-образным швом с полным проваром?

Единственной существующей методикой оценки сопротивления усталости, позволяющей ответить на этот вопрос, является методика с использованием эффективного концентратора. Для анализа методом конечных элементов была разработана плоская модель шва (рис. 7). Все переходные

Таблица 3. Результаты анализа

Участок анализа	ККН	FAT (МПа)
Граница наружной поверхности шва	2,55	88
Корень шва	1,6	140

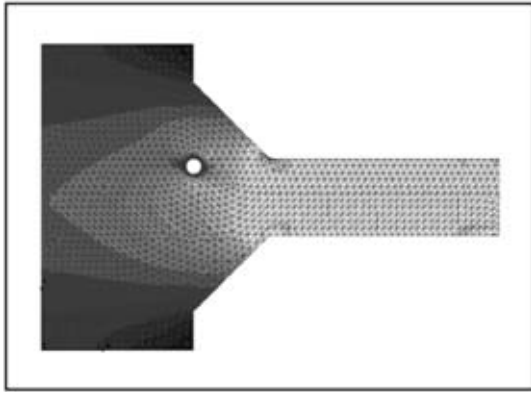


Рис. 8. Полная модель соединения

зоны шва, наружная граница или корень моделировались с эффективным радиусом 1 мм. Результаты представлены на рис. 8, 9.

Коэффициент концентрации напряжения (ККН) k в зависимости от напряжения в листе приведен в табл. 3. Здесь также рассчитаны пределы усталости FAT 225 (File Allocation Table — таблица размещения файлов) путем деления напряжения в концентраторе на ККН исследуемого концентратора: $FAT_{ном.н} = 225/k$.

Результаты показали, что разрушения от зоны корня шва не может быть. Другой анализ шва без дефектов показал, что непровар не оказывает влияния на сопротивление усталости по границе наружной поверхности шва.

На сопротивление усталости конструкции могут воздействовать многие факторы. В данном случае нужно определить причины повреждений и меру ответственности за них конструктора и субподрядчика. Как указано ранее, непредвиденный зазор, образовавшийся вследствие непровара, не влияет на сопротивление усталости соединения. Это производственный дефект, а недобросовестный контроль можно отнести на счет субподрядчика, выполнявшего сварочные работы. С другой стороны, конструктор отвечает за правильный расчет нагрузок, включая влияние динамической составляющей и такое проектирование, при котором учтено влияние всех составляющих напряжения. Таким образом, ответственным за материальные убытки, связанные с этими разрушениями, является конструктор.

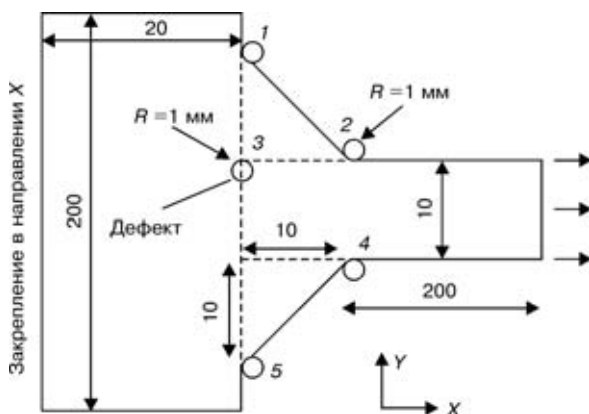


Рис. 9. Надрез на границе наружной поверхности шва

Таблица 4. Предел усталости по FAT (МПа) для метода номинальных напряжений ($t = 35$ мм)

Расстояние d , мм	FAT для надреза в корне шва
2,0	80
2,5	67
3,0	65
5,0	62
6,0	60

Ремонт путем зачистки и устранения непровара бесполезен, поскольку усталостную прочность по границе шва таким способом повысить нельзя. Для определения требуемой усталостной прочности сварного соединения нужен повторный тщательный анализ всех параметров нагрузки. Затем можно использовать метод напряжения в эффективном концентраторе для расчета соединения с необходимой прочностью. Процесс ремонта сводился к выполнению таких операций, как увеличение толщины шва, уменьшение угла в зоне перехода по границе наружной поверхности шва и традиционная зачистка швов с зашлифовкой.

Для конкретного элемента конструкции требовалось определить уровень сопротивления усталости. В данном случае это было одностороннее тавровое соединение с нагруженным односторонним швом, выполненным в узкий зазор с несъемной подкладной планкой (рис. 10). Зарождение трещины предполагалось в двух местах: в зоне концентратора в корне шва, непосредственно прилегающего к поперечной пластине, и в зоне концентратора между подкладной планкой и пластиной, находящейся под напряжением. Предварительные расчеты показали, что интерес представляет только надрез в корне шва. В модели для анализа методом конечных элементов расстояние d между двумя концентраторами было изменено. Толщина стенки оставалась постоянной — $t = 35$ мм. С учетом этого рассчитан ККН. Затем с помощью диаграммы напряжение–долговечность Веллера по таблице FAT 225 определено количество циклов долговечности. Класс элемента по FAT можно вводить в каталог элементов для метода номинального напряжения (табл. 4).

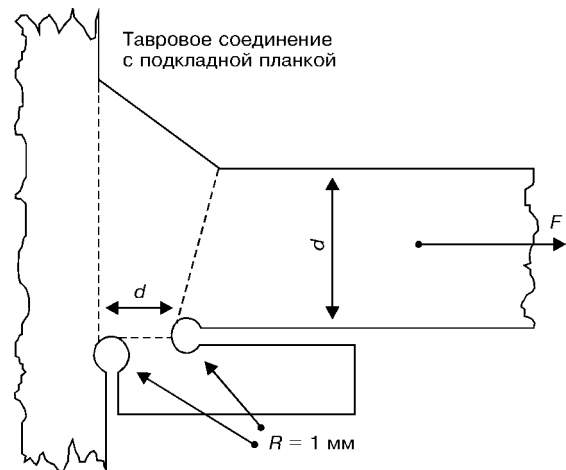


Рис. 10. Элемент с изменением параметров

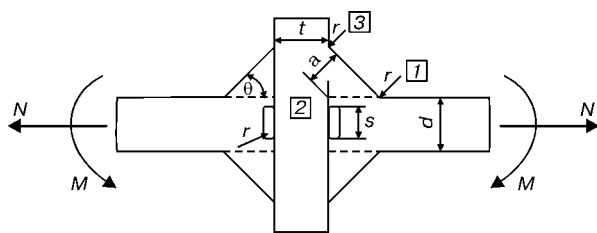


Рис. 11. Размеры крестообразного типа соединений

Эти значения не включают допуски на линейную или угловую деформацию. Их нужно учитывать дополнительно. Сравнение с пределами усталости крестообразных соединений, данным в рекомендациях МИС по расчету усталости, показывает, что результаты хорошо укладываются в эту схему.

Влияние изменений параметров сварных соединений можно анализировать с помощью метода напряжения в эффективном концентраторе. В работе [3] детально разработана полная параметризация размеров на примере крестообразного соединения. Измененные размеры показаны на рис. 11. Сложная параметрическая формула была упрощена для угловых швов с зазором в корне шва, равным толщине стенки ($s = t$), отсутствия изгибающей нагрузки и радиусов концентратора или переходной зоны шва, равных 1 ($r = 1$ мм). При таких условиях сложная параметрическая формула упрощается до следующего уравнения:

$$k = 0,947 + [1 + 0,770 \left(\frac{a}{t}\right)^{-1,054} + 1,307 t^{0,093} - 2,315 \sin^{-0,029} \theta] \sin^{0,410} \theta t^{0,370},$$

где a — толщина шва; θ — угол разделки кромок; t — толщина стенки в диапазоне следующих значений: $a/t = 0,3...1,0$; $\theta = 0,26...1,57$ рад $\equiv 15...90^\circ$; $t/r = 4...200$.

FAT предельной усталости (рис. 12), касающиеся толщины шва для метода номинальных напряжений, можно рассчитать по следующему уравнению:

$$FAT_{ном.н} = (1,22:225) / 2k(a/t).$$

В соответствии с рекомендациями МИС для коэффициента асимметрии цикла $R_\sigma = 0$ при общих низких остаточных напряжениях был применен показатель 1,2.

Structures under alternating loads were subjected to a fatigue fracture. Except the classical methods of testing elements for fatigue, the methods of a calculated evaluation are developed. The method of nominal stresses, based on calculation of average stresses in section examined, is most often used. The method of finite elements provided the wider opportunities for the development of universal procedures. The new method of analysis using an effective notch is related directly to the methods of initiating of a fatigue crack in the notch. It was established on the basis of Neuber theory and more than 80 series of fatigue tests of more than 1000 samples, that instead of a notch in weld, it is possible to use a fictitious loading of an appropriate radius. This radius for steel is 1 mm. This method was included into IIW recommendations for fatigue calculation and, thus, the feasibility of its practical application in conformity to standards has appeared.

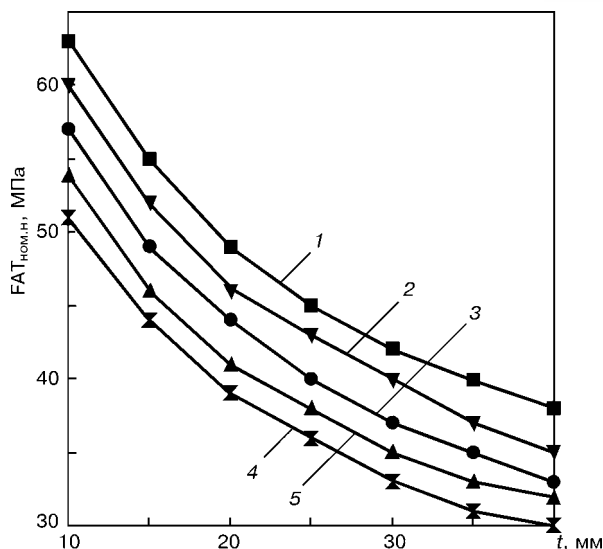


Рис. 12. Расчетные значения пределов усталости крестообразного соединения в зависимости от толщины стенки: 1 — $a/t = 0,3$; 2 — $0,4$; 3 — $0,5$; 4 — $0,6$; 5 — $0,7$

Выводы

1. Метод расчета с использованием напряжения в эффективном концентраторе является новым и универсальным способом оценки усталостной прочности сварных соединений, но требует повышенных затрат на расчетный анализ. Этот метод крайне необходим для расчета прочности в «опасных» точках конструкции.

2. Накопление опыта использования этого метода будет способствовать расширению областей его применения, в частности для алюминия. Можно также ожидать новых рекомендаций МИС по расчету усталости.

1. *Olivier R., Köttgen V. B., Seeger T.* Schweißverbindungen I — Vorhaben Nr. 105 — Schwingfestigkeitsnachweis für Schweißverbindungen auf Grundlage örtlicher Beanspruchungen. Forschungsheft, Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Heft 143, VDMA Frankfurt, 1989.
2. *Anthes R. J., Köttgen V. B., Seeger T.* Kerbformzahlen von Stumpfstoßen und Doppel-T-Stößen // Schweißen und Schneiden, 1993. — 12.
3. *Hobbacher A. et al.* Fatigue design of welded joints and components — International Institute of Welding. Abington publ., Cambridge UK, 1996.
4. *Haenel B., Haibach E., Seeger T., Wirthgen G., Zenner H.* Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenteile — Richtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau. Frankfurt: VDMA-Verlag, 1998.

Поступила в редакцию 25.04.2003



РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ТРУБ

К. Дж. МИЛЛЕР (Шеффилдский ун-т, Великобритания)

Приведены результаты исследований причин разрушения труб из алюминиевого сплава 6061-T6, полученных прессованием. Используются всесторонние подходы, учитывающие особенности процесса производства, трехмерный анализ напряжений, механику разрушения, микроструктуру и пр. Даны рекомендации по предупреждению разрушений.

Ключевые слова: микроструктурная механика разрушения, остаточные напряжения, периферические крупные зерна, способ выдавливания через многоканальные матрицы, методы анализа усталостного разрушения

Ролик цилиндрического сечения (рис. 1) используется в системах ленточных конвейеров, обеспечивающих непрерывную транспортировку угля из открытых горных разработок, удаленных от моря и расположенных на расстоянии нескольких миль к пункту выгрузки у океана, где один или два корабля могут загружаться непрерывно. Расстояние между роликами в ленточном конвейере составляет 1,5 м, а уголь транспортируется по резиновым композитным лентам таким образом, чтобы равномерно распределенная нагрузка 718 кг (3,52 кН) перемещалась вдоль конвейера по ширине ролика. Эта нагрузка может возрастать в 5 раз на верхней периферийной поверхности ролика. Концевые заглушки облегчают смазывание подшипников, необходимое для предотвращения заедания роликов, вращающихся со скоростью 602 об/мин, т. е. ролик диаметром 152,4 мм поддерживает скорость перемещения ленты 4,8 м/с. В некоторых случаях на один оборот приходится четыре цикла нагружения, что обеспечивает 3,4 млн циклов за каждый день непрерывного

движения. К сожалению, протоколы о свойствах материала, позволяющие иметь информацию о десятилетнем сроке службы роликов, отсутствуют.

Несмотря на всестороннюю удовлетворительную оценку до внедрения на месте, изделие зачастую разрушалось через несколько дней после установки. Плоскость растрескивания проходила по плоскости $r-z$, а не $r-\theta$, в которой существовало осевое растягивающее напряжение вследствие прогиба ролика. Некоторые трещины располагались несколько зигзагообразно вдоль оси направления их роста, тогда как другие лишь слегка изгибались. На концевых фитингах (заглушках), закрепленных неподвижно, трещины не зарождались. Многие трещины были широко открыты, чему способствовало влияние остаточных напряжений. В этом случае совершенно очевидна необходимость применения анализа методом конечных элементов.

Показана возможность проведения статистического анализа разрушений за день, неделю или месяц, поскольку поведение материала при длительных нагрузках, вызывающих усталость, часто рассматривается как статистический феномен Вейбулла. Но этот анализ не был применен, так как он не объяснил бы физических причин мно-

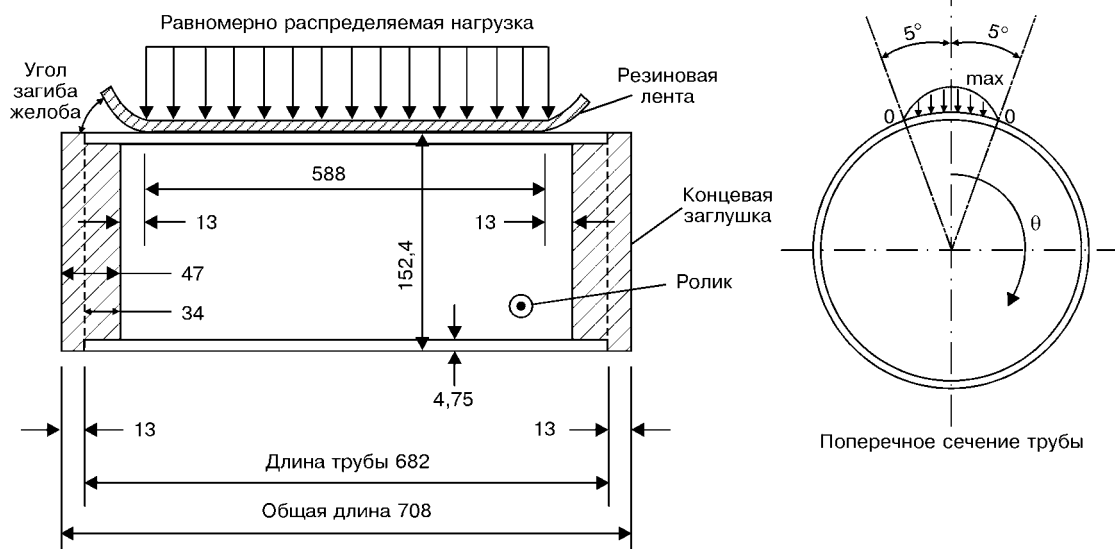


Рис. 1. Цилиндрический ролик



Таблица 1. Основные результаты анализа методом конечных элементов

Объект исследования	Напряжения, МПа					
	касательные по окружности (растягивающие от центробежных сил)			осевые		
	σ_{\min}	σ_{\max}	$\Delta\sigma$	σ_{\min}	σ_{\max}	$\Delta\sigma$
Внешняя оболочка:						
большой цикл	-45,6	18,6	64,2	-28,4	11,2	39,6
малый цикл	-12,1	18,6	30,7	-3,2	11,2	14,4
Внутренняя оболочка:						
большой цикл	-18,7	45,5	64,2	-8,1	6,0	14,1
малый цикл	-18,7	12,5	31,2	-8,1	5,1	13,2

гочисленных и почти мгновенных разрушений. Химический состав и механические свойства данного материала соответствовали техническим требованиям. Учитывались два возможных фактора влияния окружающей среды: непосредственная близость моря и присутствие мелких черных частиц, которые в соединении с соляными испарениями могли вызвать коррозионное разрушение.

Анализ методом конечных элементов. Благодаря симметрии поперечного сечения ролика был проанализирован только сегмент, половина окружности ролика и половина длины ролика. На рис. 2 показаны трехмерные контуры одного из исследуемых параметров.



Рис. 2. Эквивалентное трехмерное распределение напряжений фон Мизеса

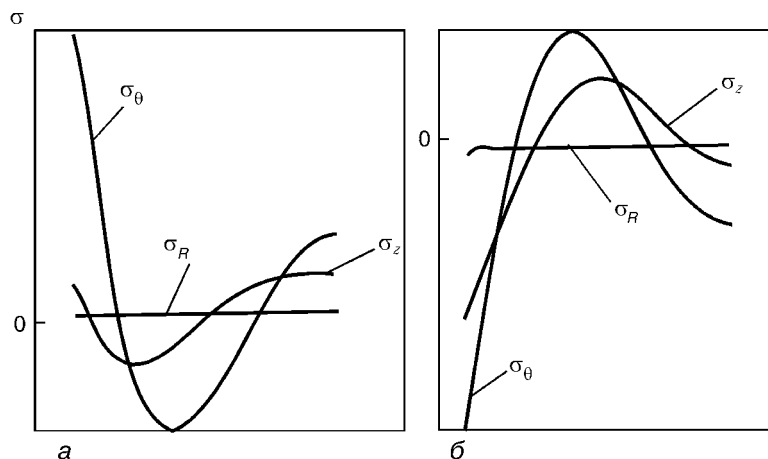


Рис. 3. Характер распределения растягивающих напряжений от центробежных сил σ_θ , осевых σ_z и радиальных σ_R по наружной (а) и внутренней (б) поверхности половины окружности ролика; значения см. табл. 1

дованных параметров. Зарегистрированы пространственные смещения, а также максимальные/минимальные главные напряжения, включая радиальное, осевое и касательное по окружности. Решение методом конечных элементов получено с помощью версии 6.1 программы ANSYS с использованием метода Н-элементов. Отображенная сетка из четырехугольников обеспечивает более точные результаты по сравнению с треугольниками или комбинацией треугольников и четырехугольников. Приложенная нагрузка составляла 1760,35 Н, т. е. половину

718 кг. Закрепленный конец ролика имел соединительную муфту, которая обеспечивала легко поддерживаемый режим на конечном отрезке 34 мм половины цилиндра. Для упрощения нагрузки на ленту конвейера вследствие давления было принято треугольное распределение давления.

На рис. 3 показаны основные результаты, а в табл. 1 представлены численные данные. Основные выводы, сделанные в результате анализа, таковы:

- уровни циклических напряжений низкие, а усталостные разрушения не зафиксированы;

- поскольку цилиндр вращается на 360° , то его внешняя и внутренняя поверхности подвергаются двум различным циклам вращения (большому и малому). Это явление происходит при распределении как касательных напряжений по окружности, так и осевых напряжений, при этом первые имеют большую важность по сравнению с осевыми напряжениями, вызванными вращательным изгибом;

- радиальные напряжения можно не принимать в расчет;

- поверхности, на которых возможно зарождение трещин, находятся под действием двухосного напряженного состояния;

- разрушения возникают вследствие какой-то другой главной причины или нескольких причин.

Процесс прессования выдавливанием. Алюминий поддается прессованию, поэтому ему можно придавать множество форм. На рис. 4 показаны

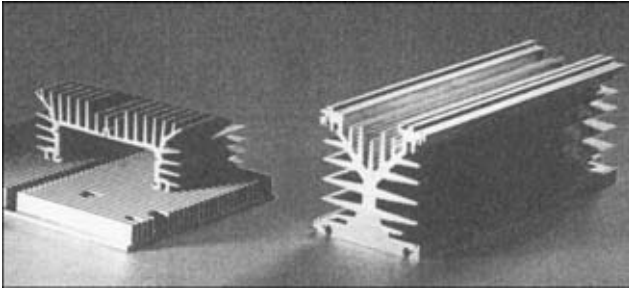


Рис. 4. Образцы, полученные прессованием

два примера того, как теплопроводность алюминия может быть использована в системах охлаждения благодаря выполнению оптимальных, но сложных поперечных сечений. Существует три основных способа изготовления продукции прессованием:

бесшовное прессование металла прямым способом. В данном случае предварительно нагретая заготовка проталкивается через матрицу и, следовательно, она должна скользить вдоль внутренней стенки контейнера. Для преодоления силы трения необходимо применять высокие давления. Задняя часть заготовки, т. е. приблизительно 15 %, должна быть удалена во избежание образования дефектов различных форм в прессованном профиле;

бесшовное прессование металла непрямым способом. В этом случае с относительной скоростью матрицу с полым пресс-штемпелем проталкивают в стационарную заготовку, и продукт втекает внутрь штемпеля, нагрузка от сил трения значительно уменьшается, по сравнению с прямым способом, поэтому этот способ предпочтительнее для твердых алюминиевых сплавов 2024 и 7075;

способ выдавливания через многоканальные матрицы. Это более быстрый и недорогой способ, поэтому является предпочтительным для некритических применений и более мягких сплавов. Он был использован при изготовлении тонкостенных цилиндров для роликов в случае, обсуждаемом в данной статье.

На рис. 5 показано, как сплошная цилиндрическая заготовка приближается к матрице. Перемычка в матрице предназначена для разделения заготовки на две половины, которые проходят через оправку установленного наружного диаметра, равного диаметру будущего отверстия трубы. При прохождении двух половин через отверстие в матрице, соответствующее наружному диаметру трубы, две половины заготовки соединяются посредством сварки давлением. Таким образом, конечный продукт имеет два диаметрально противоположных шва. В зависимости от размера и толщины изготавливаемой трубы матрица может иметь три (или пять) перемычки, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга и разделяющих поступающие сплошные заготовки на три (или пять) сегмента. Поэтому труба, полученная прессованием, будет иметь три (или пять) зоны сварных швов, расположенных на одинаковом расстоянии по окружности трубы.

В процессе прессования через отверстие могут возникать дефекты различных форм. Свариваемые

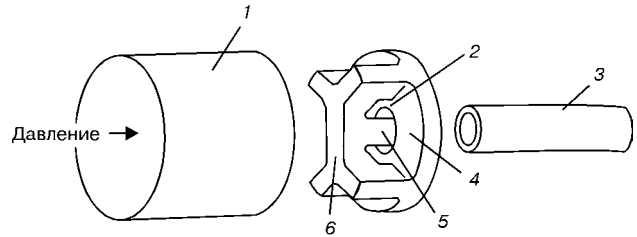


Рис. 5. Система камерной матрицы с двумя каналами и сварочными камерами: 1 — сплошная заготовка; 2 — зона сварного шва; 3 — труба, полученная выдавливанием; 4 — матрица; 5 — выступ оправки; 6 — перемычка

поверхности необходимо тщательно очищать. Наиболее распространенными загрязнениями являются коллоидальный графит или нитрид бора, используемые для отделения алюминиевой заготовки от стальных элементов матрицы. Швы с загрязнениями могут способствовать расщеплению трубы.

Другим известным дефектом является дефект поперечного шва, образующийся на границе раздела между заготовкой, входящей в матрицу, и последующей заготовкой. При прессовании эта граница является критической зоной, где возможно возникновение дефектов сварного шва. Если режимы прессования (скорость, температуру, перепады давления и геометрию матрицы) не оптимизировать, может образоваться периферийная крупнозернистая структура.

Процессы, происходящие после прессования.

После извлечения из матрицы горячую трубу для придания ей максимальной прочности подвергают термической обработке на твердый раствор, а затем немедленному искусственному старению. Однако конечные свойства продукта во многом зависят от формы горячего металла после извлечения его из штампа. В случае, если в процессе прессования возникли дефекты и/или были допущены ошибки, тонкий длинный цилиндр круглого сечения может деформироваться в цилиндр с овальным поперечным сечением. Если это происходит, деформированные цилиндры можно подвергнуть правке в валах. В процессе правки деформированные по спирали цилиндры с центрированным стержнем круглого сечения, что обеспечивает необходимую конечную форму. К сожалению, процесс правки в валах может вызвать остаточные напряжения и царапины на поверхности.

Остаточные напряжения. Как отмечено ранее, на поврежденных роликах обнаружены открытые трещины, расположенные вдоль оси, свидетельствующие о наличии остаточных напряжений. Исследовано несколько образцов, которые подвергали правке в валах. Касательные и осевые напряжения на внутренней и наружной окружностях определяли с помощью 17 розеток тензодатчиков, расположенных под углом 90°, до и после выполнения надреза вокруг каждого датчика.

Максимальные значения касательных напряжений на наружной и внутренней поверхностях составили соответственно 127 и -149 МПа, а осевых — соответственно 38 и -49 МПа. Критическим значением является 127 МПа, но поскольку оно



Таблица 2. Значения усталостного напряжения четырех циклов за один оборот цилиндра

Цикл	Растягивающее остаточное напряжение, МПа			
	σ_{max}	σ_{min}	σ	$R (\sigma_{min}/\sigma_{max})$
Большой:				
127	145,6	81,4	64,2	0,56
103	121,6	57,4	64,2	0,47
Малый:				
127	145,6	114,9	30,7	0,79
103	121,6	90,9	30,7	0,75

зафиксировано только на одном образце, то на цилиндрах, подвергаемых наиболее сильной правке в валках, вероятны намного более высокие значения. Кроме того, другой пик (103 МПа) зарегистрирован для касательных напряжений на наружной поверхности, при этом он был смещен от значения 127 МПа на 216°. Заметим, что равноотстоящие зоны сварных швов расположены на 0, 72, 144, 216 и 288°.

Влияние средних напряжений. Остаточные напряжения обуславливают очень высокое среднее напряжение, к которому следует добавить менее высокие усталостные (циклические) напряжения. В табл. 2 приведены эти данные, включающие самое высокое (127 МПа) и самое низкое (103 МПа) значения растягивающих остаточных напряжений, полученных ранее. Рассматриваются только поверхностные касательные напряжения по окружности, поскольку они являются нормальными для плоскости трещины при разрыве. Из этого следует, что два стационарных пика растягивающих остаточных напряжений (большой и меньший, отстоящие друг от друга на 216°) комбинируются с двумя (большим и малым) диапазонами циклических усталостных напряжений, обуславливая таким образом четыре усталостных цикла за один оборот цилиндра. В табл. 2 приведены также значения коэффициента $R(\sigma_{min}/\sigma_{max})$, связанные с каждым из четырех циклов за один оборот.

Диаграмма Гудмена–Содерберга, на которой показан диапазон циклических напряжений $\Delta\sigma$ в зависимости от среднего напряжения σ_{cp} для данной циклической долговечности, иллюстрирует вы-

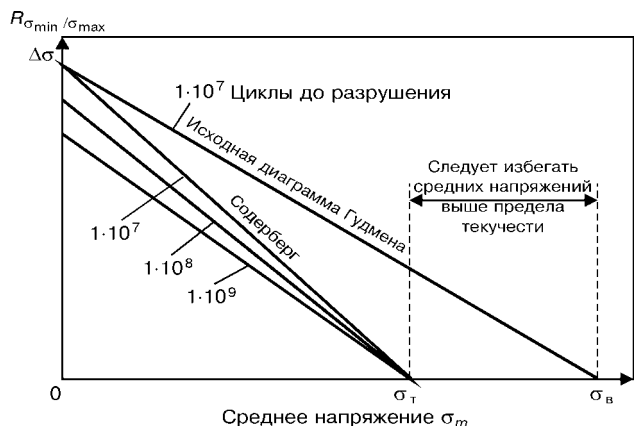


Рис. 6. Диаграмма Гудмена–Содерберга

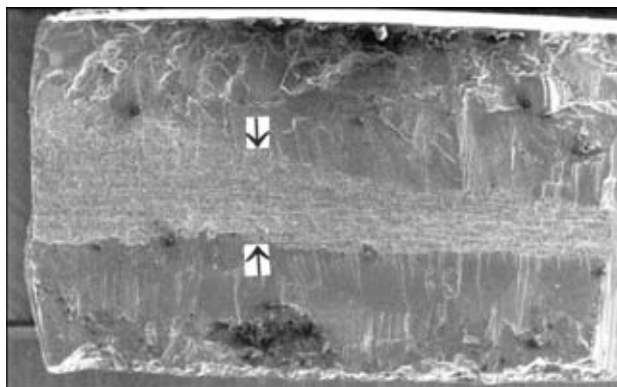


Рис. 7. Участок поверхности разрушения стенки цилиндра толщиной 4,75 мм

сокую чувствительность к значениям $\Delta\sigma$ при длительной усталости, когда среднее (остаточное) напряжение приближается к пределу текучести материала. Это касается обычных (без трещин) образцов (рис. 6). Высокие положительные значения коэффициента $R (\sigma_{min}/\sigma_{max})$ обуславливают очень низкие (пороговые) значения $\Delta\sigma$ при расчете линейной механики упругих разрушений для трещин, развивающихся вследствие усталости. На рис. 7 показано разрушение на поверхности цилиндра.

Фрактография и аспекты микроструктуры. На рис. 7 и 8, являющихся взаимодополняющими, изображены соответственно стенка цилиндра толщиной 4,75 мм, которая является плоскостью разрушения, и периферийная крупнозернистая структура наружной и внутренней поверхностей цилиндра. Стрелки на рис. 7 обозначают границу зоны усталостного разрушения, ширина которой очень мала. Зоны на наружной и внутренней поверхностях имеют фасетки сколов, что свидетельствует о быстром разделении металла вследствие разрушения в этом предположительно пластичном металле. На рис. 8 показаны поверхностная крупно- и мелкозернистая внутренняя структуры; при этом последняя обеспечивает ограниченную зону, отличающуюся прекрасной усталостной прочностью и высоким пределом текучести, типичным для сплава 6061-Т6. Наружная зона имеет незначительный предел текучести в соответствии с отношением Холла–Петча, которое связывает предел текучести с обратным значением квадратного

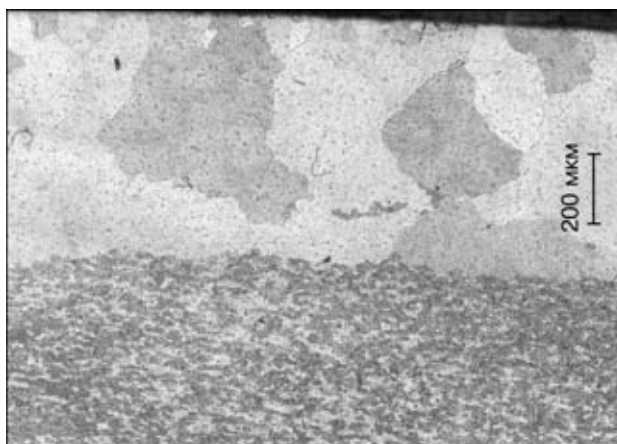


Рис. 8. Микроструктура металла стенки цилиндра

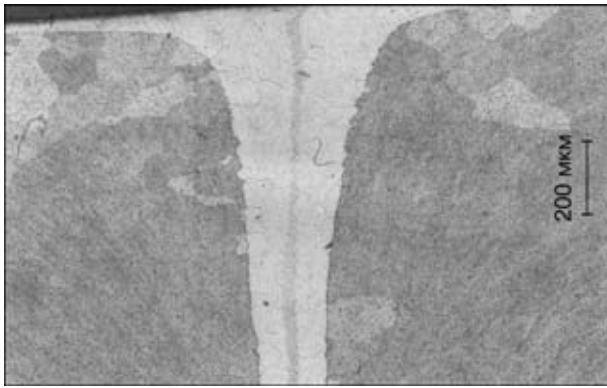


Рис. 9. Поперечное сечение зоны сварного шва с минимальной толщиной 200 мкм приблизительно на 1,8 мм ниже наружной поверхности

корня размера зерна, т. е. $\sigma_T = k(1\sqrt{d})$. Поскольку все металлы растрескиваются, если их зерна будут сжиматься вследствие пластической деформации, на зону периферийной крупнозернистой структуры с низким пределом текучести будет оказывать влияние поле растягивающего двухосного напряжения ниже предела упругости. При этом наружные зерна подвергаются воздействию глубоких трещин скола поперек целых зерен, которые часто имеют размер более 1,5 мм. Если же середина цилиндра растрескалась вследствие усталости, оставшаяся часть будет быстро разрушиться.

Одна из зон сварного шва с большим увеличением показана на рис. 9. На поверхности контакта видны крупные зерна между свариваемыми деталями и мелкозернистая структура ниже поверхности и вблизи зоны сварного шва. На окружности цилиндра могут располагаться пять таких зон. Высока вероятность того, что периферийная крупнозернистая структура растрескивалась в процессе правки в валках и до того, как ролики подверглись воздействию циклических сил.

Микроструктурная механика разрушения. Она имеет три основных принципа:

трещины развиваются под действием циклического нагружения;

скорость развития начальной трещины пропорциональна размеру зерна (или обратному значению предела текучести), что обуславливает степень пластичности в вершине трещины;

развитие усталостных трещин замедляется, когда они приближаются к барьерам, создаваемым микроструктурой, например к границам зерен. В уравнении механики разрушения микроструктуры

$$da/dN = C\Delta\sigma^m(d - a),$$

где da/dN — циклическая скорость развития трещины; C и m — константы материала; $\Delta\sigma$ — диапазон циклических напряжений; d — размер зерна; a — длина трещины внутри зерна. Отсюда следует, что чем больше зерно, тем быстрее растет начальная трещина. При очень высоких уровнях напряжения трещина будет расти намного быстрее. Кроме того, поскольку уровни напряжения выше, чем одна треть предела текучести материала, линейная механика упругих разрушений не принимается во внимание, должна быть рассмотрена механика

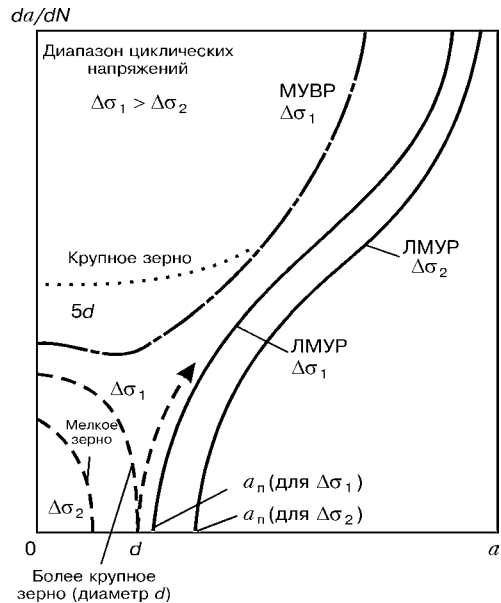


Рис. 10. Отношение между микроструктурой, механикой упруго-вязких разрушений (МУВР) и линейной механикой упругих разрушений (ЛМУР) при различных диапазонах циклических напряжений, длине трещин и размерах зерен

упруго-вязких разрушений. В условиях максимальных значений напряжений (табл. 2) и крупнозернистой структуры, если все поверхностные зерна не разрушатся в процессе правки, то трещина вырастет поперек поверхностных зерен в течение первого же дня эксплуатации, когда будет накоплено не менее 3 млн циклов. В средней четверти стенки трубы ограниченную усталостную прочность необходимо идентифицировать с использованием принципов механики упруго-вязких разрушений. Поэтому пороговые условия, соответствующие принципам линейной механики упругих разрушений, не подходят для решения этой проблемы. Рис. 10 иллюстрирует краткое изложение этого положения.

Влияние окружающей среды. Питтинговая и межкристаллитная коррозия обнаружена на поверхностях некоторых разрушений. Следовало установить, способствовала ли такая коррозия процессу начального разрушения или же она появилась после того, как поверхностные зерна растрескались вследствие правки. Поскольку коррозионные процессы не протекают в указанном алюминиевом сплаве, используемом в океанской среде, то такая возможность не рассматривалась как вопрос первостепенной важности. Однако способы EDS и SEM были применены к поверхности продукта. Кроме того, выполнен анализ спектров комбинационного рассеяния на образце черных частиц, взятом с поверхности излома, а также на образце порошкообразного угля. Окончательный ответ не получен, но образец черных частиц был, по всей вероятности, графитом, используемым для покрытия заготовок перед прессованием. Угольная пыль попадает во все открытые трещины и благодаря своему сопротивлению сжатию, в отличие от графита, закрепляет открытые трещины, тем самым увеличивая сопротивление распространению



усталостных трещин. Однако главный аспект разрушений заключается в том, что процессы, зависящие от времени, например коррозионная усталость и коррозия под напряжением, оказывают незначительное влияние, поскольку большинство разрушений происходило вскоре после установки цилиндров.

Выводы

1. Установлено, что процесс правки, следующий за прессованием, обуславливает очень высокие остаточные напряжения. Уменьшение предела текучести ниже уровня, предписываемого международными нормами, является следствием крупных поверхностных зерен.

2. Показано образование периферийной крупнозернистой структуры вследствие недостаточной пластической деформации поверхностного материала в процессе прессования. Деформация выше предела текучести, но ниже критического уровня не создает предпосылки для интенсивного образования зародков зерен, что позволило бы приобрести достаточную прочность и сопротивление усталости. Рекристаллизация и рост зерен при высокой температуре происходит за счет нескольких центров образования зародышей, которые существуют в зоне сварного шва во время последующего прессования, но исчезают при правке.

3. Установлена возможность предотвращения разрушений путем внедрения систем контроля ка-

чества в процессе производства, включая испытание на раздачу сварной трубы на произвольно выбранных образцах. Для этого пробивной инструмент конической формы впрессовывается в отверстие цилиндра, что при наличии слабых зон вызовет расщепление цилиндра.

4. Показано, что ролик ленточного конвейера могут накапливать 20 млн циклов в первую неделю эксплуатации. В литературе нет данных о разрушениях при длительной усталости для этого алюминиевого сплава.

5. Микроструктурная механика разрушения объясняет растрескивание поверхности в зоне периферийной крупнозернистой структуры. Высокие напряжения при растяжении по двум осям обуславливают поперечное сжатие, которое способствует возникновению глубоких хрупких трещин.

6. Зона усталостного разрушения в средней четверти толщины стенки достаточно небольшая, и усталостная прочность сплава 6061-T6 из-за наличия зон периферийной крупнозернистой структуры была строго обусловлена перед введением в эксплуатацию.

7. Методы анализа линейной механики упругих разрушений, особенно включающие пороговые значения, не подходят для анализа таких разрушений.

Given are the results of investigations of the causes for failure of pipes of aluminum alloy 6061-T6, produced by extrusion. Comprehensive approaches were used, allowing for the features of the production process, three-dimensional stress analysis, fracture mechanics, microstructure and others. Recommendations on fracture prevention are given.

Поступила в редакцию 22.09.2003



ПРОГНОЗ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЛАСТИЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ

А. С. ЗУБЧЕНКО, Г. С. ВАСИЛЬЧЕНКО, доктора техн. наук, А. В. ОВЧИННИКОВ, канд. техн. наук (ЦНИИТМАШ, г. Москва, РФ)

Предложен метод расчета предельных нагрузок для конструкции с дефектами сварных соединений. Метод позволяет моделировать процесс квазистатического развития трещин в пластичных сталях. Приведены примеры расчета.

Ключевые слова: сварные соединения, дефекты, статическая прочность, предельные нагрузки, модель разрушения

Большинство расчетов предельного состояния пластичных тел с дефектами выполняется с применением J -интегралов или параметров раскрытия трещины. Так, например, данные, регламентирующие допустимость дефектов в сварных соединениях трубопроводов АЭС на стадии эксплуатации, приведенные в коде ASME [1], получены с помощью J -интегралов. Распространенный метод оценки целостности конструкции с дефектами [2], известный под названием R6, имеет ту же основу. Подход Британского института сварки [3] к расчету трещиностойкости базируется на параметрах раскрытия трещин.

Пластичные материалы в процессе разрушения, как правило, имеют стадию квазистатического подраста трещины. При этом текущий размер трещины может быть представлен в зависимости от действия внешних сил. Между раскрытием вершины трещины δ_r и ее подрастом существует аналогичная зависимость.

Таким образом, в отличие от обычных механических свойств материалов (при заданных условиях) критические значения J -интеграла и раскрытия вершины трещины являются не числами, а функциями приращения размера трещины Δa , которые принято называть J_R - и δ_R -кривыми. В свою очередь J -интеграл и раскрытие вершины трещины δ_r , характеризующие нагруженность тела, также зависят от размера трещины $a = a_0 + \Delta a$, где a_0 — размер исходной трещины. При этом доля приращения размера трещины Δa для текущего ее размера значения не имеет.

Предельное состояние тела с трещиной достигается при нагрузке P , обеспечивающей выполнение одновременно двух условий:

$$J(P, a) = J_R(\Delta a); T(P, a) = T_{\text{мат}}(\Delta a), \quad (1)$$

где $T = dJ/da \cdot E/R_{p0,2}^2$ — приложенный модуль разрыва; $T_{\text{мат}} = dJ_R/da \cdot E/R_{p0,2}^2$ — модуль разрыва материала; E — модуль упругости; $R_{p0,2}$ — условный предел текучести.

Величина Δa , при которой выполняется условие (1), соответствует предельному докритическому подрасту трещины при мягком нагружении.

© А. С. Зубченко, Г. С. Васильченко, А. В. Овчинников, 2003

Расчет по формуле (1) может быть заменен простым геометрическим построением. На рис. 1 показана процедура определения критической нагрузки $P_c = P_2$ и предельного докритического подраста трещины с помощью подбора значений.

Зависимость между J -интегралом и раскрытием центра трещины δ известна [4] и, следовательно, на основании геометрических построений на рис. 1 можно рассчитать диаграммы нагружения P - δ и зависимости P - Δa (рис. 2).

Наряду с этим традиционным подходом к описанию процесса разрушения пластичных тел с трещинами можно предложить модель разрушения, основанную на иных предпосылках. Существует некоторое раскрытие центра трещины δ , соответствующее страгиванию трещины, при котором площадь ослабленного трещиной сечения F убывает. Номинальное (усредненное) напряжение σ_H в этом сечении с увеличением δ возрастает, но не превышает предел прочности R_m (или истинное сопротивление разрыву, если учитывается относительное сужение).

Таким образом, произведение номинального напряжения и площади, определяющее приложенную нагрузку $P = \sigma_H F$, имеет максимум (рис. 3).

Если удастся установить зависимости

$$\sigma_H = f_1(\delta), F = f_2(\delta),$$

то тем самым будут определены значения критической нагрузки P_{max} и соответствующее изменение размера трещины.

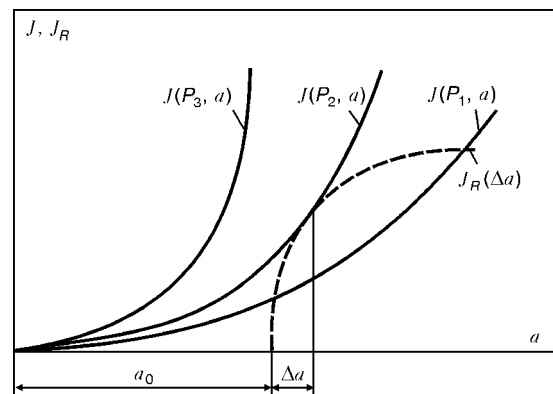


Рис. 1. Определение критической нагрузки и статического подраста дефекта по методу J_R -кривых

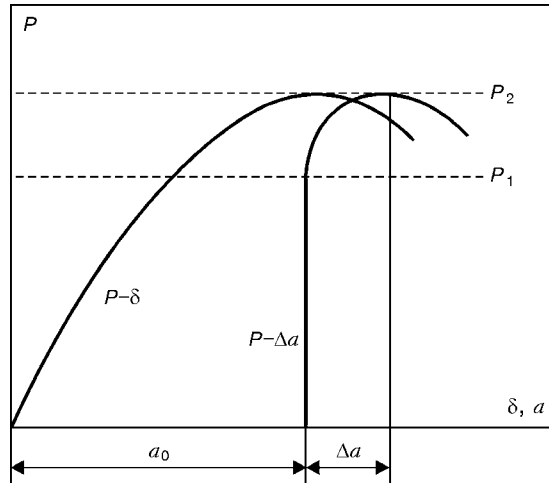


Рис. 2. Диаграммы $P-\delta$ и $P-\Delta a$

Авторы работ [5, 6] показали, что отношение приращения пластической составляющей δ_p , раскрытия трещины к соответствующему приращению ее длины (критический угол пластического раскрытия трещины)

$$\chi = \frac{d\delta_p}{da} \quad (2)$$

в существенно меньшей степени зависит от типа образца и его размера, чем J_R - или δ_R -кривые. Однако этот факт не повлиял на расчетную практику, поскольку оставалось неясно, каким образом характеристика χ может участвовать в критериальных зависимостях.

В настоящей работе предложено использовать величины χ для расчета критической нагрузки и докритического подраста трещины на основании ряда гипотез с помощью метода, получившего название метода пластического смещения.

Квазистатический рост трещины сопровождается взаимным пластическим смещением частей тела, расположенных по разные стороны трещины (рис. 4). Однако это смещение вызывает пластическое деформирование определенной зоны образца. Зная форму пластической зоны и пластическое смещение $\Delta h = \delta_p$, можно определить пластическую деформацию $\epsilon_p = \Delta h / h$ в каждом продольном элементе h пластической зоны.

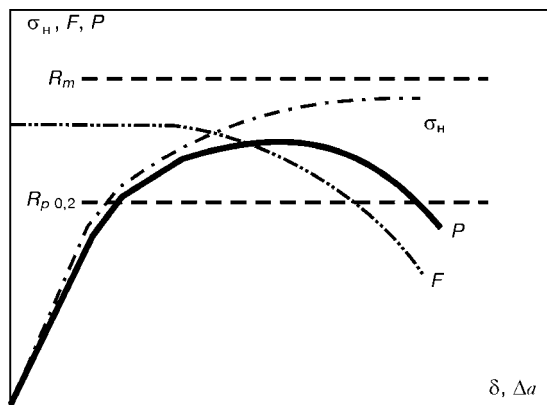


Рис. 3. Определение нагрузки как функции пластического смещения и подраста трещины

Закон упрочнения материала позволяет перейти от деформаций к напряжениям, а интегрирование напряжений по сечению создает нагрузку, соответствующую тому или иному значению подраста трещины.

Приращению пластического смещения dh соответствует приращение деформации

$$d\epsilon = \frac{dh}{h} = \frac{dh}{2x}, \quad (3)$$

где $x = h/2$ — расстояние между элементом протяженностью h и концом движущейся трещины (угол в вершине пластической зоны составляет приблизительно 90°). В свою очередь в соответствии с (2) $dh = d\delta_p = \chi da$.

Проинтегрировав выражение (3) от начального до текущего размера трещины, можно легко получить значение пластической деформации в зависимости от подраста трещины Δa и координаты x

$$\epsilon_p = \int_{a_0}^{a_0 + \Delta a} \frac{\chi da}{2x} = \frac{\chi}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta a}{x} \right) \approx \frac{\chi}{2} \frac{\Delta a}{x}. \quad (4)$$

Для вычислений напряжений воспользуемся аппроксимацией диаграммы деформирования Рамберга-Осгуда

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_0} + \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad (5)$$

где $\epsilon_0 = \sigma_0 / E$; ϵ_e — упругая составляющая деформации; $\sigma = R_{p,0.2}$; α и n — характеристики упрочнения материала.

Возвращаясь к формуле (4), получим связь между напряжениями в зоне пластической деформации и увеличением размера трещины

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\chi}{2\alpha\epsilon_0} \frac{\Delta a}{\chi} \right)^{1/n} = \sigma_0 \left(B \frac{\Delta a}{\chi} \right)^{1/n}, \quad (6)$$

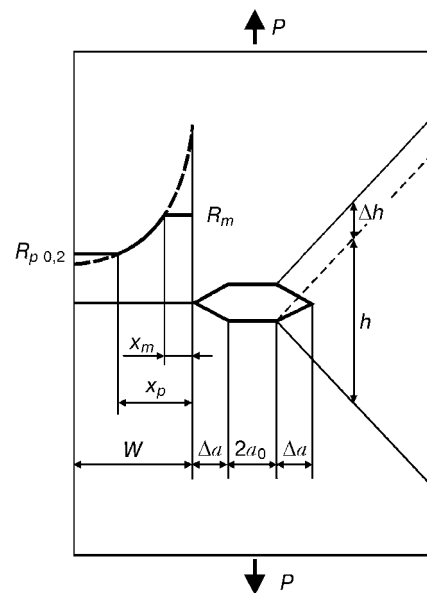


Рис. 4. Распределение напряжений (слева) и схема деформирования (справа) пластины с центральной трещиной



где $B = \chi / 2\alpha\epsilon_0$ — характеристика материала ($B = 20 \dots 400$).

Эпюра напряжений, рассчитанная по этой формуле, показана на рис. 4 жирной штриховой линией. При определении усилия P следует помнить, что напряжения, превышающие предел прочности R_m , вызывают существенную утяжку сечения. Возможен точный расчет с учетом этого фактора по формуле (4). В инженерной практике максимальное напряжение принято ограничивать значением предела прочности, при этом относительное сужение не учитывается. Как показало сопоставление расчетов с экспериментальными данными, эта предпосылка практически не влияет на точность расчетов при существенном упрощении методики.

В работе [7] показано, что необходимым условием движения трещины в вязких материалах является достижение напряжений предела текучести по всему ослабленному сечению. Таким образом, минимальный уровень напряжений может быть ограничен величиной $R_{p0,2}$ (см. рис. 4).

Проинтегрировав напряжения по сечению перемычки W (см. рис. 4) с учетом того, что исходный размер перемычки $W_0 = W + \Delta a$, получим формулу расчета усилия P в зависимости от подроста трещины

$$P = 2R_{p0,2} t x_p \left[\frac{R_m}{R_{p0,2}} \frac{x_m}{x_p} + \frac{n}{n-1} \left(\frac{B\Delta a}{x_p} \right)^{1/n} \times \left(1 - \left(\frac{x_m}{x_p} \right)^{n-1/n} \right) + \frac{W_0 - \Delta a}{x_p} \right], \quad (7)$$

где $x_m = \min \left\{ B\Delta a \left(\frac{R_{p0,2}}{R_m} \right)^n; \frac{W_0 - \Delta a}{x_p} \right\};$ $x_p = \min \left\{ B\Delta a; \frac{W_0 - \Delta a}{x_p} \right\};$

t — толщина пластины.

Правило вычисления x_m и x_p отражает тот факт, что граница тела с трещиной может попасть на любой из трех участков эпюры напряжений (см. рис.4). Формула (7) упрощается, если условия ее применимости разбить на три диапазона подроста трещины:

для малого подроста $\Delta a \leq \frac{W_0}{B+1}$

$$P = 2R_{p0,2} t \left\{ \frac{B\Delta a}{n-1} \left[n - \left(\frac{R_{p0,2}}{R_m} \right)^{n-1} \right] + W_0 - \Delta a(B+1) \right\}; \quad (8)$$

для большого подроста $\Delta a \geq \frac{W_0}{B(R_{p0,2}/R_m)^n + 1}$

$$P = 2R_m t (W_0 - \Delta a); \quad (9)$$

для промежуточных значений $\frac{W_0}{B+1} \leq \Delta a \leq \frac{W_0}{B(R_{p0,2}/R_m)^n + 1}$

$$P = 2R_{p0,2} t \frac{B\Delta a}{n-1} \left[n \left(\frac{W_0 - \Delta a}{B\Delta a} \right)^{(n-1)/n} - \left(\frac{R_{p0,2}}{R_m} \right)^{n-1} \right]. \quad (10)$$

Нагрузка, рассчитанная в зависимости от Δa по формулам (8)–(10), имеет максимум, положение которого определяют критические значения P и Δa для мягкого нагружения. При нагружении с заданной податливостью также применяется метод пластического смещения. Он позволяет для текущего значения Δa определить не только нагрузку, но и взаимное пластическое смещение точек приложения сил (упругое смещение рассчитывается традиционными методами). Зная смещение, можно скорректировать нагрузку и с помощью итерационного метода получить полное описание процесса разрушения.

В ЦНИИТМАШ проведены испытания крупногабаритных образцов сечением 300×65 мм. Образцы из стали 15Х2НМФА содержали центральные сквозные и полуэллиптические трещины и их испытывали на квазистатическое растяжение до разрыва.

Специально разработанная методика нанесения меток по фронту развивающейся в процессе нагружения трещины позволила экспериментально определить подрост трещины в зависимости от нагрузки. Полученные значения критической нагрузки находились в диапазоне 7...9 МН, докритический подрост трещины составлял 4...8 мм. На базе обобщения экспериментальных данных получены J_R -кривая и параметр χ для стали 15Х2НМФА толщиной 65 мм.

После этого проведена проверка возможности описания процесса разрушения с помощью методов пластического смещения (формулы (8)–(10)), J_R -кривых (формулы (1)) и R6 [2]. При этом использован наиболее универсальный вариант метода R6, подразумевающий определение J -интеграла. Для случая равномерного растяжения этот вариант формально совпадает с методом J_R -кривых, но имеет ограничение по условию пластической неустойчивости.

Расчет J -интегралов проводили по формулам, взятым из работ [2, 8]:

$$J = \frac{K^2}{E} \left[\frac{\epsilon_i/\epsilon_0}{\sigma_i/\sigma_0} + \frac{1}{2} \frac{(\sigma_i/\sigma_0)^3}{\epsilon_i/\epsilon_0} \right],$$

где K — коэффициент интенсивности напряжений, рассчитанный по формулам из работ [9] (для сквозных трещин) и [10] (для полуэллиптических трещин); ϵ_i — деформация, соответствующая усредненному напряжению σ_i ; $\sigma_i = \sigma/k_F$ — усредненное напряжение в ослабленном трещиной сечении; σ — напряжение без учета наличия трещины; $k_F = 1/(1+a/W)$ — коэффициент ослабления для центральной сквозной трещины; $k_F = 1 - \frac{a/t}{4/\pi + 2/\pi(a/c)/(a/t)}$ — для полуэллиптической трещины с полуосями a и c .

Экспериментально определены следующие параметры аппроксимации Рамберга–Осгурда (5) для

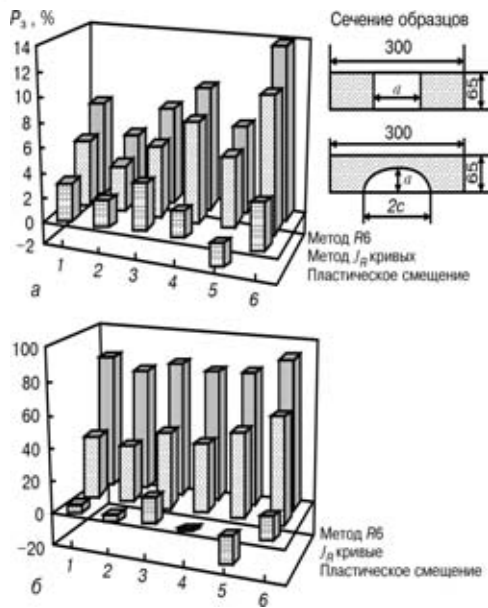


Рис. 5. Оценка погрешности методов расчета критической нагрузки (а) и докритического подраста трещины (б) для образцов со сквозными (1-3) и полуэллиптическими (4-6) трещинами (P_c — заниженные результаты)

стали 15Х2НМФА: $\sigma_0 = 556$ МПа; $\alpha = 1,22$; $n = 17,4$. Метод определения пластического смещения для полуэллиптических трещин не сводится к простым формулам типа (8)–(10), но легко реализуется численным образом.

Целью расчета являлось определение максимальной нагрузки и соответствующего подраста трещины. Сопоставление данных, полученных с помощью расчетов по трем методикам (пластическое смещение, J_R -кривые, $R6$), с экспериментом представлено на рис. 5.

Таким образом, для определения критической (максимальной) нагрузки приемлемы все три метода, а при вычислении докритического роста трещины предпочтительнее использовать метод пластического смещения. Он приемлем для описания процесса квазиразрушающих разрушений, но в этом случае этот метод рассматривается как элемент интерполяционного критерия, описанного в работах [11, 12].

Применение указанного подхода при решении практических задач с граничными условиями, заданными в величинах деформации или температурными полями, открывает новые возможности. Проиллюстрируем это на примере расчета трубопровода с теплоносителем, имеющим перепад температуры по высоте ΔT (рис. 6). По краям труба закреплена таким образом, что угловое и разрешающее продольное смещение исключается. При этом нагрузки и внутреннее давление не рассматриваются. Прогиб такой конструкции невозможен, поскольку наличие различных форм изгиба, отвечающих граничным условиям, подразумевает наличие переменного по длине трубы изгибающего момента. В рассматриваемой схеме момент изгиба по длине не меняется. Температурная деформация, значение которой оценивается как $\epsilon_T \approx \alpha_T \Delta T / 2$ (здесь α_T — коэффициент линейного температурного расширения), полностью компенсируется изгибающими моментами на концах трубы.

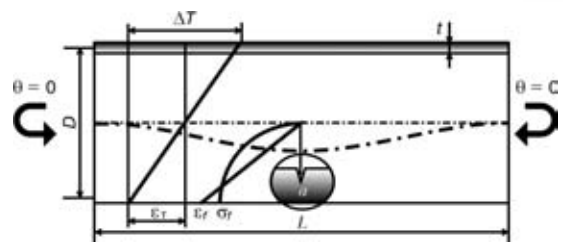


Рис. 6. Температурное нагружение трубопровода с кольцевым дефектом: жирная штрихпунктирная линия — невозможная форма изгиба; θ — угол поворота; L — длина трубопровода; D — его диаметр

Труба имеет поперечную трещину. Материал находится в вязком состоянии. При этом традиционный расчет по методу пластического шарнира не вполне корректен, так как смещение нейтральной оси отсутствует. Предельный изгибающий момент для такой конструкции легко рассчитать как удвоенный момент от напряжений, вызванных деформацией линейно возрастающей от нулевой (в середине высоты трубы) до определенной по методу пластического смещения. В первом приближении эта деформация соответствует

$$\epsilon_f = \epsilon_0 \left[\frac{\sigma_f}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right)^n \right],$$

где $\sigma_f = \frac{R_{p0,2} + R_m}{2}$.

Распределения напряжений и деформаций показаны на рис. 6.

Предельные моменты, соответствующие этим напряжениям, оказываются существенно ниже, чем рассчитанные по методу пластического шарнира. Для дефектов глубиной четверть толщины стенки погрешность невелика (20%), но при глубине, составляющей половину толщины, она равна уже 35%, а при глубине дефектов, выбранных для анализа реальных разрушений, погрешность достигает 50% и более (53% — при трех четвертях толщины).

Таким образом, для труб с дефектами температурный изгибающий момент опаснее, чем силовой. Этот вывод, с точностью до обратного, соответствует принятой системе назначения коэффициентов запаса. Он может быть опровергнут, если эффект разгрузки, обусловлен пластической деформацией в зоне дефекта. Оценку фактора разгрузки наиболее удобно провести с использованием метода пластического смещения.

Деформация ϵ_f реализуется на линейном размере приблизительно $t-a$, что соответствует значению W (см. рис. 4). Учитывая, что начиная с размеров дефектов порядка 30% толщины стенки, достижение предела текучести в неповрежденных сечениях вообще невозможно, ограничимся рассмотрением диапазона больших трещин (расчеты проводились для стали 10ГН2МФА).

Температурное растяжение нижней образующей трубы составляет

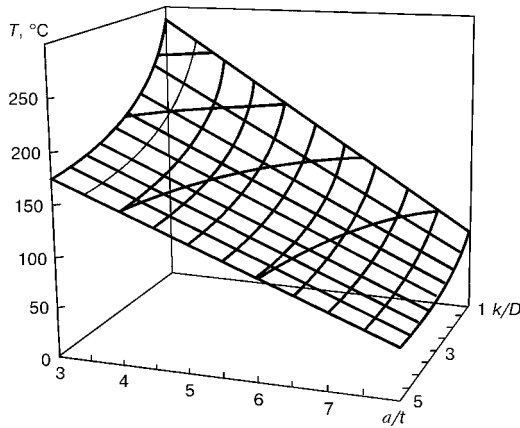


Рис. 7. Критический температурный перепад (a/t — глубина дефекта)

$$\Delta L_T \approx \alpha_T \Delta T L,$$

деформационное —

$$\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_p \approx \frac{M_c L}{\pi R^2 t E} + \epsilon_f (t - a),$$

где ΔL_e , ΔL_p — соответственно упругая и пластическая составляющие изменения размера L ; в первом приближении $M_c \approx 4\sigma_f R^2 (t - a)$.

Приравняв их, можно легко получить оценку критического температурного перепада

$$\Delta T_c \approx \frac{1 - a/t}{\alpha_T} \left(\frac{4\sigma_f}{\pi E} + \frac{\epsilon_f t/D}{L/D} \right) \quad (11)$$

Зависимость критического температурного перепада от глубины дефекта и длины трубы для типичного соотношения $t/D = 0,076$ показана на рис. 7 (t/D — толщина стенки трубы).

Представляет интерес оценка влияния геометрических факторов при заданном температурном перепаде. Из выражения (11) следует, что критическая длина трубы определяется формулой

$$L/D \approx \frac{\epsilon_f t/D}{\Delta T_c \alpha_T / (1 - a/t) - 4\sigma_f / (\pi E)}$$

Сочетание геометрических размеров трубы, для которых разрушение происходит при температурном перепаде 180°C , показано на рис. 8.

Следует отметить, что приведенные выше результаты получены без учета продвижения трещины и должны рассматриваться как первичная качественная оценка. В то же время с помощью метода пластического смещения обеспечиваются более точные количественные оценки.

В заключение отметим, что к достоинствам описанного метода относится не только простота расчетных принципов, но и возможность рассчитывать тела, содержащие трещины практически произвольной формы (например, сквозные трещины с нелинейными фронтами). В этом случае проводится численное интегрирование напряжений по

Method for calculation of limiting loads for a structure comprising welded joints with defects is suggested. The method allows modelling of the process of quasi-static propagation of cracks in ductile steels. Examples of the calculation are presented.

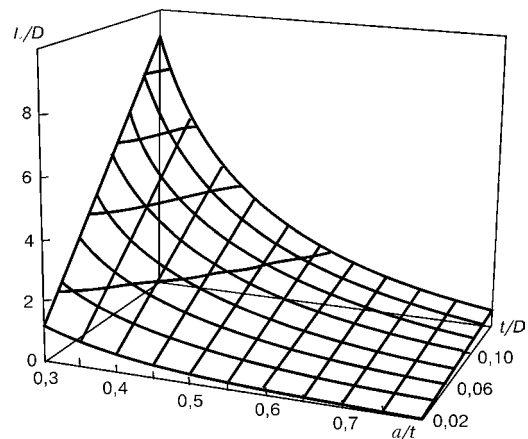


Рис. 8. Критические размеры трубы при температурном перепаде 180°C

ослабленному сечению при различных вариациях изменения фронта трещины.

Предложенный метод может быть широко использован при моделировании процессов повреждения сварных соединений в ответственных конструкциях. В настоящее время проводятся верификационные расчеты элементов конструкций и трубопроводов АЭС, для которых ранее получены результаты с помощью традиционных методов.

1. ASME. Sect. 11. Boiler and pressure vessel code. — N. Y.: Wiley, 1986. — 556 p.
2. Assessment of the integrity of structures containing defects / I. Milne, R. A. Ainsworth, A. R. Dowling, A. T. Stewart. — Berkeley, UK, 1986. — 280 p.
3. MEE/37. British standard committee draft and PW approaches on develop. pressure vessel technology / F. M. Burdakin. — London, 1979. — 95 p.
4. EPRI NP-1931. Engineering approach for elastic-plastic fracture analysis: Research Project 1237-1 / General Electric Co. / V. Kummar, M. D. German, C. F. Shih. — N.Y.: Schenectady, 1981. — 382 p.
5. Вчук М. П. Проблема нестабильности при пластическом разрушении // Материалы 5-й Междунар. конф. по разрушению (Канны, сент. 1981 г.). — М.: НИИИнформэнерго, 1985. — С. 83-95.
6. Smith E. The conditions for the onset of fracture at the tip of a part-through part-circumference crack in a pipe // Intern. J. Pressure Vessel and Piping. — 1983. — № 12. — P. 127-140.
7. Hasegawa K., Shimizu T., Shiga. Leakage and breakage estimation based on a net-stress approach for stainless steel pipes with circumferential cracks // Nucl. Eng. and Des. — 1984. — 81, № 2. — P. 285-290.
8. Ainsworth R. A. The assessment of defects in structures of strain hardening material // End. Fract. Mech. — 1984. — № 19. — P. 633-642.
9. Овчинников А. В. Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений K_I // Пробл. прочности. — 1986. — № 11. — С. 41-47.
10. Newman J. C., Raju I. S. Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads // NASA Technical Memorandum 85793. — 1984. — April. — P. 140.
11. Использование данных неразрушающего контроля в расчетах на прочность / Ю. И. Звездин, Е. Ю. Ривкин, Г. С. Васильченко, А. В. Овчинников // Тяж. машиностроение. — 1990. — № 3. — С. 12-14.
12. Овчинников А. В., Ривкин Е. Ю. Интерполяционный критерий механики разрушения // Механика разрушения и прочность сварных соединений и конструкций: Материалы науч.-техн. шк.-семинара. — Л., 1991. — С. 113-116.

Поступила в редакцию 28.02.2003



ПОЛНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРКИ СОСУДОВ И ТРУБ

Г. ТАКАНО, К. КАМО («Мицубиси Хэви Индастриз», Научно-исследовательский центр Такасаго, Япония)

Рассмотрена проблема обеспечения качества сварных соединений в условиях автоматической сварки по способу ТИГ тонколистовых сосудов и труб. Показано, что альтернативой высокой квалификации и опыта сварщика является применение сварочных машин, использующих разрабатываемые методы считывающего и адаптивного управления. Такие установки могут работать самостоятельно пока только в течение определенного периода работы. Необходимы дальнейшие шаги по созданию логики адаптивного управления режимами сварки с учетом сложности выполняемых работ.

Ключевые слова: автоматическая сварка, способ ТИГ, сосуды, трубы, качество соединения, контроль качества, адаптивное управление

Должно было пройти немало времени прежде, чем возникли условия, когда внедрение полностью автоматизированных сварочных технологий стало необходимостью, обусловленной, в первую очередь, безопасностью производства. Сложность в реализации такой задачи сопряжена с необходимостью обеспечивать высокую производитель-

ность труда и качество сварки в условиях текущих изменений квалификации персонала сварщиков. Особенно это становится актуальным тогда, когда многочисленная возрастная группа сварщиков достигает предпенсионного возраста.

Ниже представлены подходы, учет которых необходим при внедрении полностью автоматизированных сварочных технологий применительно к сварке ТИГ.

Основания для разработки полностью автоматизированной технологии сварки. Каждое предприятие рано или поздно сталкивается с проблемой старения персонала сварщиков и уменьшения доли молодых специалистов на производстве. В качестве примера на рис. 1 показано распределение сварщиков по возрастным категориям на одном из энергогенерирующих предприятий в Японии. Как видим, самую многочисленную группу составляют сварщики 45–49 лет. Такое неравномерное распределение сварщиков по возрастным группам с точки зрения безопасности организации производства означает, что в ближайшем будущем, когда большая группа сварщиков достигнет пенсионного возраста, предприятие столкнется с серьезной проблемой нехватки квалифицированного

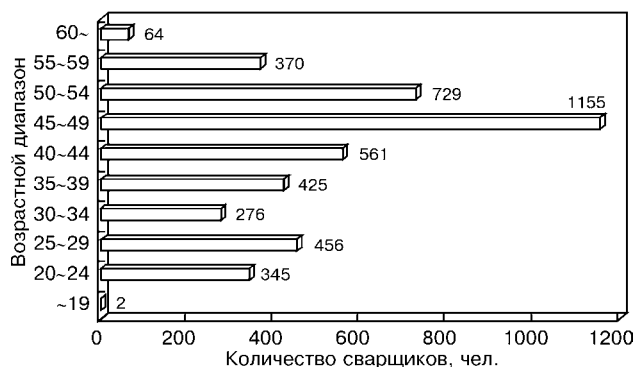


Рис. 1. Возрастное распределение сварщиков, занятых на электростанции Японии на 31.03.2000 г.

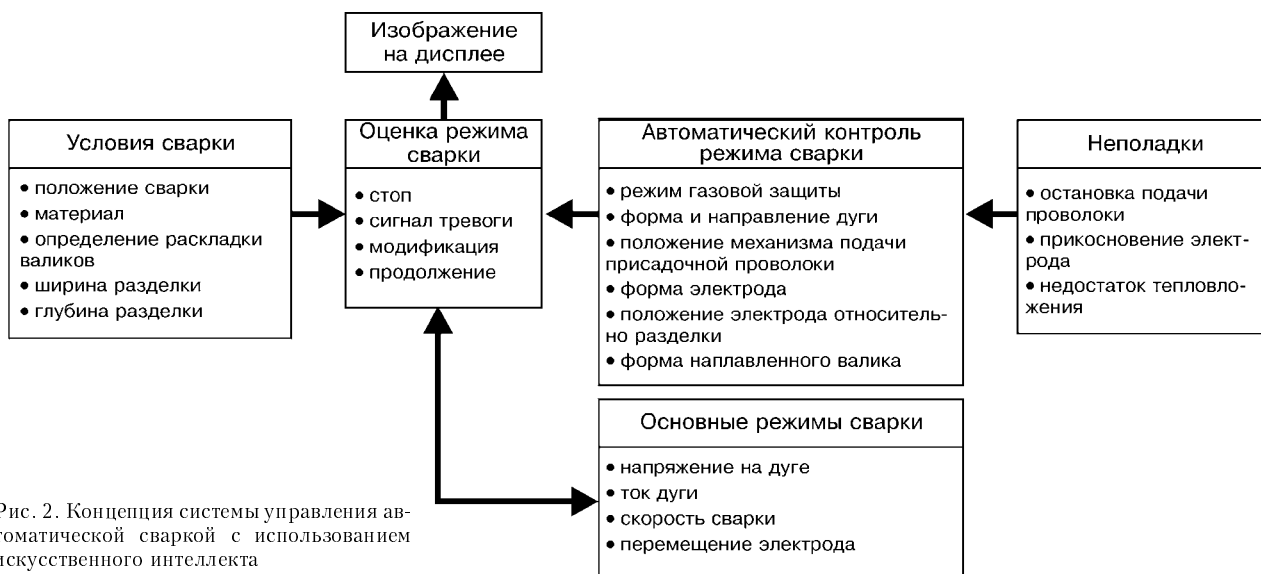


Рис. 2. Концепция системы управления автоматической сваркой с использованием искусственного интеллекта

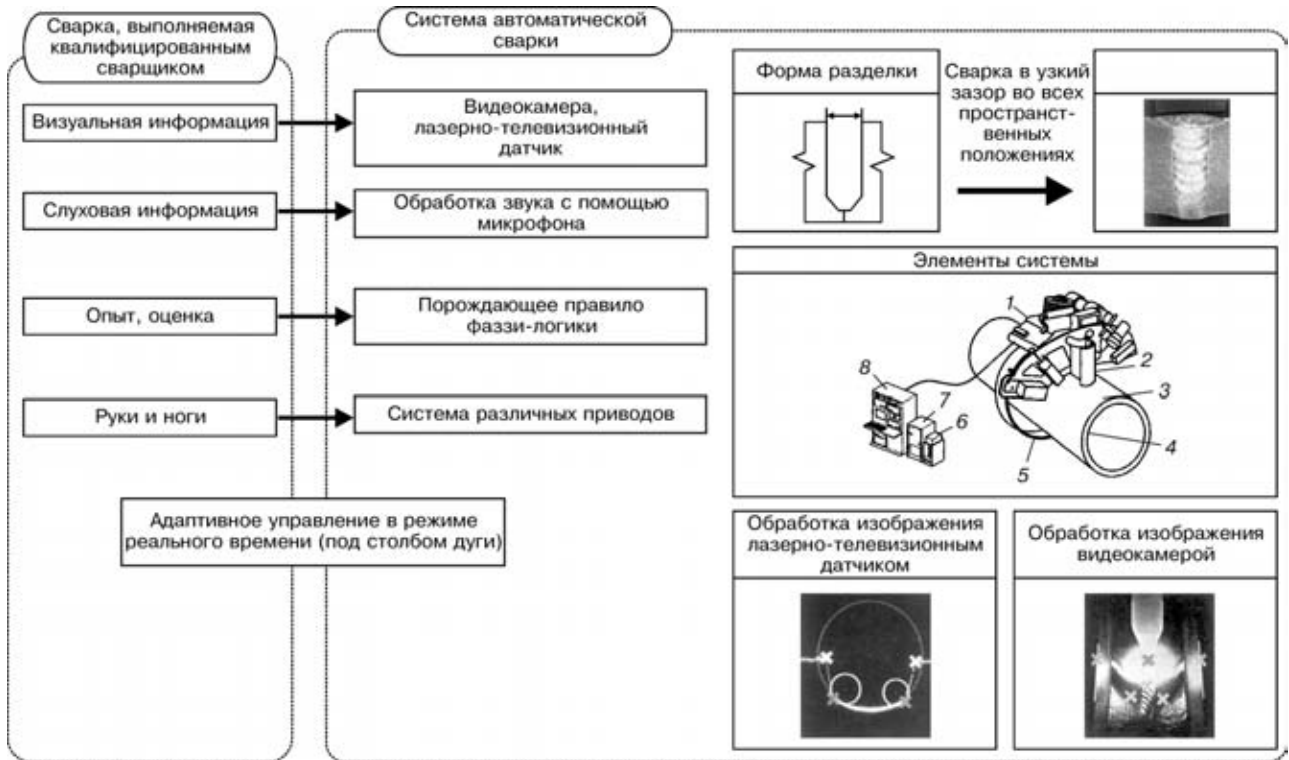


Рис. 3. Концепция процесса сварки во всех пространственных положениях (1 — сварочная головка; 2 — видеокамера; 3 — лазерно-телевизионный датчик; 4 — труба; 5 — направляющий рельс; 6 — система охлаждающей воды; 7 — источник питания; 8 — система управления сваркой)

персонала. Понятно, что эту проблему необходимо решать уже сейчас.

В связи с изложенным выше была поставлена задача разработки и внедрения полностью автоматизированных сварочных технологий, основывающихся на широком использовании сенсорных систем и методов адаптивного управления.

Для решения поставленной задачи разработана концептуальная схема, в соответствии с которой должна была функционировать полностью автоматизированная система управления сваркой (рис. 2). К сожалению, для такой задачи трудно предложить какие-либо классические методы решения. Поэтому постановку задачи разбили на две подзадачи:

определение тех параметров сварочного процесса, за которыми сварщики следят и на что обращают внимание;

выделение тех параметров сварочного процесса, которые сварщики регулируют.

В результате проведенных исследований сварки ТИГ обнаружено, что наиболее часто выполняли регулировку положения электрода и направляющего канала, в то же время режим сварки (ток дуги) регулировали редко. В процессе сварки также требовалось несколько раз производить замену электрода (это характерно только для сварки ТИГ). Отмечено, что регулировка положения направляющего канала, оценка положения электрода и его формы, положение стенок разделки, а также оценка формы сварочной ванны и характера поверхности наплавленного валика выполнялась исключительно на основе визуальной информации. В связи с этим было принято решение о преимуще-

ственном использовании средств технического зрения.

Автоматическая установка для сварки неповоротных стыков труб. Эта установка позволяет выполнять сварку кольцевых неповоротных стыков стальных нержавеющей труб диаметром 165...1000 мм и толщиной 7,1...35,0 мм. Стык подготавливается под сварку в форме узкой глубокой разделки (рис. 3). Автоматическая система управления сваркой построена таким образом, чтобы за счет использования различных датчиков и исполнительных механизмов, управляемых компьютерной программой, воспроизвести действия квалифицированного сварщика.

На рис. 4 показана схема реализации задачи обеспечения качества сварки. В предлагаемом подходе выполнена декомпозиция общей задачи управления на ряд функциональных регуляторов. Объект управления также представлен в виде системы более простых объектов. В свою очередь, задача автоматического управления разложена на две: адаптивное управление и контроль качества процесса сварки.

Для обеспечения качественного сварного шва система управления оснащена различными датчиками. Ведущую роль среди них занимает CCD-камера (видеокамера), размещенная на сварочной горелке спереди по ходу сварки. Получаемые от нее видеозображения зоны стыка вводятся в компьютер, где из них формируются оценки положения электрода, стенок разделки, положения проволоки в горизонтальной плоскости, размеров сварочной ванны, износа электрода (рис. 5).

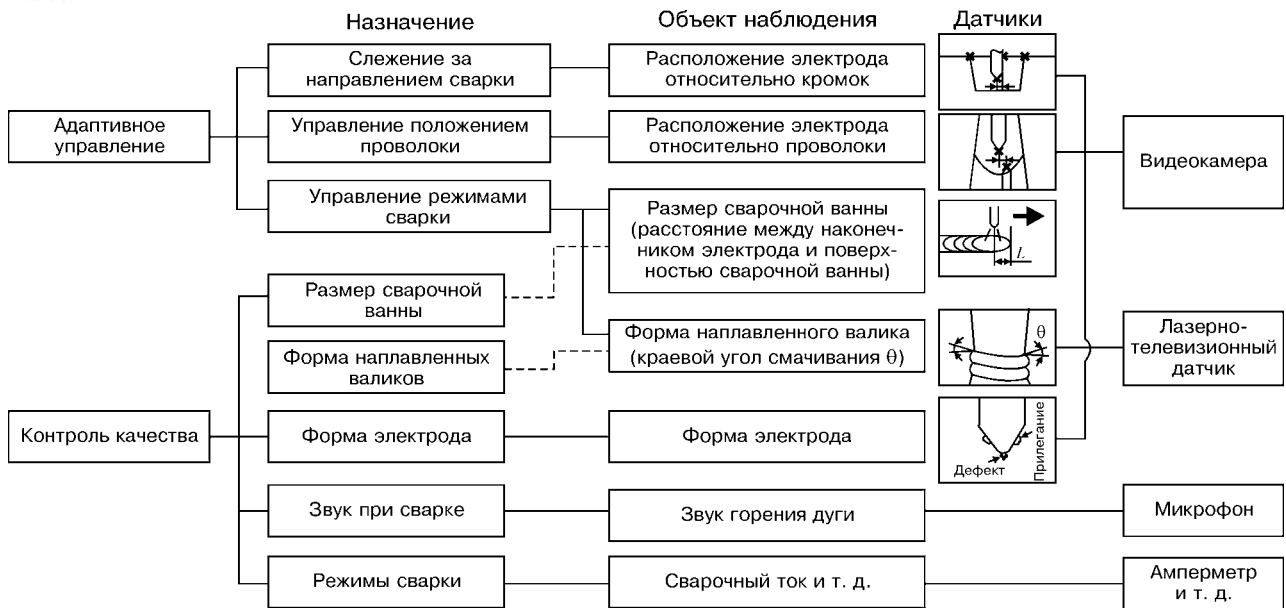


Рис. 4. Функция контроля качества шва и датчики установки для сварки во всех пространственных положениях

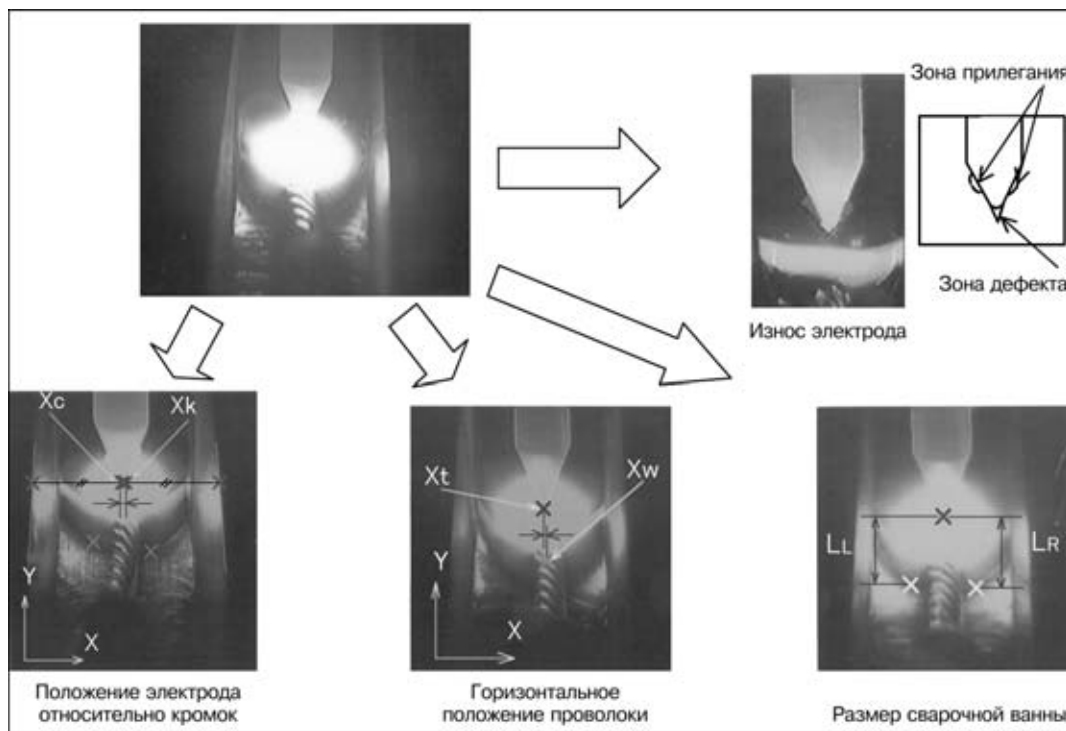


Рис. 5. Информация, полученная с помощью видеокамеры

Другой, лазерно-телевизионный датчик, состоящий из видеокамеры и лазерного прожектора световой полоски, расположен сзади горелки. Видеоизображение, формируемое этим датчиком, используется для оценки краевого угла смачивания, который представляет собой угол между поверхностью наплавленного валика и стенкой разделки (рис. 6).

Информация, полученная с помощью видеокамеры и лазерно-телевизионного датчика, используется для адаптивного управления режимом сварки. Схема работы адаптивного алгоритма показана на рис. 7.

Для подстройки положения электрода используется метод теории фаззи-логики, так называемой нечеткой теории. Скорость коррекции положения

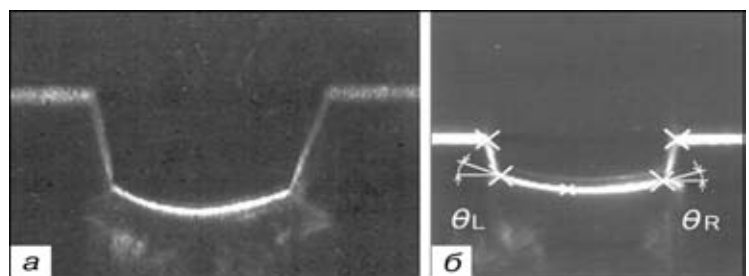


Рис. 6. Изображение, полученное с помощью лазерно-телевизионного датчика (а) и краевого угол смачивания валиков (б)

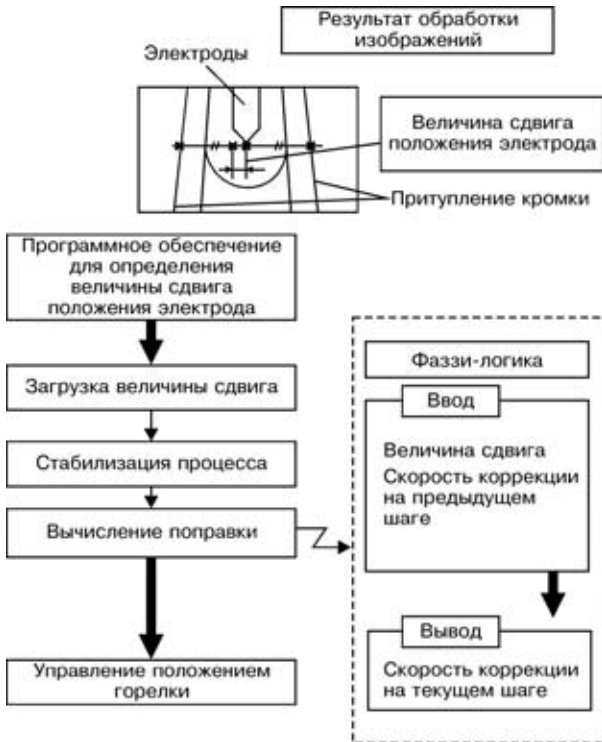


Рис. 7. Метод слежения за линией сварки

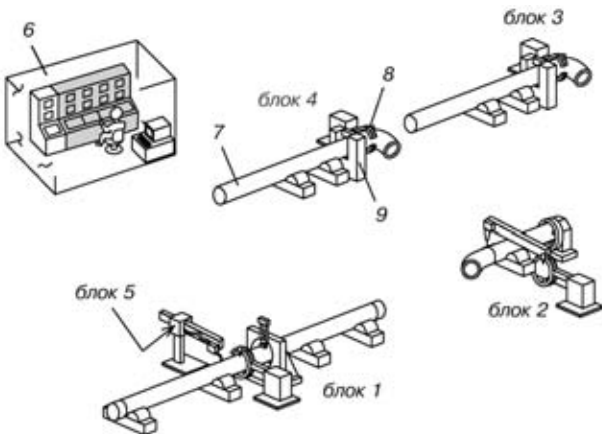


Рис. 8. Схемы элементов сварочной установки с несколькими головками: 1-5 — подсистема; 6 — комната оператора; 7 — труба; 8 — сварочная головка; 9 — зажимное приспособление

электрода на текущем шаге рассчитывается на основании оценки текущего смещения электрода и скорости коррекции на предыдущем шаге.

Многостовая автоматическая сварочная установка. Данная сварочная установка позволяет вести групповой процесс автоматической сварки кольцевых стыков труб на тепловых и атомных электростанциях. При этом трубы вращаются, а положение сварочных головок зафиксировано.

На рис. 8 приведена схема организации многостовой сварки с несколькими головками: тип разделки — односторонняя с узким зазором, материал — углеродистая сталь (сталь Cr-Mo); внешний диаметр трубы 139... 558 мм; толщина 18... 100 мм; длина более 1800 мм. Главной особенностью установки является то, что управление пятью подсистемами осуществляется одним оператором из комнаты оператора с использованием

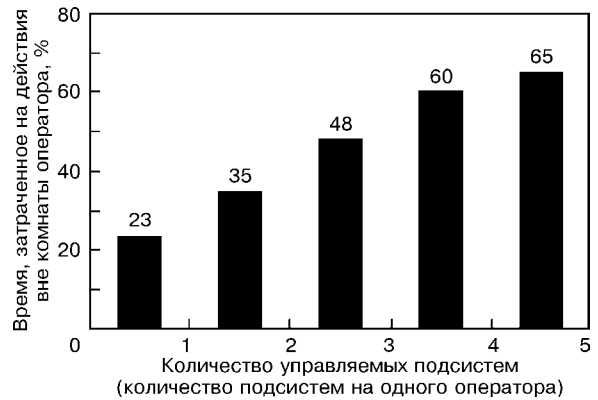


Рис. 9. Зависимость управляемых подсистем от времени, затраченного на действия вне комнаты оператора

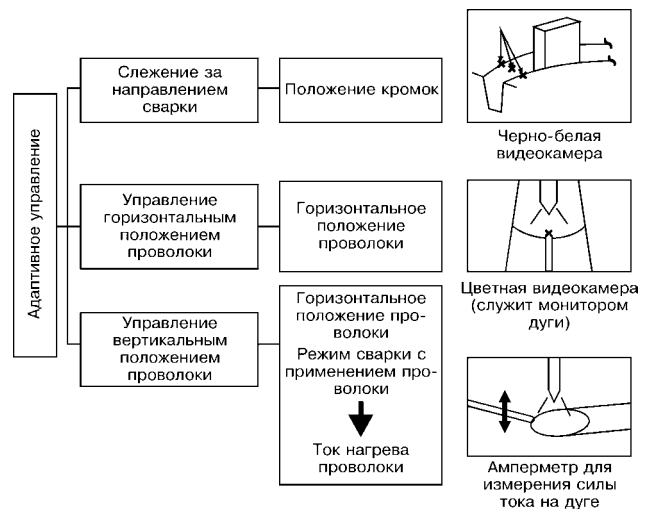


Рис. 10. Управляемые и контролируемые подсистемы и типы датчиков

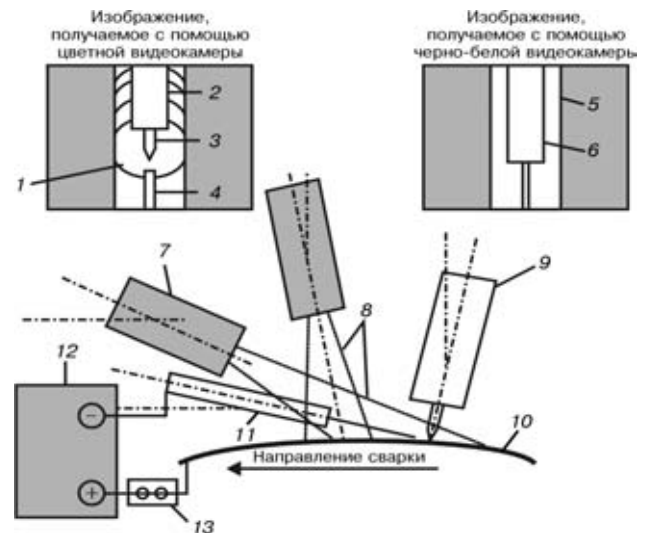


Рис. 11. Схема расположения датчиков: 1 — сварочная ванна; 2 — горелка; 3 — электрод; 4 — проволока; 5 — притупление кромки; 6, 11 — мундштук для проволоки; 7 — цветная видеокамера; 8 — дальность контроля; 9 — сварочная горелка; 10 — труба; 12 — источник нагрева проволоки; 13 — детектор тока нагрева

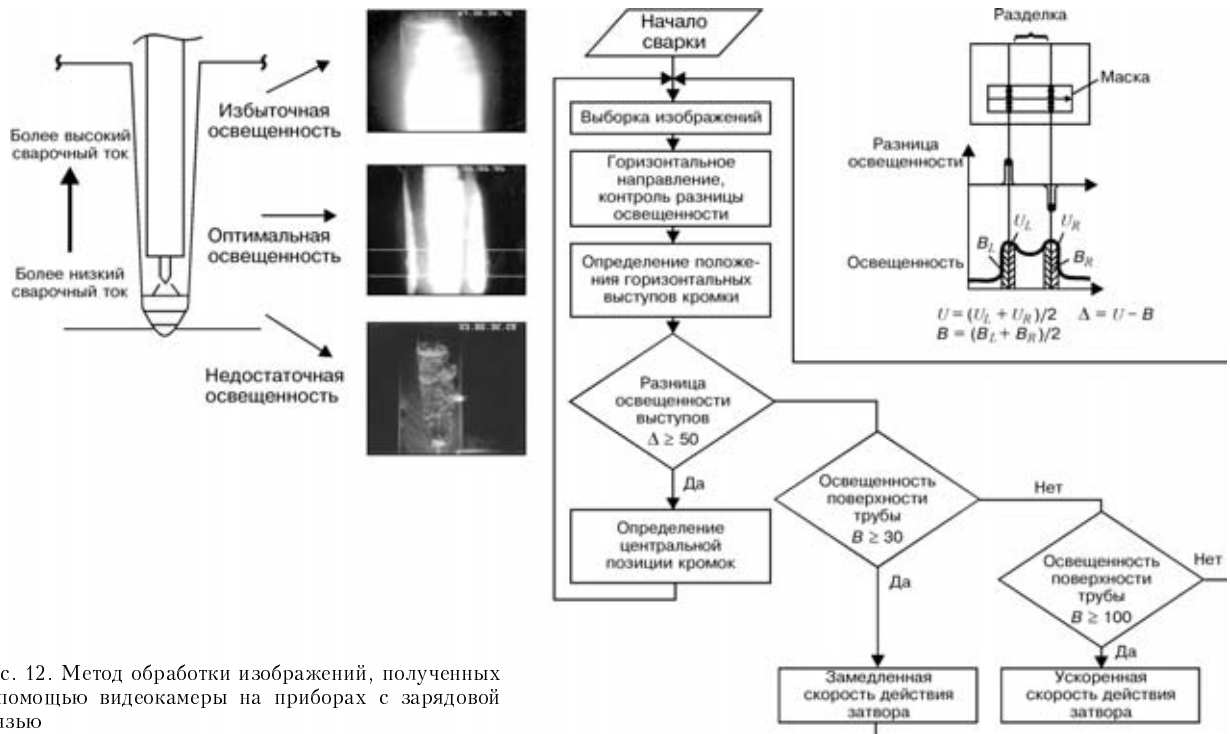


Рис. 12. Метод обработки изображений, полученных с помощью видеокамеры на приборах с зарядовой связью

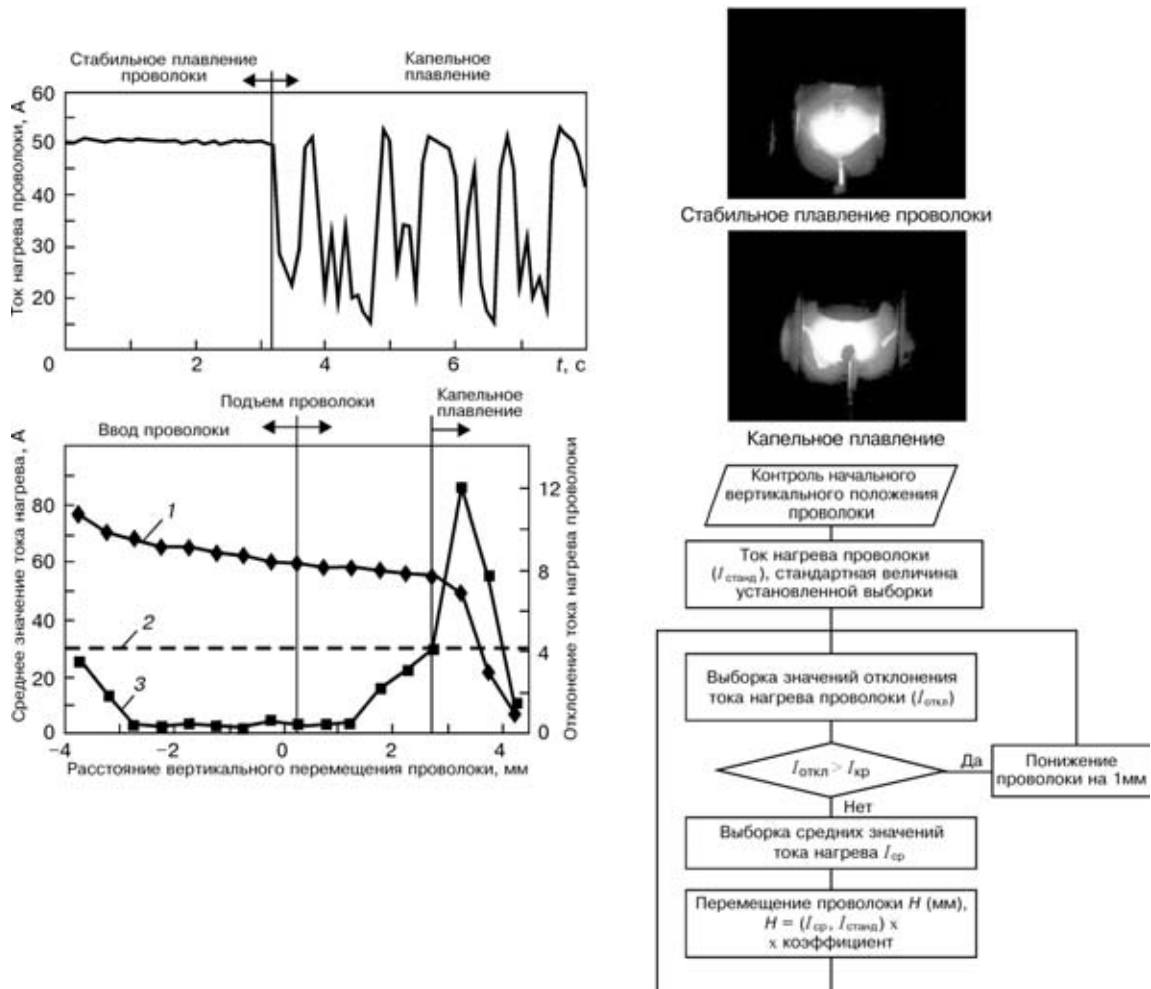


Рис. 13. Метод определения вертикального положения проволоки и электрического тока нагрева проволоки: 1 — среднее значение тока нагрева проволоки; 2 — величина отклонения тока нагрева проволоки; 3 — пороговое значение отклонения тока нагрева проволоки



монитора дуги при сварке ТИГ. Однако если количество сварочных подсистем на одного оператора увеличится, время, проведенное вне комнаты оператора, тоже возрастает при выполнении таких действий, как удаление сваренной трубы, внесение новой и замена вольфрамового электрода (рис. 9). Действительное время, затрачиваемое на контроль режимов сварки, уменьшается на 35 %. Для обеспечения качества сварки даже при этом ограничении выполнялось такое адаптивное управление, как слежение за линией сварки, а также за горизонтальным и вертикальным положением проволоки, которые контролирует оператор (рис. 10).

Метод определения положения кромок с использованием черно-белой видеокамеры на схеме расположения датчиков (рис. 11) показан на рис. 12. Этот метод использует изображение черно-белой видеокамеры и определяет разницу освещенности внутренней (более светлой) и наружной (более темной) кромок путем обработки изображения. Он автоматически регулирует выдержку затвора видеокамеры для получения нужной освещенности в случае изменения режимов сварки. Система слежения за линией сварки используется для поддержания положения, введенного в начале сварки.

Поскольку вертикальное положение проволоки тяжело оценить с помощью выборки изображений, ток нагрева проволоки применяется для контроля ее положения. При этом используется зависимость (стабильность) тока нагрева проволоки от перехода расплавленного металла в сварочную ванну (рис. 13).

Установка для автоматической сварки внахлестку тонких листов. Внутреннюю конструкцию подземных резервуаров для хранения сжиженного природного газа формируют способом соединения тонких листов нержавеющей стали с использованием сварки внахлестку.

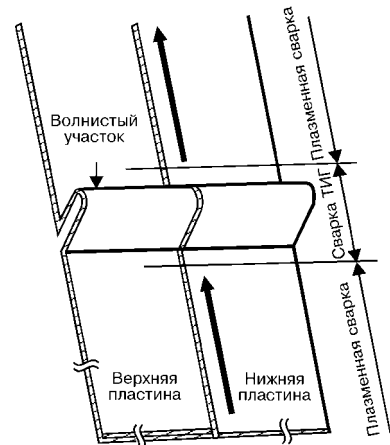


Рис. 14. Пример формы сварного соединения

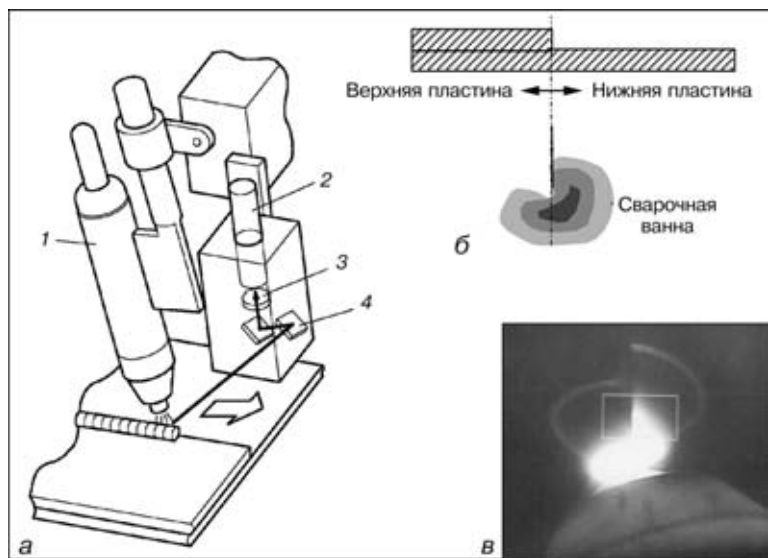


Рис. 15. Расположение датчика и обработка изображения: а — расположение сварочной горелки и датчика (1 — плазменная горелка; 2 — видеокамера; 3 — фильтр; 4 — зеркало); б — обработка изображения для распознавания линии сварки; в — изображение, полученное с помощью видеокамеры

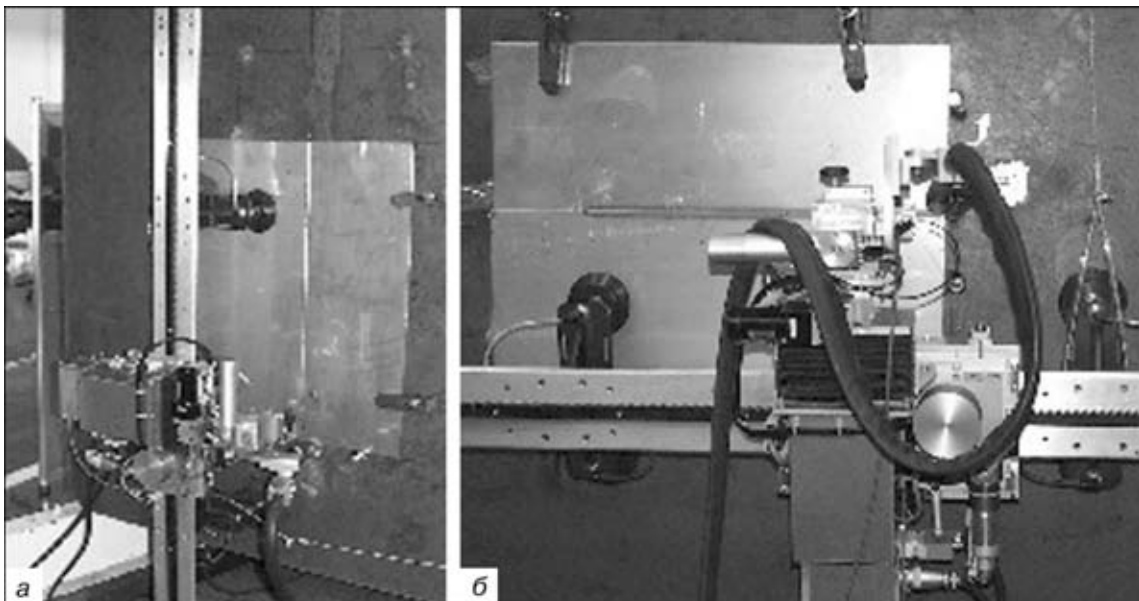


Рис. 16. Выполнение сварки в вертикальном (а) и горизонтальном (б) положении



тку ровных и изогнутых листов (рис. 14). Для выполнения нахлесточных соединений из стали SUS304 толщиной 2 мм была использована высокоскоростная плазменная сварка вертикальных и горизонтальных тонких пластин для изделия с длинной прямой осью шва.

С учетом того, что листы довольно тонкие, при незначительном смещении горелки относительно оси шва происходило образование таких дефектов, как проплавление насквозь, подрез и недостаточное проплавление. Поскольку трудно с точностью зафиксировать установку для автоматической сварки вдоль оси шва, применяли слежение за линией сварки. Такую возможность обеспечивало распознавание линии сварки с помощью видеокамеры, включая шаг, обусловленный разницей между верхней и нижней пластинами. Благодаря такому распознаванию плазменная горелка может с точностью перемещаться вдоль линии сварки (рис. 15).

На рис. 16 показано выполнение сварочных работ в вертикальном и горизонтальном положении.

Темы дальнейших разработок. Для того чтобы машины могли выполнять всю регулировку, касающуюся сварки, вместо квалифицированных сварщиков разработаны различные датчики. По

мере того, как высокоэффективные видеокамеры и компьютеры становятся дешевле и доступнее, использование обработки изображений визуальных датчиков в сварочных установках становится более доступным. Эти автоматические сварочные установки могут работать самостоятельно в течение определенного периода времени при определенных условиях. Однако на данном этапе они способны выполнять только простые задачи (например, слежение за линией сварки и определение положения проволоки). Прежде, чем они достигнут уровня контроля режимов сварки, при котором необходимо учитывать все переменные, должны быть разработаны следующие методы:

распознавание трехмерной формы сварочной ванны, что в значительной степени способствует предупреждению образования сварочных дефектов;

«относительность» трехмерной формы сварочной ванны и сварочного дефекта или количественное определение критериев оценки, подобно той, которую делают сварщики;

количественное определение других факторов, помимо сварочной ванны;

логика адаптивного управления режимами сварки для достижения необходимого качества сварки.

The problem of quality assurance of welded joints in the conditions of TIG automatic welding of thin-sheet vessels and pipes is considered. It is shown that the alternative of high skill and experience of welder is the application of welding machines using the methods of read and adaptive control. These machines can operate separately until now only during a certain period of operation. The next steps are necessary for the creation of logic of adaptive control of welding conditions with allowance for the difficulties in fulfillment of jobs.

Поступила в редакцию 23.07.2003



ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОГО СЕВЕРА

Академик РАН **В. П. ЛАРИОНОВ**, **О. И. СЛЕПЦОВ**, д-р техн. наук,
В. В. ЛЕПОВ, **С. П. ЯКОВЛЕВА**, кандидаты техн. наук
(Объединенный ин-т физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск РФ)

Рассмотрены проблемы эксплуатации и ресурса промышленных объектов и металлоконструкций в условиях российского Севера. Описаны направления фундаментальных и прикладных исследований якутских ученых по созданию новых материалов, процессов сварки, поведения сварных конструкций при эксплуатации. Рассмотрены перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: сварные конструкции, оценка состояния, ресурс, экстремальные условия, конструкционные материалы, механические свойства, структура, трещины, материаловедческие задачи

Задачи оценки состояния и продления ресурса промышленных объектов, техники и металлоконструкций особенно актуальны для северных регионов вследствие специфического влияния на материалы низких температур при эксплуатации. Поэтому отрасль нефтегазового строительства, ранее не причислявшаяся к экологически опасным, стала таковой в субарктических и арктических регионах. В связи с этим понятна важность задачи обеспечения безопасности технических объектов в регионах холодного климата — Европейском Севере, Тюменском Севере, Ямале и др.

Среди важнейших факторов, учет которых необходим с момента создания и на всем протяжении эксплуатации конструкции, следующие: сезонный фактор, ремонтпригодность в условиях холодного климата, высокая стоимость восстановительных работ и пр. Например, сезонный фактор проявляется в необходимости учета низких температур зимой, резких суточных перепадов в межсезонье, высокой паводковой опасности весной, оттаивания мерзлых пород и др. [1–3]. Особенности условий, при которых производятся восстановительные работы в регионах российского Севера, включая выполнение таких технологических операций, как ремонтная и монтажная сварка, зачастую определяют работоспособность и надежность технических систем. Большинство аварий техногенного характера на Севере происходит в результате несоответствия существующих технологий сварки условиям эксплуатации, несоблюдения сварочных норм и рекомендаций [1–5]. Все эти факторы тесно связаны также с профессиональной подготовкой инженеров-сварщиков и специалистов по неразрушающему контролю, их сертификации и аттестации с учетом региональных условий климата.

Поэтому необходима разработка научно-технических подходов к оценке и продлению ресурса объектов техники и металлоконструкций, которые

должны базироваться на комплексном анализе всех стадий их жизненного цикла, включая проектирование, изготовление и эксплуатацию.

Широкий спектр экстремальных условий эксплуатации диктует новые технические требования к конструкторским решениям, материалам и технологическим процессам. При понижении температуры окружающей среды, как известно, в первую очередь сталкиваются с явлением хладноломкости. Поэтому одной из первостепенных задач при обеспечении работоспособности машин и конструкций в условиях Севера является применение соответствующих хладостойких материалов. Простое применение низколегированных хладостойких сталей, ставшее уже традиционным решением этой задачи, не снимает полностью проблемы сокращения количества отказов и катастрофических разрушений конструкций и машин. Безопасность эксплуатации и продление ресурса технологического оборудования, карьерной техники, трубопроводов и инженерных сооружений в арктических районах требует разработки конструкционных материалов (в том числе и неметаллических), обладающих высокими хладо- и износостойкими свойствами, сохраняющих свои характеристики при длительном использовании в условиях низких температур и при резких перепадах температур [2, 6, 7]. Немаловажно, что современные материалы позволяют уменьшить массу машин и конструкций при одновременном улучшении их эксплуатационных показателей.

Имеется мировой опыт использования колоссального количества материалов, причем каждый отличается по свойствам и назначению [6]. При этом непрерывно создаются новые материалы. Укрупненно можно выделить четыре основных вида конструкционных материалов: металл, керамика, композиты и полимеры. Причем несмотря на появление и постоянный рост объемов производства неметаллических материалов, наиболее распространенными конструкционными материалами в ближайшие десятилетия по-прежнему останутся стали и сплавы. Это предопределяется широким диапазоном их прочности и пластичности, относительно



низкой стоимостью производства, возможностью многократной утилизации и регенерации. Высокие конструктивные свойства, низкая удельная энергоемкость и цена еще долго будут предопределять приоритет металлов и сплавов. В связи с этим создание хладостойких конструкционных материалов должно базироваться прежде всего на решении задачи выявления природы вязкохрупкого перехода в металлах, механизма и особенностей дегградации их структуры.

Одним из определяющих требований при создании хладостойких конструкционных сталей является обеспечение мелкозернистой структуры, ограниченное содержание вредных примесей. Например, металл должен иметь пониженное содержание серы. В целом же пути и принципы создания хладостойких сплавов пока находятся только на стадии разработки. Существует ряд теорий феноменологического характера, описывающих преимущественно влияние металлургических факторов. Например, согласно имеющимся отечественным и зарубежным исследованиям в области влияния легирующих элементов на свойства стали микролегирующие и модифицирующие редкоземельными металлами повышает как прочностные свойства сталей, так и одновременно хладостойкость. Можно говорить об ответах только на отдельные вопросы, а основополагающих теорий по физической картине процесса перехода металлов из вязкого в хрупкое состояние пока нет. Отсутствуют теоретические основы, дающие возможность исследовать физическую природу хладноломкости на уровне коллективизированных электронов, межатомных сил, типа межатомных связей, искажений и изменений типа кристаллической решетки, в частности, при создании новых конструкционных сплавов. Особую значимость в этих условиях приобретают исследования, направленные как на разработку теоретических основ создания материалов с новыми свойствами на базе знаний об электронной и микроскопической структуре вещества, так и на изучение фундаментальных аспектов физической природы вязкохрупкого перехода материалов при низких температурах.

Якутские ученые уже более 30 лет занимаются разработкой хладо- и износостойких конструкционных материалов [8]. В результате изучения ряда физико-механических характеристик (внутреннего трения, микротвердости, электропроводности, эффекта Мёссбауэра и пр.) ими было показано, что вязкохрупкий переход углеродистых сталей обусловлен интенсивным образованием ковалентных связей (изменением электронной конфигурации атомов), влияющих на релаксационную способность материала [2]. В результате сделан вывод о возможности повышения хладостойкости сталей путем легирования определенными химическими элементами, снижающими направленную составляющую химической связи материалов на основе железа. В 1980-е годы в Институте физико-технических проблем Севера (ИФТПС) СО РАН совместно с коллегами из Томска создан новый износостойкий безникелевый сплав ИСЦ-1 — высокохромистый чугуун, оптимально модифициро-

ванный редкоземельными металлами. Он опробован и внедрен на горно-добывающих предприятиях Якутии. Кроме того, совместно с Уралчерметом и СО РАН разработана хладостойкая износостойкая сталь, опытно-промышленные испытания которой также проведены на горно-добывающих предприятиях Якутии. Сейчас, в условиях возрождения интереса к фундаментальным, инновационным разработкам, эти исследования получили свое продолжение в региональных программах РФФИ «Арктика», целевых республиканских программах, а также в рамках интеграционного комплексного проекта СО РАН.

В последние годы получили широкое развитие исследования наноматериалов. Как отмечалось выше, одним из методов улучшения механических свойств металлов и понижения температуры вязкохрупкого перехода является изменение зерна, и среди наиболее эффективных способов формирования структуры металлов — пластическая деформация. В результате интенсивного пластического деформирования может быть достигнут средний размер зерна в пределах от единиц до сотен нанометров; при этом очень высокая прочность сочетается с достаточной пластичностью. Несмотря на большое количество публикаций по этой тематике, процессы и механизмы, обуславливающие существенные изменения в свойствах, остаются еще малоизученными. Для практического использования металлов с нано- и субмикроструктурной структурой необходимы более полные сведения как об их механических свойствах, так и об механизмах их формирования. В этом направлении нами начаты исследования теоретических и экспериментальных основ получения повышенных механических свойств и хладостойкости конструкционных сталей путем обеспечения нанокристаллических структурных состояний.

В материаловедении важнейшим направлением фундаментальных исследований является изучение внутренних механизмов разрушения на различных структурных уровнях деформации, а также экспериментальное и компьютерное моделирование всего жизненного цикла конструкции и ее элементов [9]. Вместе с тем, до сих пор механики и материаловеды оперируют феноменологическими теориями, не связанными с действительным строением и структурой деформации материала. В то же время в физике твердого тела накоплен большой объем знаний о внутренней структуре вещества, который остается невостребованным материаловедом.

Ведущиеся в ИФТПС исследования по разработке теории создания материалов включают изучение макроскопических характеристик прочности с вариацией температуры в широких пределах, рентгеноструктурный и дифрактометрический анализ тонкой структуры материала, оптической, растровой и зондовой микроскопии и фрактографии поверхностей разрушения и деформирования металлов, металлографии и исследований химического состава образцов. При этом немаловажное место занимает компьютерная обработка результатов эксперимента и математическое моделиро-



вание [9, 10]. Для выявления механизмов повреждения и разрушения металла при низких температурах исследованы пластически деструкционные аспекты процесса разрушения элементов реальных конструкций и модельных образцов, кроме того, выполнен комплекс металлографических и микроструктурных исследований. Получены уникальные данные относительно поведения материала при замедленном разрушении под действием водорода, влиянии взрывного нагружения на сопротивление материала образованию холодных трещин и распространению хрупкого разрушения [11]. Разрабатываются средства оценки ресурса узлов и деталей машин, эксплуатирующихся в условиях холодного климата, а также иерархическая модель разрушения материала при совместном действии различных силовых, температурных и коррозионных нагрузок (рис. 1). Для создания новых материалов, имеющих оптимальное количество ковалентных связей в исходном состоянии, также предложено применение системного подхода на основе генезиса целостности. Предложен ряд моделей хладноломкости, получивших свое экспериментальное подтверждение.

Для выявления механизмов разрушения металла при низких температурах исследованы поверхности разрушения элементов конструкций и модельных образцов. Осуществляются оптическая и туннельная сканирующая фрактография изломов образцов, разрушенных при различных внешних условиях и после различных видов воздействия на металл, комплекс металлографических и микроструктурных исследований.

Поверхность субмикротрещины, начинающейся от карбидного включения, показана на рис. 2. Субмикротрещина распространяется по кристаллографическим плоскостям мартенсита. Двухмерное изображение дает возможность измерить параметры субмикротрещины. По трехмерному изображению и профилю определен размер карбидного включения.

Использование в технических объектах новых современных материалов подразумевает и разработку передовых технологий, в частности технологии сварки. Например, вследствие высокой чувствительности сталей повышенной или высокой прочности к термическому воздействию, возможно значительное ухудшение механических свойств металла в зоне сварного шва. Действительно, из результатов анализа разрушений сварных изделий при низких температурах следует, что наибольшая их часть приходится на сварные соединения или начинается в них. Кроме того, при сварке на холоде горение сварочной дуги имеет свои особенности — температура сварочной дуги повышается в результате сжатия ее столба [1]. Следовательно, изменяется весь тепловой баланс сварочной ванны, вся кинетика термического и термомеханического циклов, фазовых и структурных превращений. Очевидно, что оптимизация технологий свар-



Рис. 1. Общая схема комплексных исследований процессов деформирования и разрушения гетерогенных сред на основе иерархической модели

ки при низких температурах воздуха требует учета всех этих факторов.

Проблема сварки конструкционных сталей с инженерной точки зрения связана с необходимостью обеспечения комплекса свойств по равнопрочности, предотвращению образования холодных трещин, а также структур, снижающих сопротивляемость сварных соединений хрупкому раз-

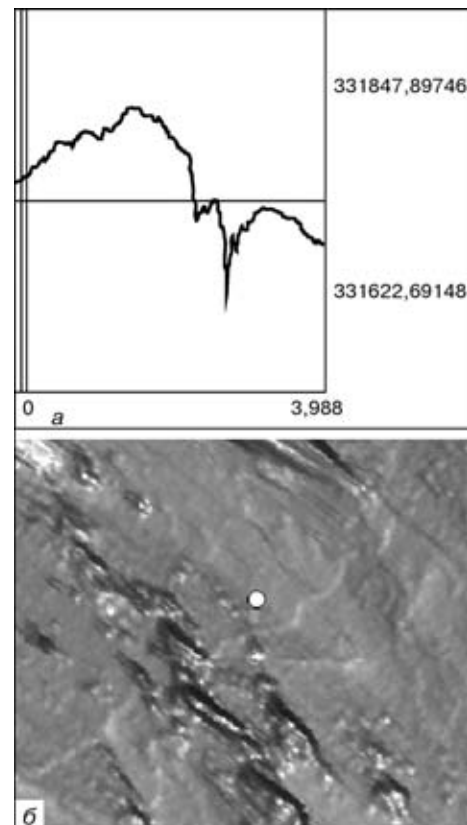


Рис. 2. Очаговая трещина, инициированная карбидной частицей, в мартенсите стали 14X2ГМР, полученная методом зондовой микроскопии (X16384): а — профиль поверхности; б — трехмерное изображение

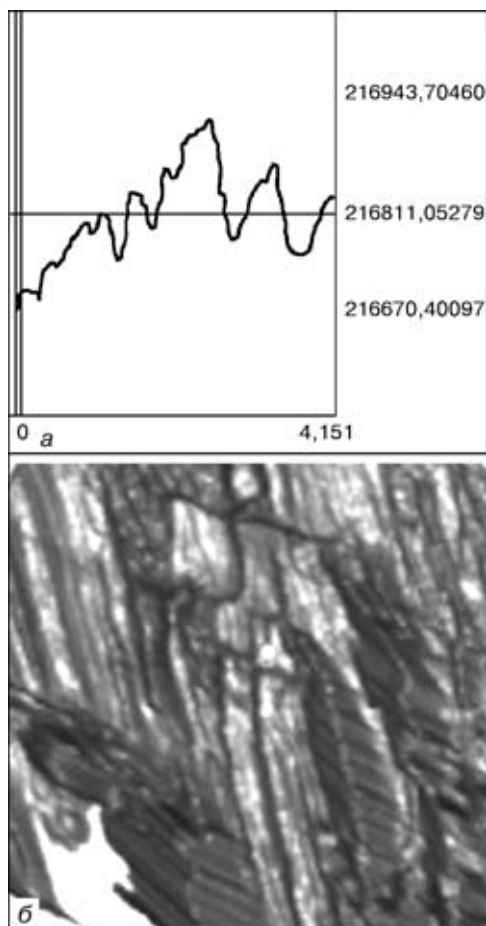


Рис. 3. Субструктурные блоки мартенсита образца-имитатора из стали 14Х2ГМР зоны перегрева (Х32768): *а* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерное изображение

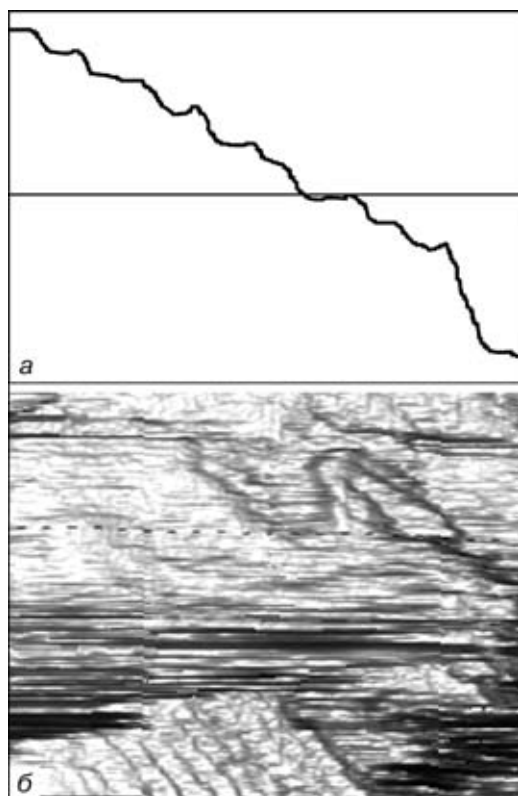


Рис. 4. Изображение пластинчатого мартенсита стали 14Х2ГМР, полученного в сканирующем туннельном режиме (Х65536): *а* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерный скан

рушению. В ИФТПС исследована физическая природа аномальности сварочной дуги при сварке конструкционных сталей в условиях низких температур окружающей среды, кинетика сварочных деформаций и напряжений, процессы замедленного разрушения [1–3, 12]. Итогом явилась разработка принципиально новых положений технологии сварки, обеспечивающей технологическую и эксплуатационную прочность сварных соединений. В ее основе — оптимальное тепловложение при сварке, которое должно обеспечить выполнение условия сближения характеристик основного металла и металла шва, а также рациональный выбор и разработка сварочных материалов.

Применительно к дуговой сварке высокопрочных низколегированных сталей одной из основных проблем считается необходимость исключения операции предварительного подогрева, в связи с чем особое значение приобретает управление поведением водорода в сварных соединениях как одним из факторов, связанных с хрупким разрушением сварных конструкций [13].

В ИФТПС при изучении роли растворенного водорода в замедленном разрушении применены методы зондовой микроскопии для микроструктурного и фрактографического анализа образцов низколегированной стали. Посредством туннельной микроскопии (мультимикроскоп СММ-2000ТА, сканер с полем 6Х6Х1 мкм) исследован излом образцов из стали 14Х2ГМР, насыщенных водородом при температуре 400 °С и испытанных на замедленное разрушение. Они показали, что микротрещины распространяются в зоне надреза по границам субструктурных блоков мартенсита (рис. 3). Поверхность субмикротрещины на изломе образца показывает расщепление по плоскостям скольжения субструктурных построек. Профиль излома позволяет измерить размеры отдельных блоков субструктуры и их разориентировку относительно друг друга (рис. 4).

Использование новых материалов для совершенствования техники обуславливает необходимость внесения изменений в практику ее проектирования и серийного производства. Отсюда вытекает требование формирования новой системы критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности конструкций для повышения их надежности через систему норм и правил проектирования, изготовления и эксплуатации, например, при строительстве железнодорожных путей в природно-климатических условиях российского Севера. Кроме сложнейших топографических и геологических условий региона (гористая местность, вечная мерзлота с буграми пучения, болотистые участки, оползни и пр.), необходим учет воздействия низких температур. Подобная ситуация наблюдается при строительстве газо- и нефтепроводов, развертывание которых в широких масштабах ожидается в первой четверти наступившего века. Между тем, на сегодня при расчетах инженерных сооружений минимум температуры принимают равным порядка –40 °С, тогда, как в реальности возможны температуры до –55 °С и ниже. Это означает, что требуется не только создание новых

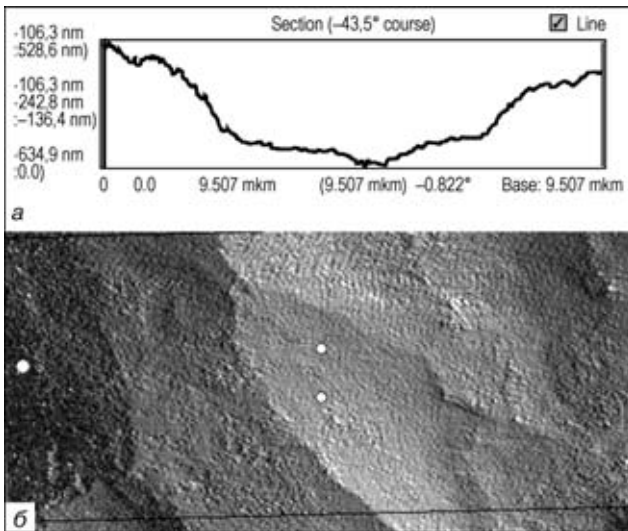


Рис. 5. Исходное состояние границы зерна хладостойкой стали экспериментального состава (размер скана 10×7 мкм): *a* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерный скан

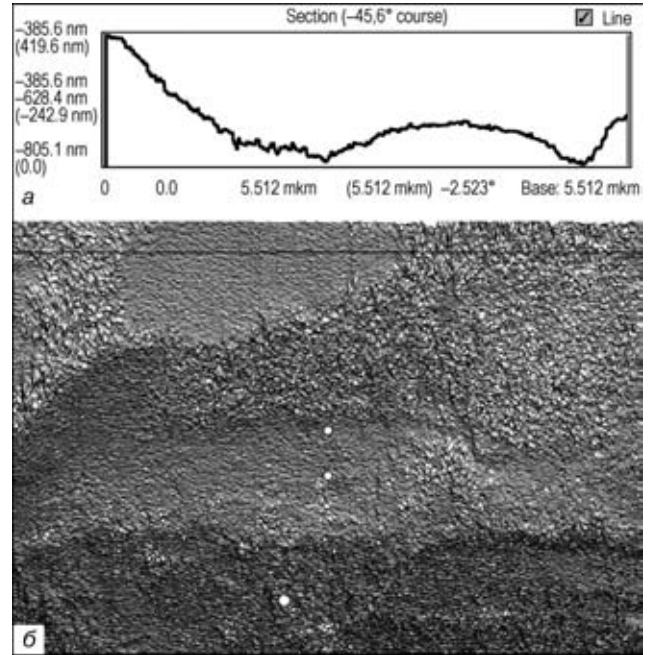


Рис. 6. Границы зерна хладостойкой стали при 5%-й пластической деформации (размер скана 5×5 мкм): *a* — профиль поверхности по сечению; *б* — трехмерный скан

материалов, но и пересмотр норм проектирования и технических условий на металлы для рельсов, мостов и пр.

Стадия проектирования — важнейший этап практической реализации фундаментальных исследований, на котором закладываются основные технико-экономические параметры изделия или конструкции. Известно, что при понижении температуры значения таких расчетных характеристик сталей, как временное сопротивление, предел текучести, модуль Юнга, повышаются; в то же время склонность к хрупкому разрушению возрастает. Использование традиционных критериев прочности и пластичности не дает положительных результатов. Эти критерии базируются на постулате о том, что предельное состояние определяется напряженным состоянием в точке; влияние остального объема материала полагается несущественным. Однако в ряде случаев это влияние может быть весьма значительным. Такое противоречие объясняется несовершенством используемых экспериментальных методов и подходов к оценке локальных свойств материалов. Рациональное конструктивное и технологическое решение, определяющее работоспособность материалов и элементов техники и конструкций при низких температурах, требует совершенствования методов расчета на прочность, разработки критериев прочности и несущей способности. Новые расчетные методы должны учитывать и нормировать работу элементов конструкций с трещинами, которые неизбежно имеются в них изначально, либо возникают в процессе эксплуатации.

Задача проектирования техники для экстремальных условий эффективно решается с использованием методов оценки деформаций и напряжений. Так, в ИФТПС на основе методов муара и голографической интерферометрии разработаны методики и созданы технические устройства для исследования поведения элементов конструкций в неоднородном поле напряжений, что позволило предложить критерий предельного состояния эле-

ментов конструкций, учитывающий неоднородность распределения напряжений и деформаций. Результаты этих исследований нашли практическое применение при доработке ответственных элементов горнотранспортной техники.

Исследование предельных состояний в материале напрямую связано с расчетным определением ресурса конструкций из существующих и новых материалов. Последние исследования в этом направлении связаны с изучением влияния состояния границ раздела, в частности, сегрегаций примесей на границах зерен, на механизмы разрушения гетерогенных поликристаллических и наноструктурных материалов. С помощью средств электронной сканирующей микроскопии нами проведены исследования по методу *in situ* эволюции поверхностной поврежденности малогабаритных образцов из хладостойкой стали экспериментального состава при деформировании. При этом использовано устройство с растягивающей нагрузкой до 4,5 кН и туннельный зонд с полем сканирования 20×20×2 мкм. Результаты сканирования зоны границы зерна до и после деформирования приведены на рис. 5, 6. На объемном изображении и профилях видно изменение поверхностного рельефа и появление микротрещин еще до возникновения макропластической деформации. Количественно поверхностная поврежденность может быть оценена только методами мультифрактального анализа [14], для чего необходимо проведение более тщательных экспериментов.

В настоящее время во всем мире наблюдается интерес к исследованиям связанных (multiphysics) задач и стохастическому моделированию. Полученные в этом направлении результаты позволяют решить задачу оценки ресурса слабых элементов (в том числе, содержащих сварные соединения) потенциально опасных объектов. Предложена модель распространения трещины в вязкопластическом гетерогенном материале, учитывающая слу-



чайный характер его свойств и базирующаяся на механизме подрастания основной трещины в результате развития перед ней пор и микротрещин.

На данном этапе развития экономики России необходимо решить проблему обновления устаревшего технического парка машин, выработавших свой расчетный ресурс потенциально опасных промышленных объектов (нефте- и газопроводы, хранилища, системы водоснабжения, теплоэнергостанции и т. д.), в связи с этим особую важность приобретает решение задач диагностики и продления их ресурса. Прогноз и предупреждение аварийных ситуаций позволит говорить об управлении риском возникновения катастрофических ситуаций на инженерных объектах.

Суммарно материаловедческие, технологические и инженерные задачи повышения ресурса технических систем различного назначения и уровня сложности, обеспечения эффективности и безопасности их функционирования в условиях северных и арктических регионов требуют разработки теоретических основ (прочности, повреждаемости, разрушения) и создания новых хладостойких материалов с высоким сопротивлением замедленному разрушению; усовершенствованных сварочных технологий; критериев оценки прочности и ресурса для техники Крайнего Севера; расчетно-экспериментальных методов оценки хладостойкости крупногабаритных металлоконструкций; современных аналитических, статистических и экспериментальных методов исследования технических систем.

1. Ларионов В. П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. — Новосибирск: Наука, 1986. — 256 с.
2. Ларионов В. П. Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 593 с.

Problems associated with operation and repair of industrial facilities and metal structures under the Russian North conditions are considered. Areas of basic and applied research conducted by Yakut scientists with a purpose to develop new materials, welding processes and study behaviour of welded structures during operation are described. Promising lines for further research are presented.

3. Слепцов О. И. Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах. — Новосибирск: Наука, 1985. — 102 с.
4. Прохоров В. А. Оценка параметров безопасности эксплуатации нефтехранилищ в условиях Севера. — М.: Недра, 1999. — 142 с.
5. Махутов Н. А., Кузьмин В. Р., Прохоров В. А. Экспертные оценки состояния резервуаров по критериям прочности // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 10. — С. 15–19.
6. Лякишев Н. П. Конструкционные и некоторые функциональные материалы. Настоящее и будущее // Сб. трудов междунар. конф. «Сварка и родственные технологии — XXI век». — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 152–165.
7. Ларионов В. П. Фундаментальные аспекты обеспечения хладостойкости, надежности и долговечности сварных конструкций в условиях холодного климата // Там же. — С. 120–129.
8. Хладноломкость металлоконструкций и деталей машин / Р. С. Григорьев, В. П. Ларионов, Г. А. Новиков, П. Г. Яковлев. — М.: Наука, 1969. — 96 с.
9. Стохастическое моделирование разрушения гетерогенной повреждаемой среды / В. В. Лепов, К. Я. Лепова, В. Т. Альмов, В. П. Ларионов // Физ. мезомеханика. — 2002. — 5, № 2. — С. 23–41.
10. Архангельская Е. А., Лепов В. В., Ларионов В. П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Там же. — 2001. — 4, № 5. — С. 81–87.
11. Повышение прочности сварных конструкций для Севера / О. И. Слепцов, В. Е. Михайлов, В. Г. Петушков и др. — Новосибирск: Наука, 1989. — 222 с.
12. Замедленное разрушение металлоконструкций при низких температурах / В. П. Ларионов, В. В. Альмов, В. Е. Михайлов, В. В. Лепов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 242 с.
13. Походня И. К. Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 31–69.
14. Лепов В. В., Ачкасова В. С., Иванова А. А. Исследование поврежденности низколегированной стали и кристаллов алмаза методами фрактального анализа // Тр. I Евраз. симп. по проблемам прочности материалов в условиях холодного климата. Якутск, 16–20 июля 2002. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2002. — Ч. 2. — С. 93–107.

Поступила в редакцию 13.03.2003



СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

У. ДИЛТАЙ, Л. ШТАЙН, К. ВЁСТЕ, Ф. РАЙХ
(ISE, RWTH, г. Аахен, Германия)

Рассмотрены некоторые достижения последних лет в области создания высокоэффективных сварочных технологий. Отмечены возможности применения усовершенствованных технологий электронно-лучевой и лазерной сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварка МИГ, спаренный электрод, последовательные дуги, переменный ток, ленточный электрод, пайка, плазменная сварка, электронно-лучевая сварка, оборудование, лазерная сварка, гибридная сварка

Начиная с 1960-х гг. сварку МИГ широко используют в промышленном производстве, непрерывно происходит ее усовершенствование. Последние достижения в основном связаны с разработкой источников питания, способов подачи проволоки и использованием новых присадочных материалов и защитных газов. Затрачены большие усилия на то, чтобы повысить скорость наплавки, а на основании этого — производительность и скорость сварки путем расширения сферы действия уже известных процессов и разработки новых.

Сварка МИГ. Современные электроника и компьютерное управление наряду с усовершенствованием систем подачи проволоки привели к возможности использования цифрового управления мощностью с получением высоких коэффициентов соотношения мощности и массы. Цифровые контроллеры позволяют реализовывать различные характеристики источника питания, обеспечивающие комплексную стратегию управления. Стратегия управления импульсно-дуговой сваркой была усовершенствована в целях достижения стабильности процесса (отсутствие коротких замыканий). При этом расширяются функциональные возможности процесса. Использование цифровых контроллеров намного упрощает связь с внешними компьютерами. Таким образом, современные источники питания обеспечивают выполнение многочисленных функций: регулировка характеристик процесса, уточнение и документирование параметров и качества сварки.

Благодаря этим устройствам можно осуществлять различные сварочные процессы — от хорошо известного способа сварки короткой дугой до таких высокопроизводительных способов сварки, как сварка вращающейся дугой и дуговая сварка со струйным переносом металла.

Сварка двумя проволоками. Сварка МИГ одной проволокой с использованием упомянутых видов дуги достигла такого уровня, который, вероятно, уже нельзя существенно повысить путем дальнейшего совершенствования источников питания, присадочных материалов или защитных газов. В ли-

тературе упоминаются сварка короткой дугой с высокой скоростью наплавки (до 2 м/мин), а также сварка вращающейся дугой со скоростью наплавки до 14 кг/ч. Дальнейшему повышению скорости наплавки среди прочих причин препятствует нестабильность вращения дуги.

Все указанное выше, а также необходимость обеспечения высоких показателей скорости наплавки при меньшей погонной энергии привели к созданию технологии сварки МИГ двумя проволоками, в которой используется комбинация двух проволочных электродов в одном общем газовом сопле. Более ранние исследования в этой области, проведенные в 1975 г., потерпели неудачу, поскольку имеющиеся в то время источники питания не могли обеспечить стабильность сварочного процесса. Благодаря новому поколению источников питания стало возможным преодолеть испытываемые трудности и внедрить в промышленность способ сварки двумя проволоками, весьма перспективный для производства. Использование сварки МИГ двумя проволоками оказывает значительное влияние на форму сварочной ванны. Расположение электродов один позади другого удлиняет сварочную ванну в направлении линии сварки. Электродная проволока в передней части ванны обеспечивает достаточный уровень проплавления, тогда как форму наплавленного валика определяет проволока, находящаяся в хвостовой части ванны. Удлиненная форма сварочной ванны обеспечивает более эффективную дегазацию, что снижает склонность к образованию пористости, особенно при сварке алюминия и сварке через подслои. При повороте электродов таким образом, чтобы они располагались один за другим, создаются благоприятные условия сварки по зазору при низких значениях тока, что, однако, влияет на скорость сварки. При повороте электродов приблизительно на 20° требуется снижение скорости сварки на 25...30 %.

Существуют две разновидности способа сварки МИГ двумя проволоками: первая — спаренными электродами, при которой предполагается использование общего мундштука; вторая — последовательными дугами; при этом используются отдельные мундштуки с электрической изоляцией для каждой из проволок (рис. 1).

Сварка МИГ спаренными электродами. Разработанная технология сварки МИГ спаренными



электродами предполагает, что используется один общий мундштук, подсоединенный к одному источнику питания или двум спаренным (рис. 1, а). При этом к обоим электродным проволокам подается одинаковое напряжение. Поскольку два равнонаправленных токоподводящих проводника притягиваются друг к другу благодаря действию магнитных сил, отделяющиеся при плавлении электродов капли попадают в одну общую сварочную ванну на расстоянии 4...7 мм друг от друга. При небольшом расстоянии между двумя электродами могут образовываться капельные перемычки, что обуславливает нестабильность процесса. При значительном расстоянии между проволоками образуются две отдельные сварочные ванны, а из-за сильного эффекта дутья дуги возникают брызги.

Основным недостатком этого варианта сварки МИГ является то, что при его использовании невозможно выбрать скорость подачи проволоки и ее диаметр индивидуально для каждого электрода. Более того, при коротком замыкании одной дуги гаснет другая, что создает нестабильность процесса.

Сварка МИГ последовательными дугами. С целью оптимизации параметров процесса и осуществления возможности отдельного управления обеими дугами используются горелки с электрически изолированными мундштуками и синхронизированные источники питания с независимым управлением (рис. 1, б). Таким образом, этот способ можно применять при сварке короткой дугой, используя проволоку различных диаметров и различную скорость ее подачи для стабильности сварочного процесса.

Сварка МИГ на переменном токе. Необходимость уменьшения массы конструкций обусловила применение более тонких листовых материалов, что затрудняет выполнение сварки по зазору. При сварке МИГ на токе обратной полярности количество тепла, подводимого к основному материалу, и глубина проплавления снижаются, при этом создаются благоприятные условия для сварки по зазору. К сожалению, при сварке МИГ на токе обратной полярности значительно ухудшается стабильность процесса. В источниках питания, используемых при сварке МИГ на переменном токе, комбинируется стандартный импульсный процесс

с регулируемыми импульсами при обратной полярности. Это позволяет достигнуть стабильности сварочного процесса с регулируемой глубиной проплавления и осуществлять сварку по зазору для соединения тонколистовых материалов в промышленных условиях.

Сварка МИГ ленточным электродом. Недавно появилась новая разновидность процесса МИГ — сварка ленточным электродом. При этом используются специальные механизмы подачи проволоки и контактные наконечники, в которых применяют узкие ленточные электроды размером приблизительно 4,0×0,5 мм. Благодаря геометрии таких электродов, имеющих бóльшую площадь поверхности, чем электродная проволока с круглым сечением с сопоставимой площадью поперечного сечения, для плавления материала требуются меньшие энергия и соответственно сварочный ток. Есть два способа использования этого эффекта: первый — увеличение скорости подачи проволоки с целью повышения скорости наплавки; второй — снижение погонной энергии сварки. В этом случае за счет прямоугольного сечения электрода основание дуги образует эллипс. Изменив его направленность, можно влиять на глубину проплавления. При расположении электрода по направлению линии сварки увеличивается глубина проплавления, что способствует выполнению угловых швов на более толстых листовых материалах; при расположении электрода поперек шва происходит неглубокое проплавление и создаются благоприятные условия для сварки по зазору.

Пайка МИГ. Принципиальная разница между сваркой МИГ и пайкой МИГ находится в области металлургии. При сварке для обеспечения сплавления между основным материалом и стальным присадочным материалом требуется определенная глубина проплавления. При пайке по возможности не должно происходить плавления основного металла. В случае пайки МИГ используется то же оборудование, что и при сварке МИГ, но применяется легкоплавкая (900...1100 °С) бронзовая проволока на основе меди. Используется сварка короткой дугой и импульсно-дуговая.

Пайка МИГ уже получила широкое распространение как способ соединения оцинкованных тонких листов. Поскольку основной металл не должен плавиться, уменьшают количество тепла, подводимого к материалу, что снижает до минимума вероятность повреждения цинкового покрытия. При этом исключается снижение коррозионной стойкости металла (рис. 2). Прочность паяных и сварных швов сопоставима. Кроме того, окончательная обработка паяного шва не требует больших усилий. Благодаря этому пайка МИГ получает все большую популярность не только при изготовлении кузовов автомобилей в автомобильной промышленности, но и во в тех сферах, где преимущества использования низкой погонной энергии, высокой скорости пайки, нали-

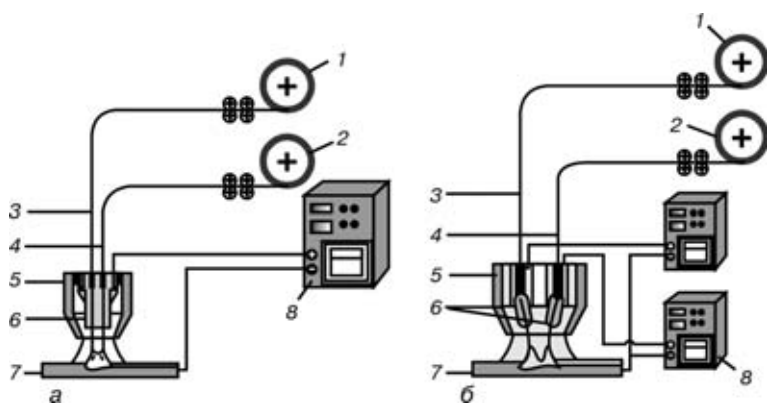


Рис. 1. Схема сварки МИГ двумя проволоками: а — сварка МИГ спаренными электродами; б — последовательными дугами; 1, 2 — механизм подачи проволоки; 3, 4 — соответственно первая и вторая проволока; 5 — газовое сопло; 6 — мундштук; 7 — обрабатываемая деталь; 8 — источник питания

чие незначительных деформаций, снижение уровня повреждений оцинкованных покрытий в совокупности компенсируют высокую стоимость применяемых бронзовых электродов.

Плазменная сварка МИГ. Этот способ сварки считался процессом с высокой производительностью плавления и был в свое время очень распространен. В настоящее время благодаря созданию новых современных горелок и источников питания плазменная сварка МИГ снова приобретает популярность. Это стандартный процесс МИГ, при

котором используется концентрическая плазменная горелка. Управление обоими процессами происходит с помощью отдельных источников питания, поскольку плазменный процесс стабилизирует процесс МИГ и, наоборот, параметры обоих процессов могут изменяться в значительном диапазоне. Таким образом, сфера применения плазменной сварки МИГ довольно широка: сварка алюминия и стали с высокой скоростью наплавки, где используются предварительный нагрев проволоки и необходимо дополнительное тепловложение от плазменного процесса; процессы со средней скоростью наплавки, отличающиеся высокой стабильностью и свойствами, благодаря которым дополнительная плазма очищает поверхность непосредственно перед наплавкой материала, что имеет определенные преимущества при сварке алюминия и плазменной пайки МИГ (низкое тепловложение и возможность контролировать форму шва).

Способы лучевой сварки. Электронно-лучевая сварка. Этот способ применяется для соединения материалов толщиной от 0,1 до 150 мм и более. Свариваемые материалы могут быть одно- или разнородными, но обязательно — электропроводными.

При высокой плотности мощности (до $1 \cdot 10^8$ Вт/см²) на толстолистовых материалах могут быть выполнены швы с отношением глубины к ширине до 50:1, что обуславливает применение этого способа сварки в точном машиностроении.

Сварку обычно выполняют в камерах с высоким или низким вакуумом, но есть возможность вывести электронный луч и в атмосферу. Сварку в высоком вакууме (рис. 3) применяют для соединения толстолистовых материалов, а также в тех случаях, когда по технологии требуется обеспечить максимальную плотность мощности при минимальном диаметре электронного луча. Как правило, сварку более тонкостенных деталей осуществляют в низком вакууме. Сварку же электронным лучом, выведенным в атмосферу, главным образом

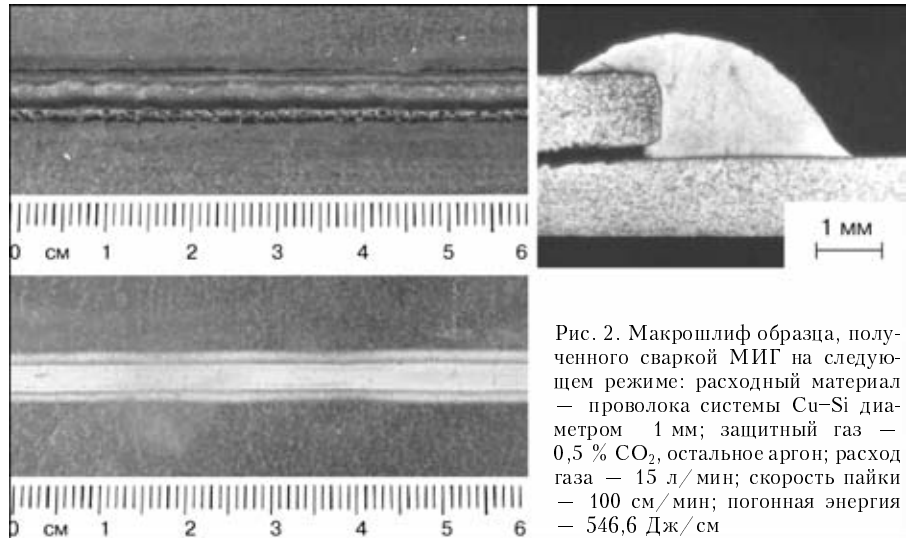


Рис. 2. Макрошлиф образца, полученного сваркой МИГ на следующем режиме: расходный материал — проволока системы Cu-Si диаметром 1 мм; защитный газ — 0,5 % CO₂, остальное аргон; расход газа — 15 л/мин; скорость пайки — 100 см/мин; погонная энергия — 546,6 Дж/см

применяют для соединения металлических плит. При наличии зазоров в этих плитах применяют сварку с присадкой.

Новые технологии электронно-лучевой сварки. Поскольку электронный луч представляет собой пучок первичных ускоренных электронов, обладающих малой массой и отрицательным электрическим зарядом, то имеется возможность при помощи электромагнитного поля, практически безынерционного, сканировать этот луч по выбранной траектории с большей частотой.

Для реализации этих возможностей уже разработано необходимое программное обеспечение, позволяющее как «размножить» зоны облучения (рис. 4), т. е. выполнять одновременно несколько (до пяти и более) сварных швов с целью увеличения производительности или уменьшения деформации свариваемого изделия, так и воздействовать на процессы кристаллизации металла сварочной ванны или структурные превращения в металле шва и околошовной зоне в пределах одной зоны облучения.

Концепции конструкций оборудования. При многократном использовании адаптированных вакуумных камер время откачки может быть уменьшено таким образом, что период неизбежного простоя при сварке не будет являться недостатком, свидетельствующим не в пользу электронно-лучевой технологии. В настоящее время имеются раз-

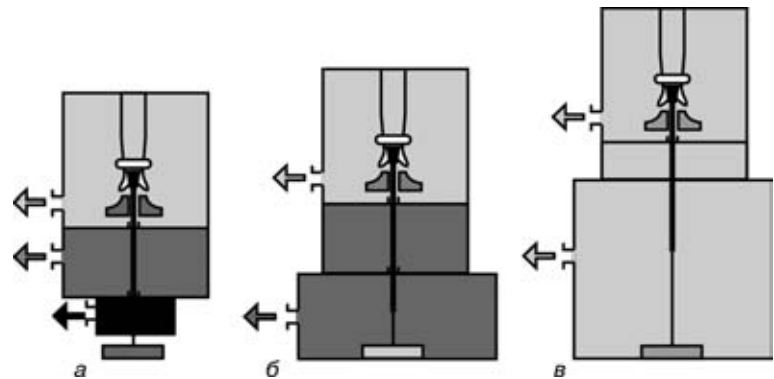


Рис. 3. Схема электронно-лучевой сварки: а — безвакуумная электронно-лучевая сварка; б, в — в условиях соответственно низкого и высокого вакуума

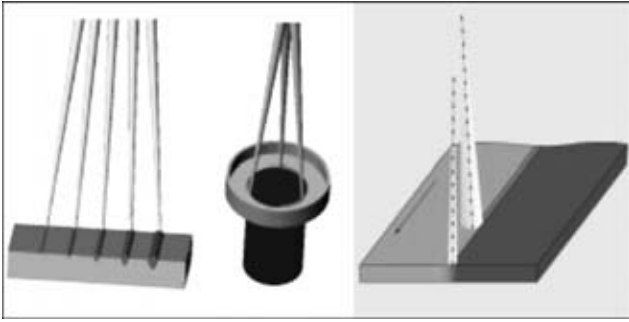


Рис. 4. Электронно-лучевая сварка с параллельными швами

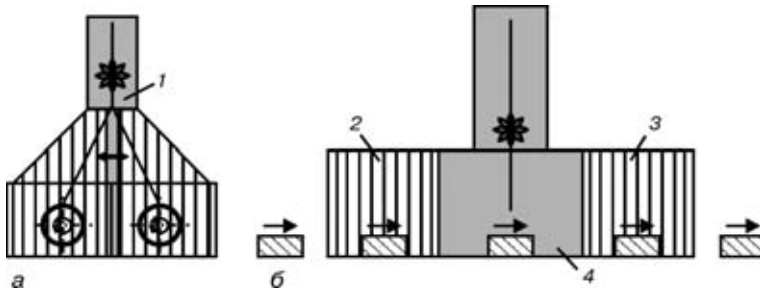


Рис. 5. Схемы вакуумных камер: *а* — вариант двухкамерной установки; *б* — шлюзовая сварочная установка; 1 — отклоняемый луч; 2, 3 — вакуумные затворы; 4 — отсек с высоким вакуумом

личные рабочие камеры для оснащения установок для электронно-лучевой сварки. Наиболее оптимальным вариантом являются универсальные рабочие камеры, где обрабатываемая деталь перемещается в трех направлениях. Однако при этом имеет место довольно продолжительный простой, в то время как все этапы работы (зажим оснастки, загрузка обрабатываемой детали, вакуумирование, сварка, вентиляция, снятие обрабатываемой детали) должны выполняться один за другим. Для сокращения рабочих циклов создано специальное оборудование — установки циклического действия, двухкамерные, конвейерные машины и шлюзовые камеры. В двухкамерных установках рабочие камеры расположены рядом. Генератор луча либо перемещается от одной к другой, либо за один проход отклоняется только в сторону одной камеры. Таким образом, сварка может выполняться в одной камере в то время, как в другой, будет происходить загрузка, разгрузка или вакуумиро-

вание. Если время сварки превышает время обработки детали или вакуумирования, используется полный объем двух камер. Недостатком указанного оборудования является то, что обе камеры должны быть оснащены отдельными перемещающими устройствами и насосными установками. На рис. 5, *а* представлена двухкамерная установка.

Шлюзовые сварочные установки являются другим вариантом оборудования (рис. 5, *б*). В них высокий вакуум постоянно поддерживается в той камере, где выполняется сварка. Перемещающиеся устройства проходят через одну или обе форкамеры. Установки могут работать в режиме загрузки и разгрузки, имеют затвор для вентиляции и деаэрации, а также вакуумный затвор. Наиболее производительным, но, к сожалению, самым «негибким» типом оборудования являются конвейерные машины. Они работают на том же принципе, что и шлюзовые сварочные установки, где обрабатываемые детали непрерывно подаются центрирующими кулачками через пневматические затворы в рабочую камеру и оттуда обратно через пневматический затвор. При этом необходимо постоянно поддерживать высокий вакуум.

Установки циклического действия являются наиболее оптимальными для сварки подобных деталей с идентичными геометриями шва и осесимметричными швами. Под камерой (обычно небольшого объема), оснащенной одной или несколькими установками загрузки деталей с коротким временем вакуумирования, установлено поворотное приспособление с вертикальной, горизонтальной и поворотной осями. Поэтому загрузка, разгрузка и сварка могут выполняться одновременно.

Безвакуумная электронно-лучевая сварка. При электронно-лучевой сварке в свободной атмосфере вакуумная камера не нужна. В этом случае время вакуумирования и ограничения, связанные с размерами детали, значения не имеют. Отсюда следует, что безвакуумная электронно-лучевая сварка обладает бесспорными преимуществами.

Указанный способ был разработан в Германии в 1960-х гг. При его реализации используются те же электронно-лучевые пушки, что и для вакуумной электронно-лучевой сварки (рис. 6).

Половинки полых элементов из алюминия, изображенных на рис. 6, были соединены способом безвакуумной электронно-лучевой сварки. Скорость сварки при этом составляла до 12 м/мин, что обуславливает высокую рентабельность указанного способа. Помимо этого, есть и другие преимущества, позволяющие рекомендовать этот способ сварки для широкого применения.

В отличие от лазерной сварки при безвакуумной электронно-лучевой сварке электронный луч способен проплавливать обрабатываемую деталь независимо от наличия углов или особенностей повер-

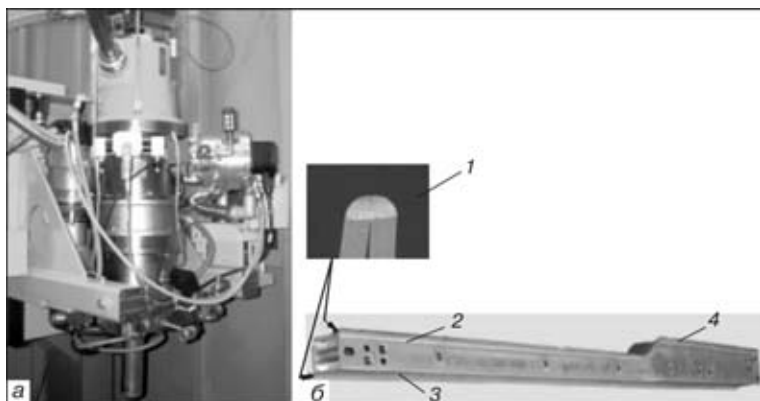


Рис. 6. Электронно-лучевая пушка для безвакуумной сварки (*а*) и пример использования ее для сварки полых элементов из алюминия (*б*): 1 — поперечное сечение и расположение сварного соединения на полых элементе из алюминия; 2, 3 — шов; 4 — изделие

хности. После выхода из электронно-лучевой пушки луч проходит через область высокого давления и входит в область атмосферного давления. В последовательно соединенных камерах происходит падение давления. С повышением внешнего давления из-за столкновения с молекулами газа электронный луч рассеивается и диаметр его увеличивается. В воздухе луч сохраняет исходную плотность энергии только на очень коротком рабочем расстоянии (приблизительно 25 мм). Поэтому в процессе сварки не следует превышать это расстояние.

Диаметр луча составляет от 1,5 до 2,5 мм в зависимости от рабочего расстояния и ускоряющего напряжения. При безвакуумной электронно-лучевой сварке наличие довольно большого, по сравнению с вакуумной электронно-лучевой и лазерной сваркой, фокусного пятна обеспечивает хорошее качество сварки по зазору, допускает относительно грубую разделку кромок и использование присадочного материала.

Как и в случае с вакуумной, применение электронно-лучевой сварки (безвакуумной электронно-лучевой сварки) позволяет использовать эффект глубокого проплавления для получения сварных швов большой высоты. При этом может быть получен коэффициент формы шва 5:1. Благодаря эффекту глубокого проплавления применение безвакуумной электронно-лучевой сварки не ограничивается только сферой обработки тонколистовых материалов, возможно также выполнение швов с глубиной проплавления до 10 мм. Использование присадочной проволоки позволяет осуществлять сварку по зазору, что характерно для безвакуумной электронно-лучевой сварки. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки показана на рис. 7.

Благодаря плотности энергии электронного луча в свободной атмосфере и высокой мощности имеющегося оборудования можно достичь скорости сварки 20 м/мин для стали и 50 м/мин для алюминиевых сплавов.

Лазерная сварка. С одной стороны, этот способ сварки характеризуется большим отношением глубины проплавления к его ширине и высокими скоростями сварки, при этом влияние на свойства материала минимально. С другой стороны, требования к подготовке шва и позиционированию достаточно высоки, а способность сварки по зазору — низкая. Последние разработки в основном касаются оптимизации возможностей сварки по зазору и снижению тре-

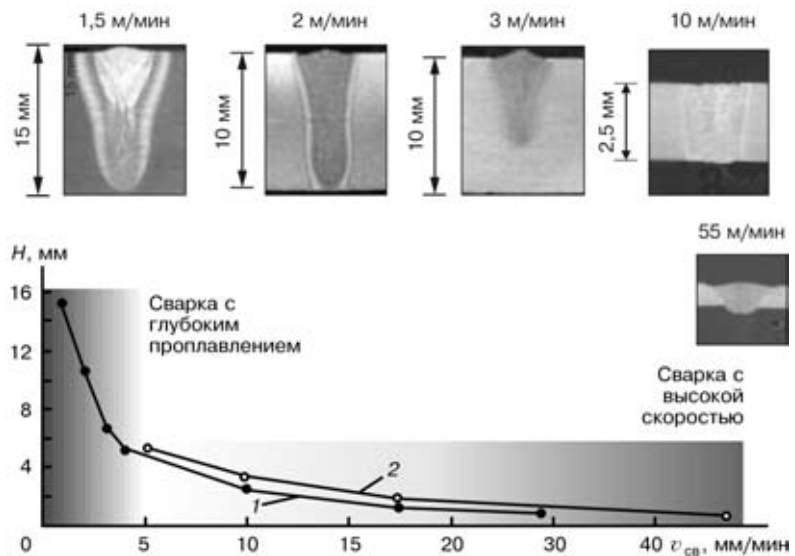


Рис. 7. Зависимость глубины проплавления H от скорости сварки $v_{св}$ при мощности луча 15 кВт стали (1) и алюминия (2)

бований к подготовке шва и позиционированию.

Лазерная сварка с присадочной проволокой. Простейшим усовершенствованием стандартного лазерного процесса является использование устройства для прецизионной подачи присадочной проволоки. Применение присадочной проволоки позволяет заполнять зазоры и тем самым оказывает положительное влияние на металлургические свойства шва. Это обуславливает также пригодность лазерной сварки с присадочной проволокой для выполнения соединений различных материалов с промежуточными слоями, а также для сварки материалов, склонных к образованию трещин.

Гибридная сварка (лазер-МИГ). Данный способ является комбинацией процесса лазерной сварки и обычного МИГ процесса в одной общей зоне сварки (рис. 8). При использовании этого способа достигается глубокое проплавление, которое обеспечивает процесс лазерной сварки, и хорошее качество сварки по зазору. Более того, лазерный пучок стабилизирует процесс сварки МИГ. Благодаря применению расплавленного присадочного материала можно достичь высокой скорости сварки при низкой погонной энергии.

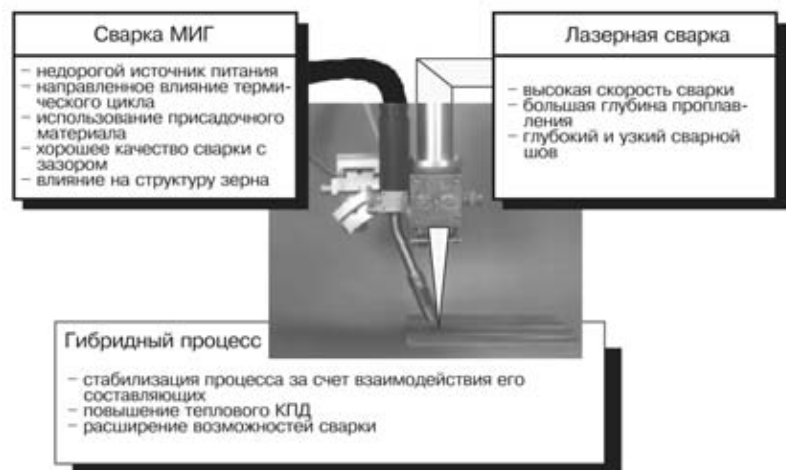


Рис. 8. Гибридная сварка (лазер-МИГ)

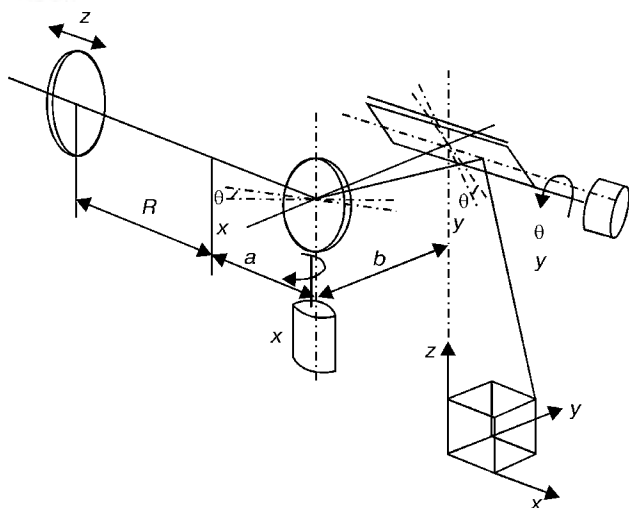


Рис. 9. Схема сварки с дистанционным наведением лазерного луча

Гибридную сварку (лазер-МИГ) применяют для соединения сталей (СО₂-лазеры) и легких сплавов (ИАГ-лазеры). При этом толщина свариваемых пластин может быть различной (от толщины листов, применяемых для кузовов автомобилей, до листов, толщина которых ограничивается мощностью используемого лазера). Согласно эмпирическому правилу, для проплавления 1 мм толщины пластины из стали требуется 1 кВт мощности СО₂-лазера. Первые примеры промышленного применения этого процесса имели место в судостроении и при производстве алюминиевых кузовов автомобилей.

Сварка с дистанционным управлением. В этом случае точечные швы, получаемые лазерной сваркой, обычно заменяют на швы небольшой протяженности. Их выполнение требует продолжительной затраты времени на перемещение от места сварки одного шва к другому (если это производится подвижной лазерной оптикой, управляемой роботом). Чтобы сократить время перемещения, необходимо уменьшить перемещаемую массу. Благодаря отклонению самого луча лазера можно идеально решить эту задачу. На рис. 9 показан принцип сварки с дистанционным наведением. На рисунке видно, что с помощью одного или двух зеркал отклоняется луч лазера, а позиционирование фокуса в вертикальном направлении осуществляется путем перемещения длиннофокусной фокусирующей линзы вдоль оси луча.

Реализация сварки с дистанционным наведением лазерного луча стала возможной только с использованием лазеров нового поколения, имеющих луч оптимального качества, например СО₂-слаб-лазер фирмы «Rofin-Sinar». По данным фирмы «Comau», этот вид сварки открывает широкие возможности благодаря длиннофокусной фокусирующей линзе (например, с длиной фокусного расстояния 1600 мм), а также за счет расположения оптики на трехкоординатном роботе. При сварке с дистанционным наведением время перемещения от места сварки одного шва к другому можно уменьшить до несколько сотых долей секунды, что сокращает время сварки почти на 25 %.

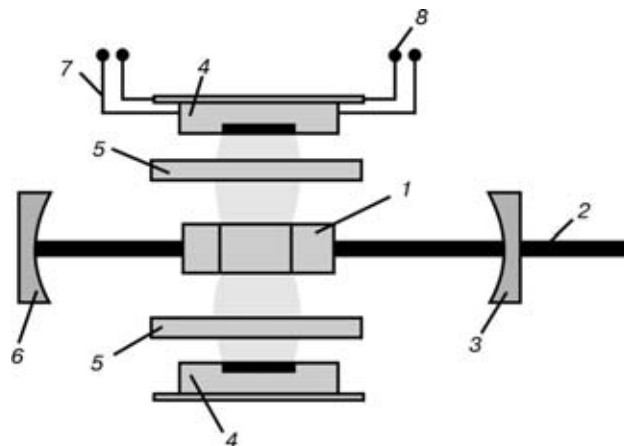


Рис. 10. Схема принципа работы твердотельного лазера с диодной накачкой: 1 — стержень ИАГ-лазера; 2 — лазерный луч; 3 — зеркало для вывода лазерного луча; 4 — диодные решетки; 5 — коллимирующая оптика; 6 — зеркало с высоким отражением; 7 — подвод охлаждения; 8 — подвод питания

ИАГ-лазер с диодной накачкой. В твердотельном лазере обычный цилиндрический стержень служит только для увеличения количества лазерно-активных ионов (в случае ИАГ-лазера — активированного ионами Nd³⁺). Возбуждение обычно происходит с помощью импульсных или дугowych ламп, которые размещают на поверхности двух эллиптических отражателей. При этом стержень лазера находится в их общей фокусной точке. Эффективность процесса составляет менее 4 %.

В настоящее время на рынке появились твердотельные лазеры с диодной накачкой. ИАГ-лазеры с диодной накачкой могут быть использованы в качестве надежного и экономичного инструмента, имеющего широкую сферу промышленного применения. Основными преимуществами этого типа лазеров является длительный срок службы диодов (более 10000 ч), более высокий КПД преобразования электроэнергии в лазерную и высокое качество излучения.

Оптическое возбуждение осуществляется диодными лазерными модулями высокой мощности, расположенным вокруг стержня ИАГ-лазера. Резонатор помещен соосно со стержнем лазера и состоит из зеркала с высоким отражением и устройства вывода с частичным отражением (рис. 10). Если активные элементы с диодной накачкой располагать последовательно по одной оси, то можно достичь выходной мощности в несколько киловатт. Лазерный луч можно выводить по одному или нескольким волоконным световодам.

Сварка волоконными лазерами. Этот тип оборудования является дальнейшим развитием лазеров. Использование активных элементов на основе волоконной оптики с диодной накачкой обеспечивает высокое качество луча, КПД преобразования электроэнергии — до 20 %, возможность разработки надежной и компактной конструкции лазера за счет исключения нуждающихся в юстировке оптических устройств. Изготовители этой аппаратуры, например, IPG Photoic, достаточно быстро увеличивают мощность волоконных лазеров, которая в настоящее время составляет около 6,5 кВт, а ближайшей целью разработчиков



является достижение 25 кВт. Поскольку волоконные лазеры работают на длине волны, сопоставимой с длиной волны лазеров на основе ИАГ, они имеют все преимущества своих прототипов, что особенно проявляется при сварке легких сплавов.

Сварка диодными лазерами. В настоящее время имеются диодные лазеры с выходной мощностью луча до 6 кВт. Для достижения такого уровня мощности несколько диодных лазеров соединяют в диодные линейки, которые, в свою очередь, компонуют в диодные блоки, обеспечивающие мощность лазерного луча до нескольких сотен ватт. Мощность лазера в несколько киловатт достигают путем комбинирования нескольких диодных блоков с оптическими системами.

В отличие от газовых или твердотельных лазеров увеличение мощности диодных лазеров достигается не удлинением резонаторов, а увеличением количества излучающих диодов и их рабочей поверхности, что приводит к снижению качества луча. Фокусное пятно мощных диодных

лазеров обычно представляет собой прямоугольник с длиной стороны приблизительно несколько миллиметров. Эти лазеры обычно используют для поверхностной термической обработки, напыления порошковых материалов и сварки в режиме теплопроводного проплавления. Преимуществами диодных лазеров является высокий КПД преобразования электроэнергии (до 30 %) и компактность конструкции, что позволяет легко встраивать их в автоматизированные промышленные комплексы. Излучение лазеров этого типа на длине волны в ближнем инфракрасном диапазоне позволяет использовать их как для сварки металлов, так и пластмасс.

В заключение следует отметить, что, наряду с существующими, новые варианты дуговых и лучевых технологических процессов существенно расширяют область их применения, благодаря повышению скорости сварки, производительности и качества сварных соединений, обеспечивая таким образом высокие экономические показатели.

Some achievements of the last years in the field of high-efficiency welding technologies are considered. Possible applications of upgraded electron beam and laser welding technologies are given.

Поступила в редакцию 13.06.2003



ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ СПОСОБОМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д. ДЕХЕЛЯН, Н. МАРКОШАН

(Национальный научно-исследовательский ин-т сварки и испытания материалов, г. Тимишоара, Румыния)

Применение формовки напылением изделий почти готовой формы позволяет изготавливать огнеупорные элементы типа сопел с высоким коэффициентом использования материала без последующей высокотехнологичной обработки. Для получения огнеупорных элементов типа сопел использовали способ плазменного напыления, заключающийся в напылении молибденового порошка на предварительно сформованную подложку. Изучено влияние параметров плазменного напыления на механические и физические свойства незакрепленных элементов. Проведена оценка остаточных напряжений с целью изучения поведения элементов и их пригодности к эксплуатации в сложных условиях.

Ключевые слова: газотермическое плазменное напыление, формовка изделий напылением, покрытия, молибден, сопла горелок, свойства напыленного слоя

Одним из примеров практического применения газотермического напыления является получение готовых изделий с толстым слоем напыленного материала на оправки требуемой формы. Таким образом изготавливают трубы и изделия из высокотемпературной керамики (оксидов алюминия, циркония и т.п.), изделия из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена), пресс-формы для получения изделий из пластмасс и стекла. Наиболее распространенным является плазменный способ газотермического напыления, преимущества которого заключаются в общем снижении трудоемкости, сокращении затрат высококвалифицированного труда и повышении коэффициента использования материала.

К числу изделий, которые могут быть изготовлены упомянутым способом и являются объектом данной разработки, относятся сопла газовых горелок и горелки для сварки под флюсом.

Технология получения готовых изделий способом плазменного напыления состоит из следующих этапов:

изготовления оправки или мастер-модели (разового или многоразового использования);

напыления материала изделия на оправку (или мастер-модель) (рис. 1);

отделения напыленного материала от оправки.

Снятие оправки можно осуществить двумя способами: путем разрушения оправки (выплавление, сжигание или химическое растворение); путем разборки сборной оправки или ее усадки при охлаждении с сохранением оправки для ее повторного использования;

механической обработки полученного изделия (при необходимости).

Условия и методика эксперимента. В качестве материала для напыления при изготовлении конических сопел газовых горелок использован порошок молибдена (99,5 % Mo) с размером частиц 45...90 мкм. Плазменные покрытия из молибдена

характеризуются высокой износо- и жаростойкостью, жаропрочностью при рабочих температурах 350...600 °С.

Оправки для напыления изготавливали из латуни. Перед напылением их подвергали обезжириванию и дробеструйной обработке. Отделение напыленного слоя происходило в результате усадки латунной оправки при быстром охлаждении за счет разницы коэффициентов термического расширения материала напыленного слоя и оправки.

Плазменное напыление проводили в условиях атмосферы при следующих параметрах:

ток, А	300... 450
напряжение на дуге, В	70... 72
плазмообразующий газ	Ar + 6 % H ₂
расход плазмообразующего газа, л/ч	800... 2200
расход порошка, см ³ /мин	10... 25

В процессе выполнения экспериментальной программы исследовали влияние параметров напыления на характеристики напыленного слоя. Анализ микроструктуры слоя выполняли методами оптической микроскопии с использованием в качестве травителя раствора K₃[Fe(CN)₆]. Пористость слоя определяли методом анализа изображения микроструктуры. Микротвердость измеряли на микротвердомере по Виккерсу при нагрузке 200 г.

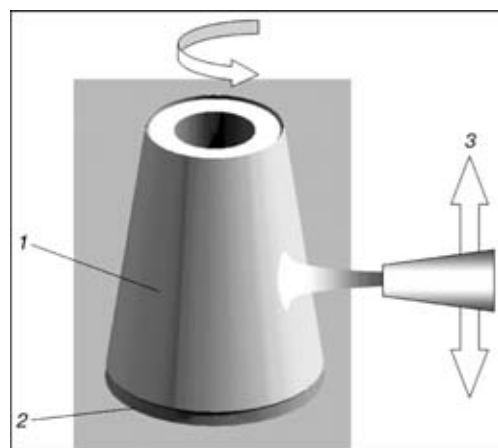


Рис. 1. Схема процесса напыления: 1 — напыляемый слой; 2 — оправка-подложка; 3 — перемещение плазменной горелки

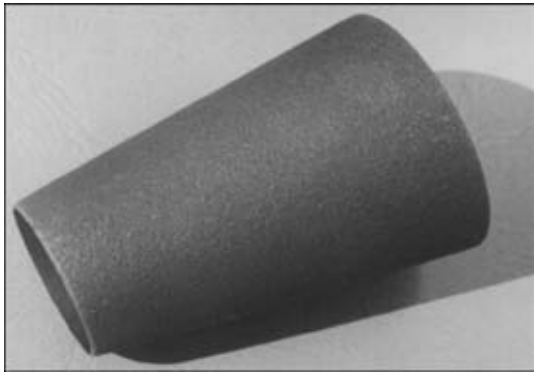


Рис. 2. Образец, изготовленный плазменным напылением молибдена ($D_{cp} = 47$ мм, толщина стенки 1 мм)

Сопrotивление материала слоя разрушению оценивали в ходе испытаний на растяжение с применением стандартных методов согласно SR EN 10002-1/05.

Остаточные напряжения определяли рентгеновским методом при использовании излучения $Co_{R\alpha}$ ($\lambda = 0,17889$ нм) и ширине кольцевой щели 1 мм как в аксиальном, так и касательном направлении конических элементов.

Исследовали образцы типа конических сопел размерами $D_{max} = 50$ мм, $D_{min} = 40$ мм, $L = 60$ мм, толщина стенки 0,5...1,5 мм (рис. 2).

Результаты эксперимента и обсуждение. Визуальная оценка образцов при 10-кратном увеличении показала, что стенки образцов плотные, трещины и крупные поры отсутствуют, толщина стенок стабильна по всей длине. Цвет изготовленных образцов отличается и зависит от тока плазмотрона. Это объясняется различной окраской оксидов молибдена при разных температурах слоя в период напыления, что связано с используемой мощностью плазменной струи. Цвет поверхности образцов может служить индикатором степени окисления молибдена [1].

Основными оксидами молибдена, придающими поверхности образцов различную окраску, являются Mo_2O_5 (темно-фиолетовая), MoO_2 (темно-коричневая) и MoO_3 (желтая).

Основное влияние на толщину напыленного слоя (при постоянном количестве проходов плазмотрона) оказывает расход порошка молибдена.

Микроструктура слоя плазменного покрытия из молибдена показана на рис. 3.

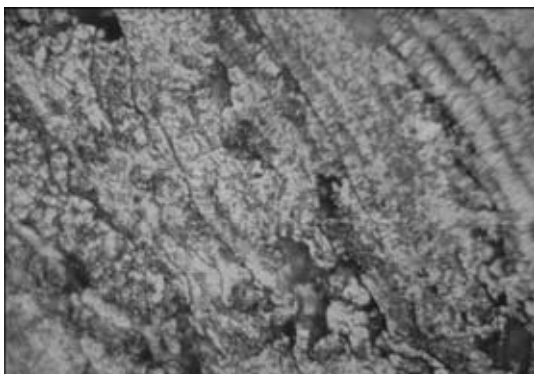


Рис. 3. Микроструктура слоя напыленного молибдена, травление раствором $K_3[Fe(CN)_6]$, $\times 500$

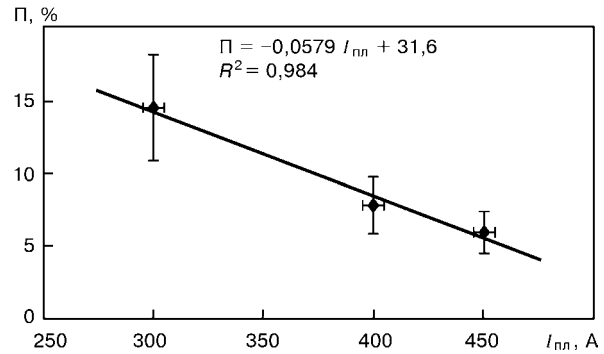


Рис. 4. Влияние тока плазменной дуги $I_{пл}$ на пористость слоев Π

Свойства микроструктуры молибденовых покрытий, полученных плазменным напылением, детально описаны в работе [2]. Однако микроструктура толстых напыленных слоев требует дополнительного исследования.

Объемные элементы формируются путем последовательного нанесения микрослоев при вращении оправки и перемещении плазмотрона. На их микроструктуре видны типичные четкие границы вокруг отдельных деформированных частиц и наличие пор между и внутри микрослоев. В напыленных слоях можно обнаружить округлые частицы полностью или частично нерасплавленного материала исходного порошка.

По виду микроструктуры образцов можно оценить влияние на нее отдельных параметров процесса плазменного напыления. Так, при увеличении тока и расхода плазмообразующего газа, влияющих на термическую и кинетическую энергию плазменной струи, плотность слоя повышается. Степень деформации частиц увеличивается, а количество непроплавленных частиц уменьшается. Повышение расхода порошка дает обратный эффект. При малом расходе получены плотные слои, состоящие из тонких микрослоев.

Пористость. Пористость слоев в поперечном сечении составляет 2,3...14,4%. На рис. 4–6 показано влияние на пористость различных параметров процесса напыления (температуры и скорости напыляемых частиц, условий их затвердевания и пр.). Во всех нанесенных слоях обнаружены сферические поры, образовавшиеся вследствие выделений из материала частиц газа, растворенного при их нагреве в плазменной струе. Пористость обнаружена также вокруг частично рас-

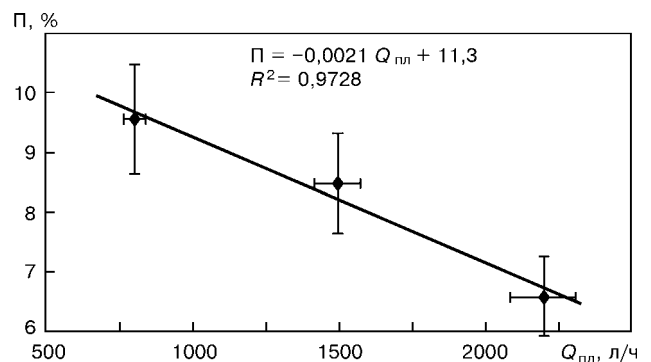


Рис. 5. Влияние расхода плазмообразующего газа $Q_{пл}$ на пористость слоев

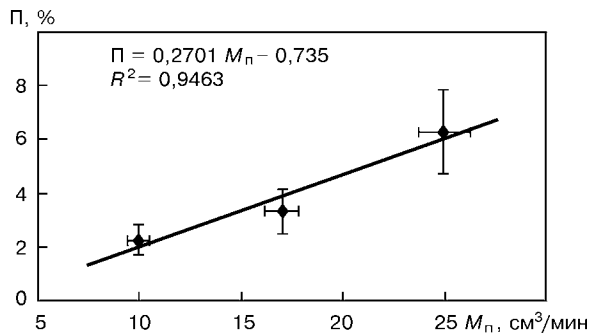


Рис. 6. Влияние расхода порошка M_n на пористость слоев

плавленных частиц, что является результатом неплотной укладки их в слое по причине малой вязкости расплава и/или низкой скорости частиц в момент удара об основу.

Наиболее низкая пористость отмечена при малых расходах напыляемого порошка. При повышении расхода порошка нагрев частиц снижается, что приводит к увеличению вязкости расплава напыляемого материала и, как следствие, к увеличению пористости.

Высокая пористость (более 10 %) [2–4] обнаруживается в слоях, напыленных при малом токе плазменной дуги. С повышением энергии дуги энергетические характеристики частиц возрастают, пористость слоев снижается.

Можно отметить сильную линейную корреляцию между пористостью и параметрами напыления (рис. 4–6). Высокие значения статистических коэффициентов интенсивности в линейной взаимосвязи R^2 между пористостью и параметрами напыления свидетельствуют о детерминированной линейной зависимости.

Микротвердость. Значения микротвердости слоев, полученных в рамках данного эксперимента,

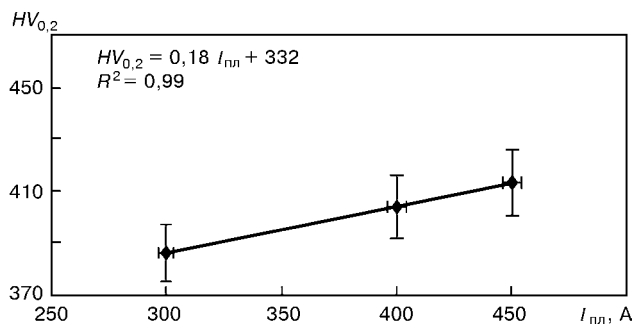


Рис. 7. Влияние тока дуги на твердость слоев

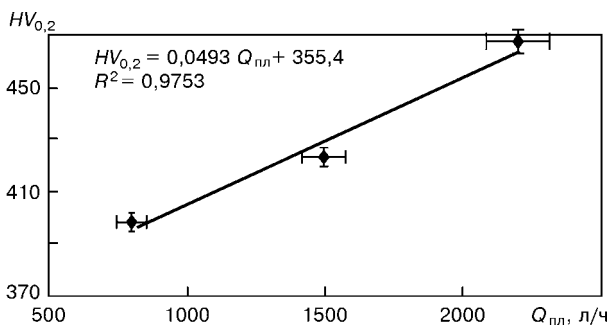


Рис. 8. Влияние расхода плазмообразующего газа на твердость слоев

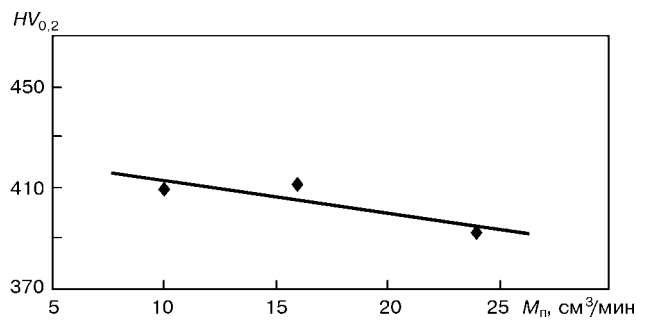


Рис. 9. Влияние расхода порошка на твердость слоев

составляли от $HV_{0,2}$ 393 до $HV_{0,2}$ 467. Эти значения соответствуют минимальному уровню твердости слоев молибдена, нанесенных плазменным способом [5]. Они зависят от степени пористости слоев; отмечается зависимость между твердостью слоев и их морфологией. Сравнение экспериментальных данных с микротвердостью образцов спеченного молибдена показывает, что микротвердость напыленных слоев выше, чем последних ($HV_{0,2}$ 260 до $HV_{0,2}$ 360 [6]).

На рис. 7–9 показано влияние параметров процесса напыления на твердость слоев объемных элементов. Изменение твердости прямо пропорционально току и расходу плазмообразующего газа (рис. 7, 8).

Максимальное значение микротвердости соответствует большому расходу рабочего газа, из чего можно сделать вывод, что кинетическая энергия частицы оказывает более сильное влияние, чем термическая.

В результате высокой скорости и более низкой температуры частиц плотный слой образуется преимущественно за счет пластической деформации частиц (при столкновении с подложкой), а не тепловложения газовой струи. Плотные слои обуславливают более высокую среднюю измеренную твердость вследствие уменьшения негативного влияния, которое оказывает пористость на склерометрические измерения.

Изменения расхода порошка не приводят к существенным изменениям твердости слоев (примерно $HV_{0,2}$ 17). Более низкие значения твердости при высоком расходе порошка могут обуславливать плотность и соответственно пониженную степень укладки слоев, которые в данном случае содержат большее количество нерасплавленных частиц.

Следует отметить сильную линейную корреляцию между твердостью и током плазменной дуги, а также расходом плазмообразующего газа, что свидетельствует о существовании между ними линейной зависимости. Обратной линейной корреляции с высокими коэффициентами R^2 между твердостью и расходом порошка не было установлено.

Прочность на растяжение. Прочность на растяжение элементов типа сопел, изготовленных при различных параметрах напыления, составляет от 68 до 106 Н/мм². Измеренные значения прочности на растяжение незакрепленных сопел, выполненных способом газотермического напыления, ниже, чем в случае литых или спеченных элементов подобной формы [6, 7].

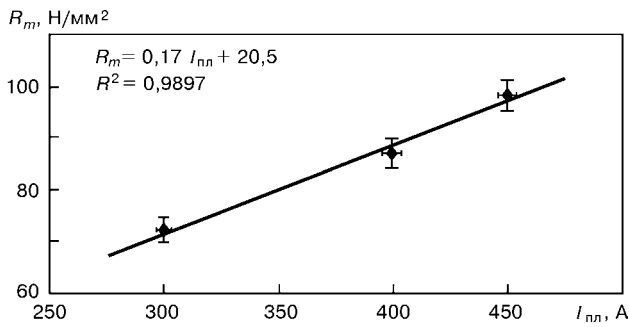


Рис. 10. Влияние тока дуги на прочность слоя на растяжение R_m

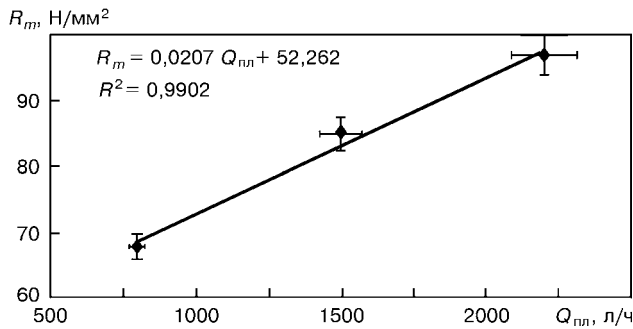


Рис. 11. Влияние расхода плазмообразующего газа на прочность слоя на растяжение

Низкое сопротивление разрушению элементов, напыленных газотермическим способом, вызвано их высокой хрупкостью (что является типичным для тугоплавких материалов) и специфической морфологией слоев, характеризующейся высокой пористостью последних и низкой когезионной связью между ними. Установлена зависимость между пористостью слоев и прочностью на растяжение элементов.

Влияние параметров процесса газотермического напыления на прочность на растяжение элементов показано на рис. 10–12.

Проанализировав рис. 10 и 11, можно сделать вывод, что сопротивление разрушению элементов типа сопел зависит от энергии плазменной струи.

В результате изменения тока плазменной струи или расхода плазмообразующего газа пропорционально изменяется измеренная прочность на растяжение элементов. Эти изменения практически линейны, высокие значения коэффициентов линейной корреляции интенсивности указывают на детерминированную зависимость между прочностью на растяжение и двумя параметрами напыления. Высокий уровень энергии плазменной струи обуславливает большую скорость плавления частиц в плазменной струе, в результате чего образуется слой со значительной плотностью и низкой пористостью. Пониженная пористость увеличивает зону контакта между деформированными частицами и повышает прочность напыленных слоев.

Исходный порошок влияет на сопротивление разрушению испытуемых образцов (рис. 12).

Увеличение количества порошка оказывает на плазменную струю охлаждающий эффект, скорость плавления частиц понижается, в результате чего слои содержат большее количество нерасплавленных или частично расплавленных частиц, а механическое

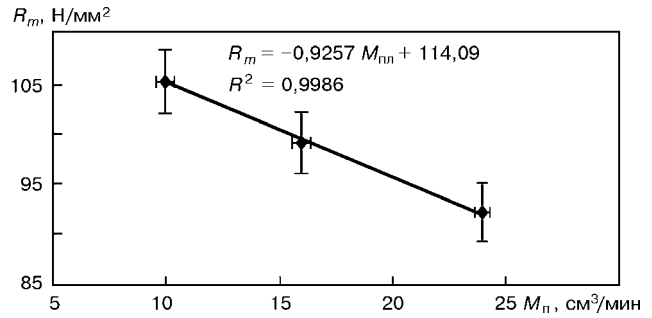


Рис. 12. Влияние расхода порошка на прочность слоя на растяжение

Значения остаточных напряжений, МПа

Напряжения	Значения	Погрешность
Аксиальные	-22	7
Касательные	54	8

сцепление напыленных частиц и когезионная связь слоев уменьшаются.

Высокие значения коэффициентов линейной корреляции показывают, что прочность слоя на растяжение можно эффективно контролировать путем разумной регулировки этих трех анализируемых параметров газотермического напыления.

Остаточные напряжения. Относительно оценки остаточных напряжений следует заметить, что на результаты незначительно влияет неизбежная погрешность измерения. Основной причиной является анизотропия, а также неоднородность напыленных слоев, что увеличивает время для определения пика. Вследствие большой дисперсии дифрагированного рентгеновского пучка затрудняется регистрация определенных данных, относящихся к анализируемому пику. Поэтому на обработку данных влияют погрешности.

Измерения проводили на образцах, изготовленных при следующих параметрах процесса газотермического напыления:

ток плазмы, А	450
напряжение на дуге, В	72
расход плазмообразующего газа, л/ч	2200
расход порошка, см³/мин	16

Основные результаты измерений остаточных напряжений приведены в таблице. Измерения проводили вдоль образующей корпуса и по касательной к ней. Остаточные напряжения в стенках сопел низкие. Их среднее значение в незакрепленных элементах ниже такового в слоях, нанесенных на подложку (вследствие разницы физических свойств слоя и подложки), и составляет от -60 до +140 МПа [8]. Такая разница — следствие многих причин, главными из которых являются физические свойства напыленного материала (тепловое расширение, теплопроводность), геометрическая конфигурация, размеры элементов, физическая совместимость материалов напыленного слоя и подложки, шероховатость слоя, а также изменение температуры образца во времени в процессе газотермического напыления и удаления подложки (опоры).



Выводы

1. Незакрепленные элементы можно изготавливать благодаря использованию новых способов плазменного напыления. Большая гибкость процесса позволяет выполнять элементы типа сопел из тугоплавких материалов, обработка которых вызывает затруднение при использовании других технологий производства.

2. Механические и морфологические свойства объемных слоев (стенок) не отличаются от свойств слоев, нанесенных на подложку.

3. Параметры процесса газотермического напыления оказывают большое влияние на микроструктуру и механические свойства элементов типа сопел.

4. Микроструктура и пористость во многом воздействуют на механические свойства, при этом между ними существует видимая зависимость.

5. Измеренные остаточные напряжения в незакрепленных элементах ниже, чем в напыленных на подложку слоях.

6. Технологии изготовления посредством формовки напылением изделий почти готовой формы

могут разрабатываться для новых типов материалов, а также для новых типов форм элементов, что является объектом новых исследовательских работ Национального научно-исследовательского института сварки и испытания материалов.

1. *Experimentation's* for near-net shape forming by plasma thermal spraying / N. Markocsan et al. // Research report of contract A8, ISIM (Timisoara, July, 2000). — Timisoara, 2000.
2. *Markocsan N.* Near-net spray forming: Ph. D. Thesis. — Timisoara, 2002.
3. *Lugscheider E.* Beschichtungstechnik, Vorlesungumdruck für die Vertieferrichtung Werkstofftechnik // RWTH. — Aachen, 1994.
4. *Pawłowski L.* The science and engineering of thermal spray coatings. — West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 1995.
5. *Yntema L. F., Percy A. L.* Molybdenum // Rare Metals Handbook. — 2000. — P. 271–289.
6. *Richard F. Cheney* production of tungsten and molybdenum powder // Production of metal powders. Chapter: Production of Tungsten, molybdenum and carbides powders. — 2000. — P. 152–156.
7. *GEM 2001* — guide to engineered materials // Advanced materials & Processes. — 2000. — **158**, № 6.
8. *Lodini A.* Analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X et des neutrons // Edite par le Commissariat à l'énergie Atomique. — Paris, 1996.

Spray forming of the near net shape parts allows manufacturing refractory elements of the type of nozzles with a high material utilisation factor, requiring no subsequent high-technology machining. The method of plasma spraying, consisting in spraying of molybdenum powder on preliminarily formed substrate, was employed to manufacture refractory elements of the type of nozzles. Effect of the plasma spraying parameters on mechanical and physical properties of free-standing elements was studied. Residual stresses were estimated to study behaviour of the elements and their fitness for operation under complicated conditions.

Поступила в редакцию 30.07.2003



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Д. ГОРБАЧ, О. Г. СОКОЛОВ, В. С. МИХАЙЛОВ, доктора техн. наук
(ЦНИИТС, г. С.-Петербург, РФ)

Рассмотрены факторы, определяющие циклическую прочность и долговечность сварных судостроительных конструкций. Даны расчетные оценки сварочных деформаций на примере корпуса танкера и катамарана. Показаны направления снижения местных и общих деформаций, стабилизации формы и точности сварных конструкций путем их низкочастотной вибрационной обработки. Приведены примеры использования принципиально новых типов сварных соединений на базе высококонцентрированных источников энергии и адаптивных методов сварки.

Ключевые слова: сварочная деформация, концентрация напряжений, циклическая прочность, лазерные технологии, адаптивные методы сварки, геометрическая и технологическая адаптация, сотовые панели

Сварные конструкции судов, морских судовых платформ, глубоководной техники при эксплуатации подвержены нестационарным знакопеременным нагрузкам. Ветроволновые воздействия, а также значительное давление, оказываемое на сварные соединения ледовыми полями в арктических районах Мирового океана, в ряде случаев являются источниками разрушения отдельных элементов конструкций, что может привести к аварийным ситуациям. Эти обстоятельства требуют очень тщательного подхода к учету всех внешних воздействий, а также внутренних факторов, в той или иной степени лимитирующих зарождение и характер развития усталостных трещин в сварных конструкциях [1–5].

Согласно такому подходу полный ресурс N сварного соединения определяется долговечностью до возникновения усталостной трещины N_i и долговечностью N_c , отвечающей периоду развития трещины до ее критического размера $a_{кр}$:

$$N = N_i \{ \alpha_\sigma, K_\epsilon, \sigma_a^i(x, y) \} + N_c \{ a_0, a_{кр}(t, \sigma_{ост}(x, y), \sigma_a^i(x, y)) \},$$

где α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений; σ_a — местные значения амплитуды действующих напряжений; i — показатель степени, определяемый экспериментально; x, y — координаты; $a_0, a_{кр}$ — соответственно начальный и критический размер трещины; K_ϵ — коэффициент концентрации деформаций, характеризующий дефект либо особенности геометрии сварного соединения; $\sigma_{ост}$ — остаточные сварочные напряжения.

Сварочные деформации и напряжения, включающие общие и местные деформации и остаточные напряжения, оказывают существенное влияние на качество, работоспособность и трудоемкость изготовления сварных конструкций, в том числе и судокорпусных.

Остаточные напряжения негативно влияют на долговечность конструкций, циклическую и коррозионно-механическую прочность, коррозионное и эрозивное состояние корпуса судна [5].

В связи с изложенным выше в ЦНИИ технологии судостроения (ЦНИИТС) велись многолетние теоретические и экспериментальные исследования процесса образования и прогнозной оценки сварочных деформаций и напряжений, на основе которых разработаны конструктивные и технологические мероприятия по предупреждению и снижению возникающих деформаций и напряжений [2, 3].

Расчетная оценка сварочных деформаций и напряжений. Расчет базируется на теории распространения тепла при сварке, основах строительной механики и теории упругости. Однако применяемые методы расчета сварочных деформаций созданы только применительно к простейшим сварным конструкциям (тавровым балкам, полотнам с ребрами жесткости, секциям корпусов, трубным элементам и др.). На основе обобщений, выполненных специалистами других предприятий, своих собственных исследований и разработок в ЦНИИТС разработан отраслевой стандарт ОСТ 5.9807–80, регламентирующий методы определения и предотвращения остаточных сварочных деформаций. Принятые в нем методы учитывают сложный характер образования сварочных деформаций, на который влияет три группы факторов, условно названных тепловыми, физическими и геометрическими. Методы достаточно точно учитывают влияние режимов и последовательности сварки, а также теплофизических характеристик свариваемых и присадочных материалов. Наиболее сложным является учет влияния геометрического фактора на величину деформаций (формы, размеров и массы элементов конструкции), а также условий закрепления элементов и конструкции в целом [4].

Для прогнозирования образования и накопления сварочных деформаций при изготовлении сложных пространственных конструкций (секций, блоков и корпусов судов в целом) в ЦНИИТС при участии специалистов ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в последние годы выполнен комплекс исследований и разработан расчетный метод, ос-

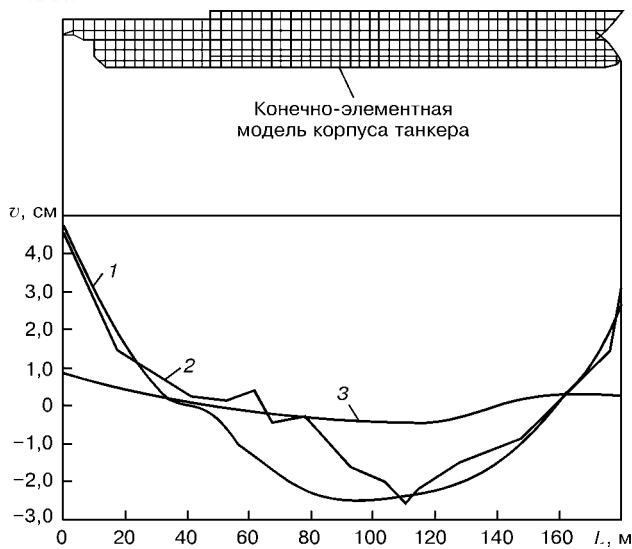
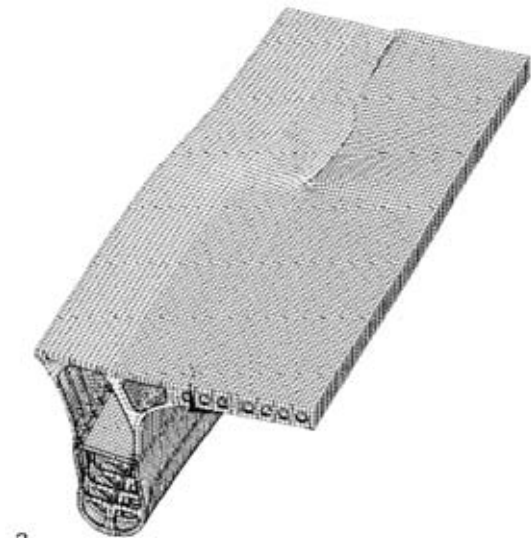


Рис. 1. Результаты расчета общего изгиба корпуса танкера: 1 — расчетный при существующей схеме формирования корпуса; 2 — фактический килевой линии корпуса; 3 — расчетный при компенсации сварочных деформаций; v — стрелка прогиба судна; L — длина балки

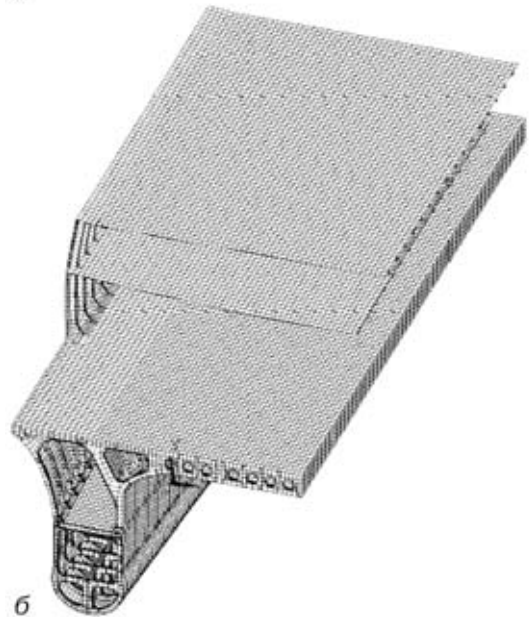
нованный на теории сварочных деформаций и методе конечных элементов (МКЭ). При расчетах по указанному методу на основании тепловых процессов при сварке определяются эквивалентные продольные и поперечные силы, воздействующие на конструкцию, а сами конструкции аппроксимируются пластинчато-стержневыми конечными элементами (КЭ) с шестью степенями свободы в узле. Деформации определяли с учетом технологической последовательности сборки и сварки, массы элементов конструкции, реакций и просядок стоепельных опор (при сборке корпуса на стапеле), жесткости конструкции и способа закрепления свариваемых элементов (прихватками или гребенками) и др. Расчеты деформаций производили с применением программы ANSYS на ЭВМ Pentium-III. Отработка методического подхода определения остаточных сварочных деформаций осуществлялась на секциях, блоках и корпусе танкера, катамарана, а также при расчете деформаций, возникающих в результате вварки деталей насыщения в сферические и цилиндрические конструкции.

При моделировании танкера количество КЭ на блоках достигло 1,5 тыс., а на корпусе в целом — около 5 тыс. Аппроксимация корпуса танкера совокупностью пластинчатых и стержневых КЭ, а также результаты расчетов общего изгиба корпуса приведены на рис. 1 [4].

Кривая изгиба на рис. 1 показывает, что при формировании корпуса, как правило, происходит подъем его носовой и кормовой частей, а средняя часть опускается ниже основной плоскости (происходит просадка). Отсюда следует, что основные силы поддержания корпуса на стапеле сосредоточены в средней его части. Легко спрогнозировать, что при спуске судна на воду из-за перераспределения сил поддержания корпуса на воде и на стапеле происходит дополнительный изгиб корпуса судна. Расчетная методика позволяет оценить возможное изменение упругой линии корпуса после спуска и, следовательно, назначить мероприятия



а



б

Рис. 2. Деформации, возникающие при установке и приварке секции главной (а) и верхней (б) палубы катамарана

по компенсации деформаций при формировании корпуса на стапеле с учетом дополнительных изменений упругой линии корпуса после спуска судна на воду.

На рис. 2 показаны деформации, возникающие при приварке главной и верхней палуб катамарана. Видно, что при выполнении сборочно-сварочных работ происходит разворот корпусов катамарана как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Установка секций и блоков с соответствующими упреждающими наклонами позволяет уменьшить отклонение формы и размеров катамарана от проектных.

Важной является задача определения местных деформаций, возникающих при вварке деталей насыщения в сферические и цилиндрические конструкции. На рис. 3 показана конечно-элементная модель сферической конструкции. Расчет сварочных деформаций с применением МКЭ позволяет получать информацию о перемещении любой точки конструкции. На рис. 4 показано распределение

перемещений точек сферической конструкции и деталей насыщения. Произведен анализ взаимного влияния деталей насыщения на перемещение относительно друг друга. Сравнение деформаций центральной детали для разных технологических этапов, а также для варианта установки и сварки платформ показано на рис. 5. Анализ данных, приведенных на рисунке, показывает, что сварка верхней детали насыщения на перемещение центральной детали оказывает существенное влияние на деформации, тогда как влияние наличия или отсутствия платформ незначительно. Выполнить подобные расчеты с применением классических методов строительной механики невозможно.

С целью сокращения трудоемкости сбора и ввода исходных данных для расчетов деформаций секций, блоков и корпуса целесообразно использовать информацию, взятую из существующих на судостроительных предприятиях систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства.

Снижение остаточных напряжений.

Для снижения остаточных напряжений, стабилизации формы и размеров конструкций в судостроении и других отраслях промышленности применяют термообработку, являющуюся весьма трудоемкой и дорогостоящей операцией. В качестве альтернативного процесса в судостроении и других отраслях промышленности применяется низкочастотная виброобработка конструкций [6, 7].

Указанный способ снижения остаточных напряжений основан на использовании энергии вынужденных колебаний, возникающих под действием периодических динамических нагружений. При колебании конструкции возникают знакопеременные напряжения. В случае совместного действия знакопеременных и остаточных напряжений в металле интенсифицируется фазоструктурная стабилизация, происходит разукрупнение структуры, протекают микропластические деформации и другие процессы, которые приводят к снижению остаточных напряжений, стабилизации формы и размеров конструкции в целом. Установлено, что степень снижения остаточных напряжений зависит от амплитуды колебаний, длительности обработки, свойств металла, степени жесткости конструкции, технологии виброобработки и других факторов [7].

Наиболее интенсивно остаточные напряжения снижаются при виброобработке конструкций в условиях резонанса, когда резко возрастает амплитуда вынужденных колебаний из-за приближения или совпадения частот собственных колебаний конструкции с частотой внешнего воздействия на нее.

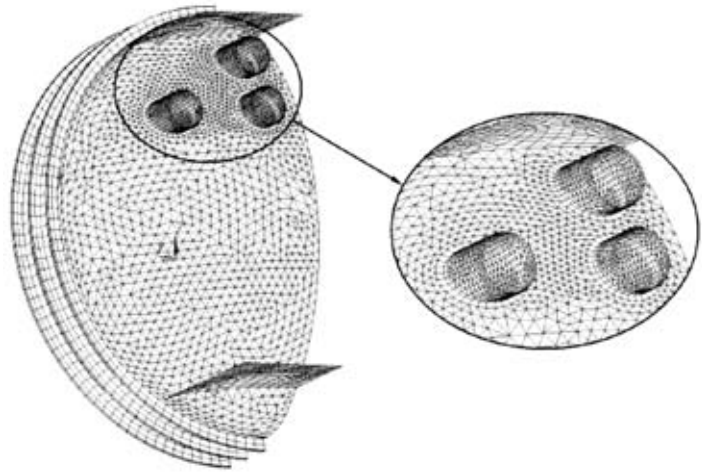


Рис. 3. Конечно-элементная модель сферической конструкции с деталями насыщения

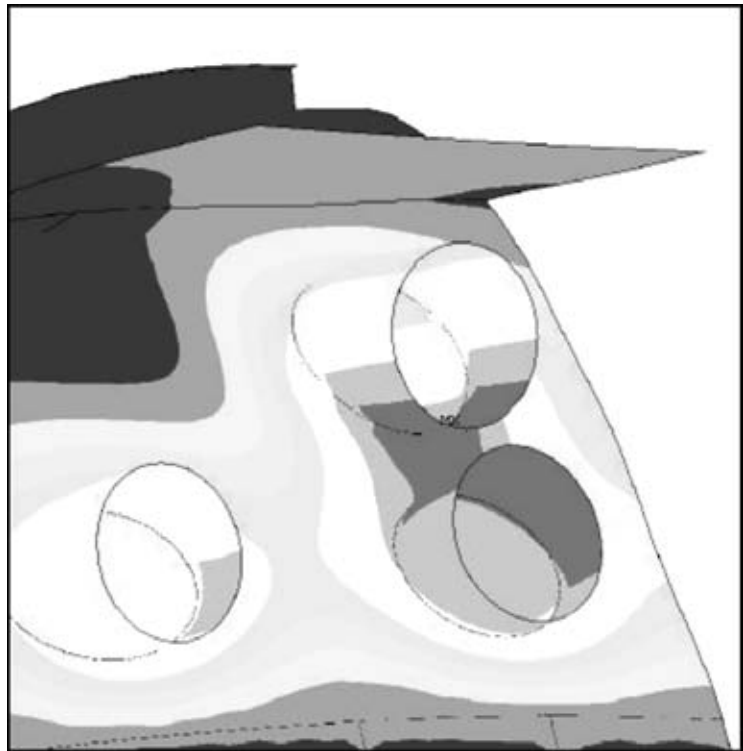


Рис. 4. Картина распределения перемещений, возникающих в результате выполнения сборочно-сварочных работ, по поверхности сферической конструкции и деталей насыщения

Для простейшей балки частота собственных колебаний определяется следующей зависимостью:

$$W = \frac{\pi^2 n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}},$$

где $n = 1+3$ — номера типа собственных колебаний; L — длина балки; EJ — изгибная жесткость; m — масса единицы длины балки.

С увеличением n упругая линия колебаний балки разбивается на количество полуволн и изменение упругой линии достаточно хорошо аппроксимируется синусоидальной функцией. В соответствии с формой изгиба балки распределяется из-

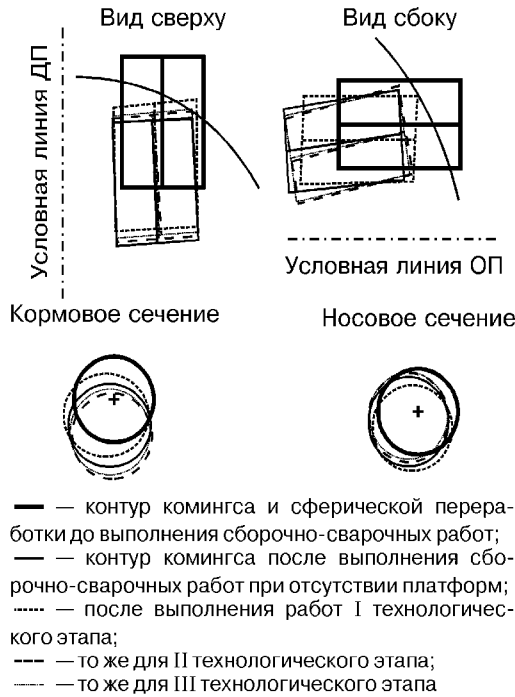


Рис. 5. Сравнение перемещений центрального комингса, возникающих на разных технологических этапах и при разных схемах сборки (ДП, ОП — соответственно диаметральной и основная плоскость)

гибающий момент и соответствующие ему напряжения, возникающие при изгибе.

При первой форме изгиба максимальные напряжения находятся в средней части балки, при второй — на одной четверти длины балки от ее концов и т. д. В связи с этим для обеспечения равномерности снижения напряжений виброобработку конструкции производят на двух-трех резонансных частотах.

Выполненный в ЦНИИТС комплекс исследований и опыт внедрения низкочастотной виброобработки на ряде судостроительных заводов показали, что этот способ позволяет снизить остаточные напряжения в стальных сварных и литосварных конструкциях до 60...65, в алюминиевых — до 70...75, в титановых — до 60...65 %.

Для снижения остаточных напряжений виброобработку конструкций производят в свободном состоянии, а для стабилизации их формы и размеров — в закрепленном (на оснастке, постелях или стапель-кондукторах). Возможно спаривание аналогичных конструкций в процессе изготовления и последующей виброобработки.

Для возбуждения механических колебаний судовых конструкций применяют переносные виброустановки, состоящие из вибровозбудителя и пульта управления (рис. 6).

С помощью низкочастотной виброобработки можно стабилизировать структуру и снизить остаточные напряжения в конструкциях из различных по химическому составу материалов, исключить ряд операций (очистку от окалины после термообработки, возможную правку конструкции и др.), кроме того, в сотни раз уменьшить затраты энергии, снизить трудоемкость и длительность про-



Рис. 6. Виброустановка и прибор для измерения напряжений

цесса, а следовательно, стоимость работ в целом, улучшить экологическую обстановку.

Поверхностное упрочнение и перераспределение напряжений в сварных соединениях. Как известно, в любом сварном соединении возникают остаточные сварочные напряжения. При этом вдоль сварного соединения, как правило, образуются остаточные сварочные напряжения растяжения. Последние уравниваются напряжениями сжатия, распределяющимися по обе стороны от сварного соединения. По мере удаления от оси сварного шва наблюдается постепенное снижение их значений. Значения продольных напряжений обычно довольно высокие и могут достигать значения предела текучести материала. Наряду с продольными в сварном соединении образуются и поперечные напряжения. При сварке деталей в свободном состоянии они уравниваются в самом соединении. В поверхностном слое и зоне термического влияния (ЗТВ) возникают напряжения растяжения, имеющие достаточно большие значения [5-7].

Таким образом, в зоне сварного соединения как в продольном, так и в поперечном направ-

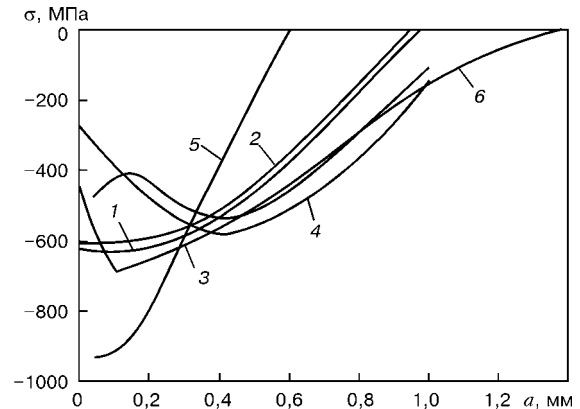


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях металла в зависимости от способа и режимов обработки: 1 — обработка пневмомолотком; 2-4 — ультразвуковым молотком мощностью соответственно 500, 800 и 1100 Вт; 5 — дробеметная ($t = 15$ с); 6 — накатка; a — глубина упрочнения слоя

лениях действуют значительные остаточные напряжения растяжения. Для уменьшения их отрицательного воздействия на конструкцию во многих отраслях промышленности применяют различные способы снижения и перераспределения остаточных напряжений, т. е. замены в поверхностных слоях сварных соединений напряжений растяжения на напряжения сжатия. К ним относится обработка взрывом, обработка пневмомолотком, обкатка роликом, наклеп дробью, ультразвуковым пучковым молотком и пр. Выбор способа обработки для снижения или перераспределения напряжений зависит от условий производства, вида продукции, наличия оборудования и пр.

В судостроении в основном применяется дробеметная обработка, пневмомолотком или ультразвуковым пучковым молотком и пневмощетками. В ЦНИИТС выполнен комплекс исследований с целью определения влияния способа и технологии обработки на степень снижения или перераспределения напряжений. На рис. 7 приведены примеры распределения остаточных напряжений сжатия по глубине обрабатываемых стальных листов в зависимости от способа и длительности обработки, размеров используемой для этого дробы и давления воздуха в дробеметном агрегате, мощности пневматического молотка и режимов специальной установки для поверхностного упрочнения сварного соединения с использованием ударного воздействия игловых ударников на ультразвуковой частоте (рис. 8).

В процессе поверхностного упрочнения исследовано изменение ширины зоны упрочнения стыкового и углового соединений, степени поверхностного упрочнения, конструктивных элементов концентраторов напряжений (стыковое и тавровое сварные соединения, приварка элементов насыщения). С целью определения оптимальной зоны обработки проведены испытания стыковых образцов шириной полосы упрочнения до 70 мм. На рис. 9 приведены результаты усталостных испытаний, на основании которых следует, что поверхностное упрочнение сварных швов позволяет повысить циклическую долговечность конструкции в 2...3 раза. С увеличением ширины полосы упрочнения коррозионно-усталостная прочность стыковых соединений возрастает до определенного значения. Дальнейшее увеличение ширины зоны упрочнения на повышении коррозионно-усталостной прочности не сказывается. В связи с этим ширина зоны упрочнения должна перекрывать ЗТВ после сварки и составлять около 60 мм на одну сторону от сварного соединения, что вполне достаточно для достижения необходимого эффекта. Аналогичные результаты получены при испытании конструкций на коррозионную и коррозионно-механическую стойкость.

ЦНИИТС с участием других предприятий разработал и выпускает оборудование для поверхностного упрочнения, в том числе пучковые пневматические и ультразвуковые молотки, дробеметные установки и др.

Проблемы конструктивно-технологического совершенствования сварных судостроительных конструкций. Продление ресурса и надежности

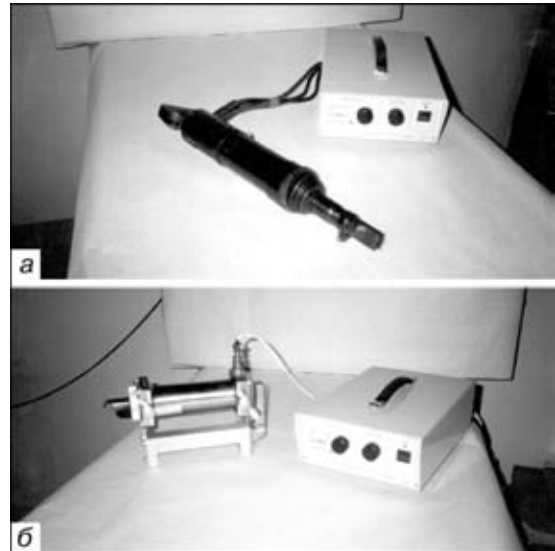


Рис. 8. Установка для упрочняющей обработки сварных соединений на ультразвуковой частоте: а — ультразвуковой молоток; б — ударное устройство для обработки поверхности деталей трением

корпусов судов и морских сооружений возможно не только путем релаксации местных остаточных напряжений. Не менее эффективным является использование с этой целью способов сварки на базе высококонцентрированных источников энергии. Так, применение лазерных, электронно-лучевых и тонкоплазменных технологий при операциях разделки, сварки и обработки металла обеспечивает резкое снижение уровня реактивных сварочных напряжений в конструкциях, а также практически исключает возникновение остаточных напряжений в результате операций подгонки и правки.

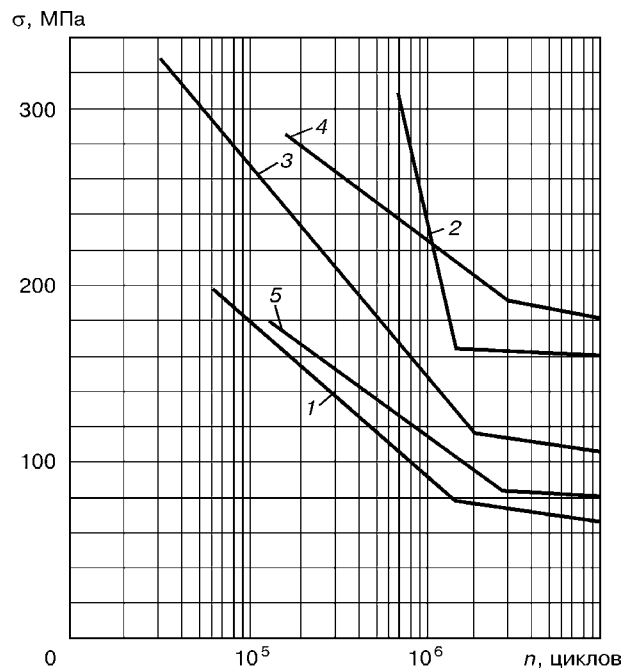


Рис. 9. Кривые усталости стали, подвергнутой различным способам поверхностной обработки: 1 — без обработки; 2-4 — дробеструйная обработка ($P = 0,50$ МПа, $t = 60$ с; 3 — $P = 0,55$ МПа, $t = 5$ с; 4 — $P = 0,55$ МПа, $t = 15$ с); 5 — индукционный нагрев

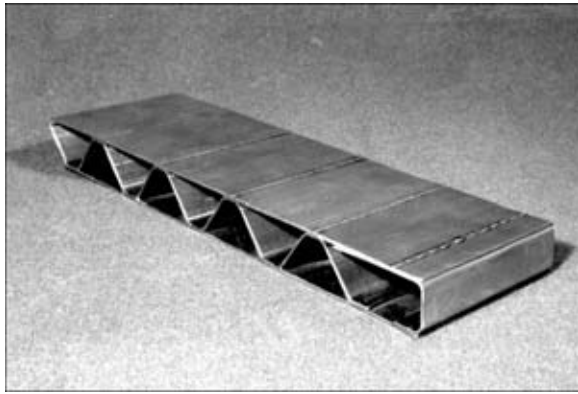


Рис. 10. Пример конструктивного исполнения сотовой панели

В ЦНИИТС совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом разработаны конструктивные решения, технология изготовления, а также проведены испытания сотовой панели (рис. 10) на базе компьютеризированной лазерной технологии [8].

Исследования ЦНИИТС и ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова показали, что применение указанных панелей не только обеспечивает эксплуатационный ресурс кораблей и судов, но и существенно снижает массу конструкций, трудоемкость и сроки их строительства (рис. 11).

В ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ЦНИИТС в 2001 г. выполнены исследования средств и методов наблюдения за формой стыка при сварке деталей судокорпусных конструкций.

На базе анализа и оценки конструкций систем технического «зрения» проведен выбор способа сбора и обработки исходной информации для управления сварочным инструментом. С целью построения системы технического «зрения» для сварочного автомата был выбран метод «светового сечения» с последующей обработкой с помощью триангуляционной процедуры. Выполнена разработка модуля оптического видеосенсора для сварочных автоматов, оснащенных системами геометрической и технологической адаптации.

Лазерный щелевой излучатель и цифровая видеокамера имеют небольшие габариты, и тем самым обеспечивается их возможность размещения вблизи сварочной головки. Блок видеосенсора жестко свя-

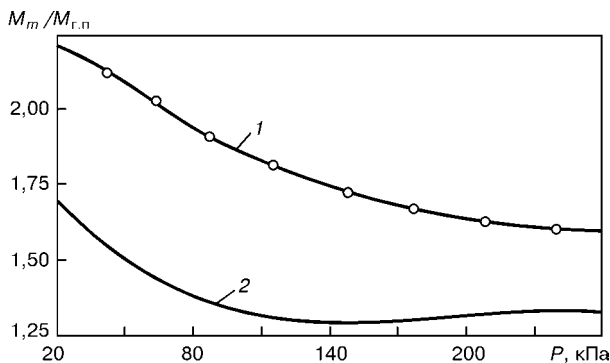


Рис. 11. Отношение массы перекрытия M_m , спроектированного на основе традиционной технологии, к массе перекрытия $M_{r.n}$, созданного с использованием сотовых (гофрированных) панелей без заполнителя, при различных уровнях расчетной нагрузки P на перекрытие: 1 — сталь Д40; 2 — РСД32

зан с транспортным модулем автомата. Это позволяет иметь фиксированные координаты для формируемой с помощью модуля оптического видеосенсора геометрической модели сварного соединения. Относительно этих же координат задаются векторы скоростей и значения корректирующих перемещений исполнительных механизмов. Скорость обработки информации в несколько раз превосходит наибольшие значения скорости сварки (перемещения транспортного модуля). Это исключает возникновение каких-либо проблем, связанных с использованием модуля видеосенсора даже в условиях высокоскоростных способов дуговой сварки. Такая система полностью решает все задачи геометрической и технологической адаптации.

Результаты исследований показали, что она весьма высокая. При условии использования современных аппаратных и технических средств для приводов исполнительных механизмов это позволяет параллельно с решением проблемы гарантированного уровня качества сварки решить проблему ресурсосбережения. Расчеты показали, что только благодаря снижению размеров выпуклости сварного шва экономится от 12 до 20 % сварочных материалов и электроэнергии. Рассмотренный процесс сварки выполняется в режиме «безлюдной технологии». С помощью автоматов с адаптивными системами управления эффективно решаются проблемы облегчения условий труда сварщиков. В настоящее время выполняется рабочее проектирование автомата, предназначенного для сварки по способу «поперечная горка». Особенность этого варианта технологии состоит в том, что путем сканирования по схеме, приведенной на рис. 12, за один проход обеспечивается формирование шва на полное сечение разделки шва.

Данная технология используется в судостроении России и имеет следующие преимущества: возможность выполнения сварки во всех пространственных положениях, в том числе неповоротных

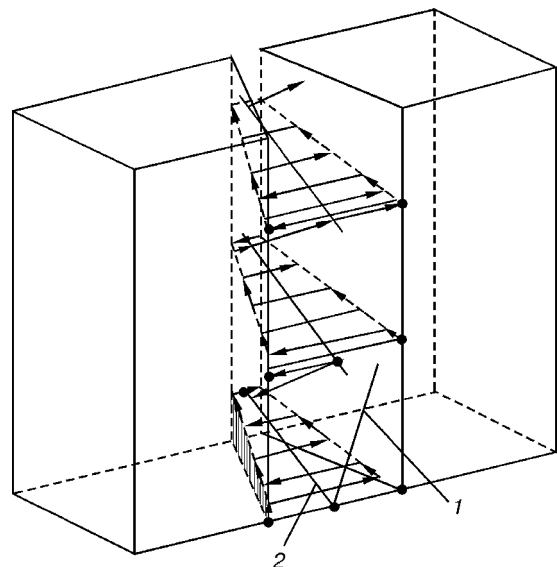


Рис. 12. Схема сканирования сварочным инструментом при сварке по способу «поперечная горка»: 1 — исходное положение инструмента до начала сварки; 2 — биссектриса угла разделки кромок



стыков при радиусе кривизны более 2 м; возникновение меньших по сравнению с многопроходной сваркой угловых деформаций; возможность выполнения сварки широкого диапазона марок сталей и сплавов, включая сплавы на основе титана; расширенный по сравнению с другими технологиями диапазон допустимых размеров зазора (допуск составляет ± 4 мм). Все перечисленные достоинства создаваемого автомата позволяют использовать его в условиях, при которых для механизации или автоматизации сварки требуется применение манипуляторов или вращателей.

1. *Расчетное* определение долговечности сварных соединений с учетом влияния технологических регистров / И. В. Горынин, Н. В. Ильин, В. П. Леонов, О. Г. Соколов // Судостроит. пр-сть. Сер. Материаловедение. Сварка. — 1990. — Вып. 10. — С. 3–14.
2. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1984. — 283 с.
3. *ОСТ 5.9807–80.* Корпуса металлических судов. Методы определения и предотвращения сварочных деформаций. — Введ. 1980.

4. *Алферов В. И., Михайлов В. С.* Математическое моделирование процесса накопления сварочных деформаций при изготовлении конструкций танкера с применением метода конечных элементов // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 1996. — Вып. 3 (287). — С. 36–43.
5. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. — С.-Петербург: Политехника, 1993. — 390 с.
6. *Низкочастотная* виброобработка конструкций и поверхностное упрочнение сварных соединений — эффективные процессы снижения и перераспределения остаточных напряжений / В. С. Михайлов, В. Д. Горбач, В. П. Стеганцев и др. // Вест. технологии судостроения. — 1999. — № 5. — С. 38–43.
7. *Перспективы* применения новых архитектурно-технических решений корпусов судов, изготавливаемых с использованием высококонцентрированных источников энергии / О. Г. Соколов, Г. З. Марголин, В. Н. Левшаков, А. А. Васильев // Материалы междунар. конф. «Сварка и родственные технологии», С.-Петербург, 2001 г. — Т. 1. — С.-Петербург: СПб. ГРУ, 2002. — С. 21–25.
8. *Адаптивное* управление технологическим процессом сварки — путь обеспечения высокого качества и надежности сварных конструкций ответственного назначения / В. Д. Горбач, И. В. Суздалев, Р. Ф. Паникаровский, Ф. Н. Нислевский // Там же. — С. 12–26.

Factors are considered, which determine the cyclic strength and fatigue life of shipbuilding welded structures. Design evaluations of welding deformations are given for the case of the hull of a tanker and catamaran ship. Methods to lower the local and total deformations, stabilization of the shape and accuracy of welded structures through their low-frequency vibration treatment are outlined. Examples are given of using fundamentally new types of welded joints, based on high-energy density sources and adaptive welding processes.

Поступила в редакцию 28.03.2003



НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны новые разработки технологии и оборудования для контактной сварки труб, позволяющие расширить технологические особенности применения данного способа сварки при строительстве различных видов трубопроводов.

Ключевые слова: контактная сварка, трубопроводы, качество, производительность, сварочные машины, технология сварки

В мировой практике наряду с совершенствованием различных способов электродуговой сварки неповоротных стыков трубопроводов с использованием традиционной схемы организации работ продолжают интенсивные поиски технологий, обеспечивающих однопозиционную сварку как наиболее перспективную с точки зрения организации строительного потока в монтажных условиях. Британский институт сварки совместно с итальянской фирмой «Сайпем» разработал технологию и оборудование для однопозиционной сварки в низком вакууме толстостенных труб электронным лучом [1]. Наряду с этими работами не снижается интерес к поискам различных технологий сварки труб давлением. Опубликованы результаты многолетних разработок сварки сопротивлением труб диаметром до 320 мм с использованием униполярного генератора [2]. В результате этих исследований, выполненных в Техасском университете совместно с фирмой «General Electric» (США), показана возможность получения высококачественных соединений труб из различных сталей и сплавов. Норвежской фирмой «Stolt» [3] разработана промышленная установка для радиальной сварки трением (с использованием деформируемой муфты) высокопрочных бесшовных труб. Продолжаются работы по совершенствованию способа сварки труб малых диаметров с использованием дуги, вращающейся в магнитном поле [4].

К числу перспективных способов соединения труб в новых проектах можно отнести способ контактной сварки, позволяющий реализовать однопозиционную сварку труб в монтажных условиях. За последние десятилетия в странах СНГ накоплен большой опыт по использованию контактной стыковой сварки (КСС) при строительстве трубопроводов различного назначения. Он свидетельствует прежде всего о высокой стабильности качества сварных соединений, достигнутой при работе в тяжелых климатических условиях. При контактной сварке обеспечивается высокая выработка на каждого члена бригады, снижаются требования к квалификации операторов и расходы на сварочные материалы.

Имеющийся опыт по использованию КСС трубопроводов, а также анализ запросов строительных организаций, в том числе зарубежных фирм, позволяет определить следующие основные направления совершенствования технологии и оборудования КСС с целью дальнейшего повышения их эффективности и конкурентоспособности:

- совершенствование технологии контактной сварки с целью снижения мощности источников питания, потерь металла при оплавлении и осадке;
- разработка технологий контактной сварки и труб повышенной прочности (типа X80...X100), обеспечивающей требуемые механические свойства;
- разработка систем автоматизированного неразрушающего и операционного контроля соединений труб, выполненных КСС;
- разработка нового поколения оборудования, отличающегося высокой маневренностью и меньшим энергопотреблением;
- разработка вспомогательного оборудования (гратосниматели), обеспечивающего более высокую точность обработки грата с учетом требований современных методов диагностики.

В последние годы в соответствии с межгосударственной программой выполнены разработки, направленные на решение перечисленных задач.

Совершенствование технологии контактной сварки труб. Для получения устойчивого непрерывного оплавления, положенного в основу применяемых технологий КСС труб, необходимо, чтобы установленная мощность источника питания в 3 раза превышала мощность, потребляемую при сварке [5]. При уменьшении этого соотношения повышается вероятность замыкания между оплавленными деталями, нарушается устойчивость оплавления, что ведет к нестабильному нагреву. Применение различных регуляторов скорости подачи при оплавлении [5] позволяет уменьшить это соотношение до 2,5. Повышение устойчивости оплавления при прочих равных условиях достигается также при снижении сопротивления короткого замыкания сварочных машин. В результате проведенных исследований показана возможность существенного снижения установленной мощности источников питания при разработке новых быстродействующих приводов контактных стыковых машин и снижения на 20...30 % сопротивления короткого замыкания благодаря совершенствованию конструкции сварочного контура. Дополнительным резервом снижения установленной мощ-



Таблица 1. Основные параметры процесса при контактной сварке труб непрерывным и пульсирующим оплавлением

Материал труб	Диаметр и толщина труб, мм	Время сварки, с		Максимальная потребляемая мощность машин, кВт·А		Припуск на оплавление и осадку, мм	
		ПО	НО	ПО	НО	ПО	НО
Сталь 20	219; 10	30	120	200	250	18	30
Сталь 20	219; 25	100	210	200	250	20	45
09Г2С	530; 10	60	150	280	500	20	30
09Г2С	630; 14	70	160	350	500	24	40
X65	920; 12	80	150	400	600	25	36
X65	920; 25	120	200	400	800	28	48
X65	1020; 14	90	160	500	800	20	38
X65, X70	1220; 16	110	180	550	800	23	45
X70	1420; 19,5	120	200	800	1100	25	50
X80	1420; 18,7	120	200	800	1200	25	45

ности источников питания является также использование различных накопителей энергии, обеспечивающих возможность кратковременного увеличения потребляемой энергии.

В результате исследований, проведенных в последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона, были разработаны способы значительной интенсификации нагрева свариваемых деталей в процессе оплавления [6]. Сущность этих способов в том, что сопротивление в контакте между свариваемыми деталями непрерывно поддерживается на уровне соответствующей предельной полезной мощности, которую может отдать источник энергоснабжения. Это достигается за счет использования автоматических быстродействующих систем управления, воздействующих на привод оплавления сварочной машины и напряжение питающей электросети. Создание таких систем стало возможным благодаря использованию современных компонентов гидропривода и электронного управления. Характерной особенностью нового процесса оплавления, получившего название пульсирующего (ПО), является более интенсивный нагрев деталей, чем при непрерывном оплавлении (НО). При одинаковой мощности длительность сварки и припуски на оплавление сокращаются в 2,0... 2,5 раза. В зависимости от установленной мощности нагрев металла при ПО можно получить в большем интервале значений установленной мощности, чем при НО, в том числе при более низких удельных мощностях. В зависимости от установленных значений мощности источника можно варьировать длительностью нагрева ($t_{св}$) и распределением температуры в металле ЗТВ, что открывает новые возможности, особенно при сварке толстостенных труб и труб из высокопрочных сталей. В частности, отличительной особенностью ПО является возможность получения высококонцентрированного нагрева, при котором до высокой температуры нагреваются приконтактные слои металла, а общая зона нагрева относительно узкая (рис. 1). Благодаря этому качественную сварку можно получить при меньшей общей зоне нагрева и величине осадки, так как вся деформация концентрируется в приконтактном слое. Указанные преимущества особенно ощутимы при сварке высокопрочных сталей типа

X80... X100, весьма чувствительных к нагреву и подверженных разупрочнению.

С использованием ПО разработана технология сварки труб с различной толщиной стенки. Основные показатели режимов сварки труб ПО приведены в табл. 1. Для труб диаметром 114... 325 мм данные получены при сварке на модернизированной установке К 584. Для труб большого диаметра данные получены при сварке сегментов большого сечения (до 5000 мм²), вырезанных из труб. Эта методика апробирована при моделировании режимов сварки НО труб диаметром 1420 мм. Приведенные в таблице данные относятся к трубам с предельной для указанного диаметра толщиной стенки. Для сравнения там приведены аналогичные показатели, полученные при сварке НО. Применение ПО позволяет уменьшить длительность сварки в 1,5... 2 раза для труб с толщиной менее 12 мм и почти в 2... 2,5 раза для труб с толщиной стенки 20... 25 мм. Установленная мощность источника питания принята такой же, как при сварке НО.

При сварке ПО формирование качественных соединений обеспечивается при меньшем значении осадки, соответственно уменьшается усиление сварных швов, которые имеют пологую форму (рис. 2). Поэтому значительно снижается трудоемкость механической обработки сварных стыков после свар-

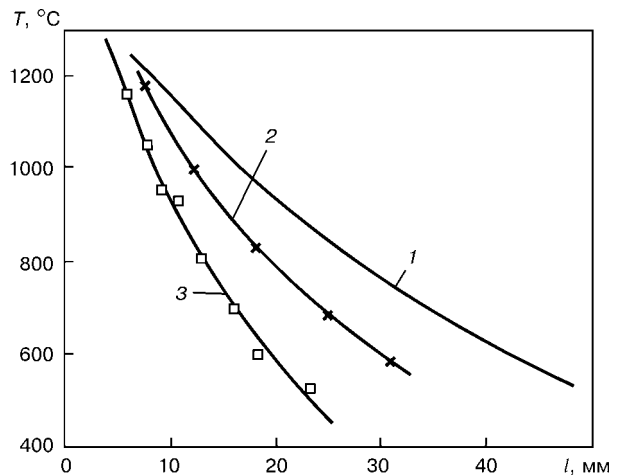


Рис. 1. Распределение температуры в металле ЗТВ при сварке непрерывным (1) и пульсирующим оплавлением (2, 3): 1 – $t_{св} = 180$; 2 – 120; 3 – 30 с



Таблица 2. Технические показатели оборудования для ПМДС сварки труб

Модификация машины	Диаметр свариваемых труб, мм	Толщина стенки, мм	Производительность, стык/ч	Усилие осадки, кН	Потребляемая мощность, кВт	Масса, кг
МД 101	10...42	1...4	80	40	30	230
МД 102	25...60	2...6	120	60	45	440
МД 103	57...114	2...8	70	160	60	950
К 872	70...219	2,5...16	30	300	100	2000

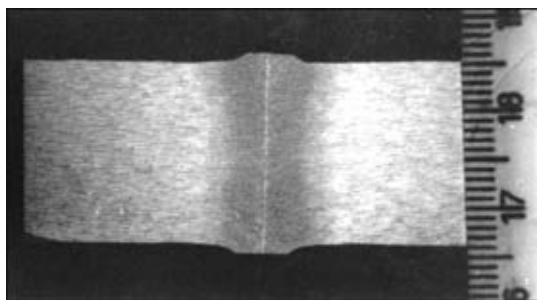


Рис. 2. Макрошлиф соединения труб из стали X80

ки и легче получить требуемую геометрическую форму сварных швов при чистовом удалении грата. В данном случае представляется возможность при срезке грата применить резцовую систему с радиальным перемещением резцов вместо протяжки, используемой в настоящее время.

Сварка давлением труб с нагревом дугой, вращающейся в магнитном поле (ПМДС). Этот процесс (близкий к контактной сварке по особенностям формирования соединений) получил промышленное применение в странах СНГ и за рубежом в основном для соединения труб небольших диаметров (до 50 мм) с толщиной стенки до 6 мм [4]. Он имеет ряд преимуществ по сравнению с КСС, в частности, отличается меньшими потерями металла на оплавление и потребляемой мощностью. При ПМДС нет необходимости зачищать поверхности труб перед сваркой, меньше высота усиления сварного шва, что позволяет во многих случаях исключить операцию удаления грата после сварки. К недостаткам метода сварки ПМДС следует отнести требования к более точной центровке труб перед

сваркой и невозможность получения качественных соединений при толщине стенки труб более 6 мм.

В ИЭС им. Е. О. Патона проводятся многолетние разработки, целью которых является расширение областей применения этого способа сварки, создание нового поколения оборудования систем автоматического управления. В последнее пятилетие разработаны системы автоматического управления процессом, позволяющие значительно повысить стабильность воспроизведения заданных параметров сварки при изменении точности сборки труб, геометрических размеров концов труб. Разработаны системы автоматического операционного контроля и диагностики качества соединений по изменению параметров сварки, компьютеризированные системы сбора и хранения информации о качестве соединений. Основные показатели оборудования, промышленный выпуск которого освоен предприятиями НТК ИЭС им. Е. О. Патона, приведен в табл. 2. Сварочные машины типа МД применяются в различных отраслях промышленности, машины МД 1, МД 2 используются строительными организациями Тюмени. Машина К 872 (рис. 3) предназначена для сварки тонкостенных труб диаметром до 219 мм толщиной до 10 мм, в том числе трубопроводов распределительных газозовых сетей.

В последние годы найдены способы управления процессом вращения дуги в магнитном поле, позволяющие получать равномерный нагрев при ПМДС труб толщиной стенок, превышающих 6 мм. Это достигается путем управления составляющими магнитного поля в зазоре между свариваемыми деталями, обеспечивающими сканирование дуги по толщине стенки. Таким способом сварены трубы

Таблица 3. Механические свойства соединений при ПМДС сварке

Марка стали	Диаметр и толщина труб, мм	Временное сопротивление разрыву, МПа		Ударная вязкость KCV, Дж/см ²	
		Основной металл	Сварное соединение	Основной металл	Сварное соединение
Сталь 20	32; 5	488...509	488...509	94...100	88...94
		502	502	98	90
Сталь 20	89; 10	488...509	488...509	92...100	86...94
		502	502	97	90
Сталь 20	219; 6	488...509	488...509	90...100	84...92
		502	502	95	88
Сталь 35	48; 4	538...565	538...565	56...64	52...96
		551	551	60	70
Сталь 35	76; 16	536...565	536...565	56...64	42...68
		550	550	60	55
12X1МФ	32; 5	536...566	536...566	133...144	56...116
		550	550	138	86
С75	48; 5	826...870	822...862	58...66	33...80
		852	838	61	57

толщиной стенки до 16 мм. Сегодня разрабатывается оборудование, позволяющее сваривать методом ПМДС трубы диаметром 114... 325 мм с толщиной стенки до 12 мм. Оно может быть использовано для сварки различных трубопроводов при транспортировке нефти и газа.

Проведены всесторонние механические испытания соединений труб из различных сталей, выполненные ПМДС. Как видно из табл. 3, показатели прочности и пластичности сварных соединений весьма близки к аналогичным показателям основного металла.

Контроль качества соединений, выполненных КСС. Многолетний опыт использования КСС при сооружении трубопроводов в различных регионах, в том числе на Крайнем Севере, свидетельствует о высоком и стабильном качестве соединений [7]. В соответствии с действующими техническими условиями оценка качества кольцевых стыков, сваренных КСС (во многих случаях выборочно), выполняется ручным УЗ контролем и операционным контролем (100 %), базирующимся на регистрации основных параметров процесса, влияющих на качество соединений. Кроме того, проводится вырезка 1 % стыков с последующими механическими испытаниями сварных соединений.

Среднестатистические цифры по количеству забракованных стыков, базирующиеся на анализе результатов контроля десятков тысяч километров сваренных трубопроводов различного диаметра, составляют 0,4 %. Из этого количества до 80 % приходится на выбраковку по отклонениям геометрических размеров сварных швов (смещения, некачественно удаленный грат). По данным, полученным при контроле отдельных участков трубопроводов диаметром 1420 мм протяженностью 100 км, количество забракованных стыков не превышает 0,1 %.

С учетом накопленного опыта контроля соединений труб, выполненных контактной сваркой, в последние годы проведены работы по совершенствованию неразрушающего и операционного методов контроля. Работы проводили совместно с ВНИИСТ в рамках межгосударственной программы «Высоконадежный трубопроводный транспорт» (ВНТТ).

Основной целью работы являлась автоматизация процесса контроля и определение алгоритмов оценки качества с использованием компьютеризированных систем. Ключевым вопросом при разработке автоматизированного УЗ контроля является идентификация различных дефектов, которые могут появляться в соединениях, выполненных сваркой давлением (в том числе тонких оксидных пленок), с использованием общепринятых для дуговых способов сварки эталонов и определение достоверности выявления этих дефектов. На втором этапе работ проведены исследования влияния различных категорий дефектов на механические свойства соединений. При этом широко использована методика, предусматривающая испытания широкоформатных образцов (секторов, вырезанных из натуральных труб) при различных типах нагрузок, температурах испытаний и концентрациях

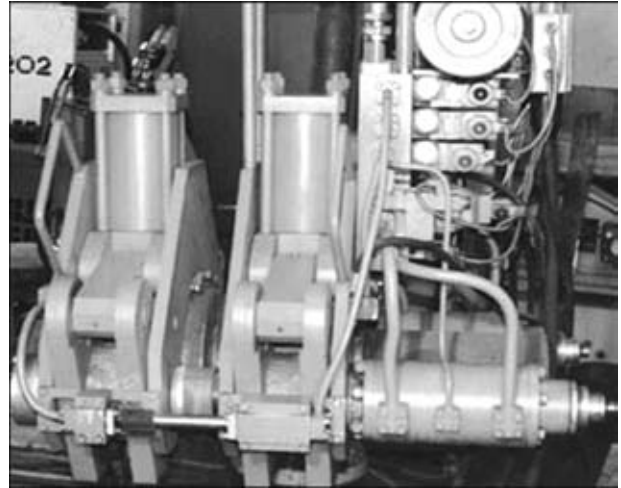


Рис. 3. Машина К 872 для прессовой сварки труб диаметром 60...219 мм с нагревом дугой, вращающейся в магнитном поле

напряжений. Эти исследования позволили установить степень влияния различных категорий дефектов, надежно выявляемых УЗ контролем, на механические свойства соединений, определить категории недопустимых дефектов и предельные размеры допустимых.

Существенное влияние на результаты УЗ контроля может оказывать форма сварного шва. Согласно техническим требованиям грат и частичное усиление шва удаляют после сварки, после чего усиление последнего не превышает 2 мм. При общепринятых методиках указанные выступы на границах сварного шва дают сигналы, искажающие показатели УЗ контроля. Разработка системы датчиков и преобразователей, работающих как тандем, позволила исключить влияние сигналов, поступающих от границ сварного шва на результаты контроля. Исследования по УЗ контролю выполняли на базе использования современных методов дифрагированных волн, а также эхо-импульсного метода и синтезированной апертуры. Контроль выполняли на аппаратуре системы ЗИПСKAN. В процессе указанных исследований выполняли также рентгеновский контроль соединений по условиям, принятым для дуговой электросварки. Эти работы позволили получить сравнительные данные о выявляемости дефектов УЗ контролем и рентгеновским методом. Установлено, что одновременное применение метода «тандем» и дифрагированных волн позволило значительно уменьшить число ложных сигналов, обусловленных геометрией шва, и повысить достоверность обнаружения тонких дефектов типа оксидных плен. Практически все дефекты, влияющие на механические свойства соединений, дают сигналы, превышающие принятые эталонные значения, и стабильно выявляются при достаточно больших отклонениях геометрических размеров швов.

Из сравнения данных, приведенных в табл. 4, видно, что результаты УЗ контроля хорошо согласуются с результатами механических испытаний натуральных образцов с надрезом по линии соединения, где выявляются все возможные дефекты. Достоверность УЗ контроля превышает 0,95 при обнаружении недопустимых дефектов и 0,92 всех



Таблица 4. Результаты контроля качества соединений, выполненных контактной стыковой сваркой

№ партии	№ стыка	Геометрическая форма стыка	Тип и размеры дефектов при испытаниях на разрыв, мм ²		
			РК	УЗК	Разрушающих испытаний
1	1	Без усиления, без смещения	НН-12,6	НН-12,6; НО-136,64	НН-12, 6
	2		НН-20,8	НН-20,8; НО-100,90	НН-20,8; НО-100, 30
	3		—	НН-1; НО-40; НН-150	НН-1; НО-40; НН-136; НН-64
	4		—	НН-10; НО-200; НН-64	НН-10; НО-200
	5		—	—	НО-6; НО-25
2	1	Усиление 2...3 мм	—	—	НО-48,24,20,8
	2		—	НН-1 (скопление); НО-100	НН-1,1,1; НО-100
	3		НН-6	НО-90	НН-6; НО-90
	4		НН-4	—	НН-4; НО-48,28,20,8
	5		—	НН-4,4,2; НО-80,40,25,25	НН-4,4,2; НО-80,40,25,25
3	1	Усиление 2...3 мм, смещение 2 мм	—	НН-8,6	НН-8,6
	2		—	НН-16; НО-150	НН-16; НО-150
	3		—	НН-20; НО-200	НН-20; НО-200
	4		—	—	НВ-100; ВК-10
	5		—	НН-9; НН-50	НН-9; НН-50
4	1	Усиление 2...3 мм, смещение 3,5...4,5 мм	—	НО-40	НО-40
	2		—	—	НО-20
	3		—	НО-75	НО-75
	4		—	—	НО-75
	5		—	НО-100	НО-100

Примечание. «—» — дефекта нет; НН — непровар типа несплошности; НО — непровар типа оксидных плен; НН — неметаллические включения.

дефектов. Наличие усиления шва и смещений до 3 мм не влияет на достоверность показателей контроля. Выявляемость дефектов типа оксидных плен и неметаллических включений методами рентгеноконтроля низкая.

На основании результатов проведенных исследований разработана базовая технология УЗ контроля сварных соединений труб, выполненных контактной сваркой, которая может быть использована для контроля качества кольцевых швов труб толщиной стенки 8...30 мм. При этом может быть использована современная аппаратура УЗ контроля, применяемая для контроля сварных швов при электродуговых способах сварки.

Операционный контроль. Операционный контроль был разработан и внедрен в начале 1980-х гг. в связи с массовым использованием контактной сварки при строительстве трубопроводов ответственного назначения. Основной отличительной особенностью разработанной технологии КСС труб является использование метода нагрева НО без подогрева сопротивлением с автоматическим регулированием основных параметров процесса. При этом последние задаются программами в сочетании с использованием обратных связей, что позволяет автоматически корректировать значение параметров при изменении условий эксплуатации. Благодаря этому представляется возможным обеспечить высокую воспроизводимость заданных условий нагрева и деформации при сварке. Это позволяет диагностировать качество соединений в зависимости от значений отклонений основных параметров, регистрируемых в процессе сварки, от заданных программ. В процессе многолетнего использования указанной технологии накоплен значительный банк данных, показывающий взаимосвязь качества соединений с отклонениями параметров сварки от заданных значений, имевших место в процессе эксплуатации. В результате обработки этих данных, а также моделирования различных условий сварки с отклонениями от принятых режимов определены критерии оценки качества соединений по результатам сравнения записей параметров регистрирующими приборами с эталонными образцами. Регистрация параметров введена в действующие правила приемки стыков, сваренных КСС как один из обязательных методов

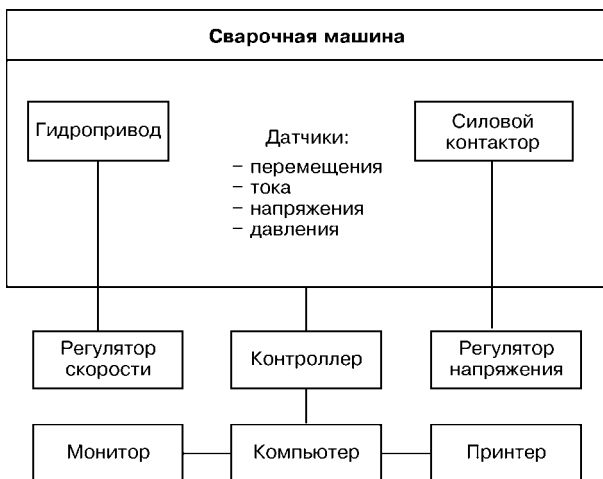


Рис. 4. Структурная схема системы контроля и управления процессом контактной сварки оплавлением



Таблица 5. Технические характеристики машин для контактной сварки труб

Тип машины	Диаметр и толщина труб, мм	Мощность при ПВ = 50 %, кВт·А	Мощность электростанции, кВт·А	Масса, т	Производительность, стык/ч	Конструкция машины
<i>Машины первого поколения</i>						
К 700	1420; 20	820	1000	26	6	Внутритрубная
К 800	1220; 16	600	850	20	8	»
К 805	530; 8	300	500	12	10	Наружнотрубная
<i>Машины нового поколения</i>						
К 1006	1420; 20	650	800	16	10	Внутритрубная
К 926	920...1020; 16	400	550	12	12	»
К 1007	630; 14	300	380	8	12	Наружнотрубная

контроля. Расшифровка таких диаграмм требует определенных навыков операторов-сварщиков и контроллеров и не исключает субъективной оценки. Поэтому в последние годы разработана компьютеризированная система оценки качества соединений, также базирующаяся на измерении и сравнении основных параметров процесса. На рис. 4 представлена блок-схема системы контроля качества соединения. Основой ее является логический контроллер PLC в сочетании с компьютером. В таком исполнении она позволяет управлять процессом сварки и выполнять функции операционного контроля. Программа PLC разработана таким образом, что сначала в контроллере анализируются сигналы с датчиков, а затем на основе их анализа выдается команда на управление машиной. Алгоритм программы управления позволяет отслеживать ряд возможных нежелательных ситуаций, приводящих к нарушению устойчивого оплавления, и путем воздействия на привод оплавления и источник питания устранять эти ситуации или останавливать их развитие. Кроме того, в контроллер введены некоторые другие датчики. Сигналы с них непрерывно анализируются и в случае выхода какого-либо из параметров из поля допуска система реагирует на них в зависимости от их значимости в общем алгоритме оценки качества. Сварка может быть остановлена в случае грубого нарушения процесса. При отдельных отклонениях сигналы анализируются и вся полученная информация немедленно записывается в память компьютера и одновременно выводится на монитор в цифровой и аналоговой

форме. По окончании процесса сварки занесенные в память данные считываются, параметры процесса рассчитываются и анализируются в соответствии с заложенным алгоритмом качества, компьютер принимает решение о данном сварном соединении по принципу «годен-не годен». Результат анализа фиксируется на мониторе и автоматически распечатывается на принтере таким образом, что к концу смены получается полный список сваренных стыков с оценкой их качества (рис. 5). Для компьютера разработана специальная программа, позволяющая представить в графической форме ход процесса сварки как в целом, так и его отдельные фрагменты в увеличенном масштабе. Материалы по каждому стыку вводятся в общий банк данных, накапливаемый в процессе строительства.

Разработанная система контроля параметров может быть выполнена в виде отдельной приставки, которая легко адаптируется к используемым в настоящее время машинам для КСС труб, в частности машинам К 584, К 700. Она представляет собой промышленный или бытовой компьютер с принтером и электронным блоком, а также набором датчиков тока, напряжения и перемещения. Такая система, выполненная на базе переносного компьютера, внедрена в 2001 г. на работающей машине К 700.

Оборудование для контактной сварки. Имеющийся опыт эксплуатации наружно- и внутритрубных машин для контактной сварки труб показывает, что при сварке в монтажных условиях эффективность их использования во многом оп-

Смена _____

Оператор _____ Клеймо _____

Контролер _____

№ стыка	Время	Усв, В	Vн, мм/с	tн, сек	V1, мм/с	t1, сек	V2, мм/с	t2, сек	tф, сек	Vк, мм/с	tк, сек	Vос, мм/с	Loc, мм	t(t), сек	Прип, мм	P, МПа	Zkz, мм	К.З. Форс	Общее время	Прок	Резюме
xx00-000-1	14:41	1	0,15	50	0,15	55	*0,18	118	14	1,36	1,4	64	11	*0,0	50,0	14,9	---	НЕТ	238,7	ДА	Холход
pc00-000-1	15:37	409	0,15	95	0,15	56	0,19	116	14	0,99	1,4	42	11	0,8	50,6	14,9	15,9	НЕТ	283,2	НЕТ	Годен
pc00-000-2	16:09	410	0,15	94	0,15	56	0,20	114	14	0,98	1,4	41	11	0,9	51,4	14,7	17,3	НЕТ	280,1	НЕТ	Годен
pc00-001-1	16:44	412	0,15	96	0,15	56	0,19	116	14	0,99	1,4	45	11	0,8	50,9	14,4	16,8	НЕТ	282,9	НЕТ	Годен
pc00-001-2	17:42	408	0,16	98	0,15	56	0,21	113	14	0,99	1,4	43	11	0,9	52,0	14,6	17,1	НЕТ	284,5	НЕТ	Годен
pc00-002-1	18:20	410	0,14	98	0,16	55	0,20	113	15	1,15	1,4	42	10	0,8	51,6	14,6	16,3	НЕТ	282,4	НЕТ	Годен
pc00-002-2	18:48	409	0,15	91	0,16	55	0,21	110	14	0,99	1,3	44	11	0,8	50,8	14,8	17,4	ДА	272,4	НЕТ	Брак

Всего стыков: _____ 6
 Соответствует норме: _____ 5
 Бракованных: _____ 1

Рис. 5. Сменный рапорт при компьютеризированном контроле на трубосварочном комплексе «Север-1» (К 700)

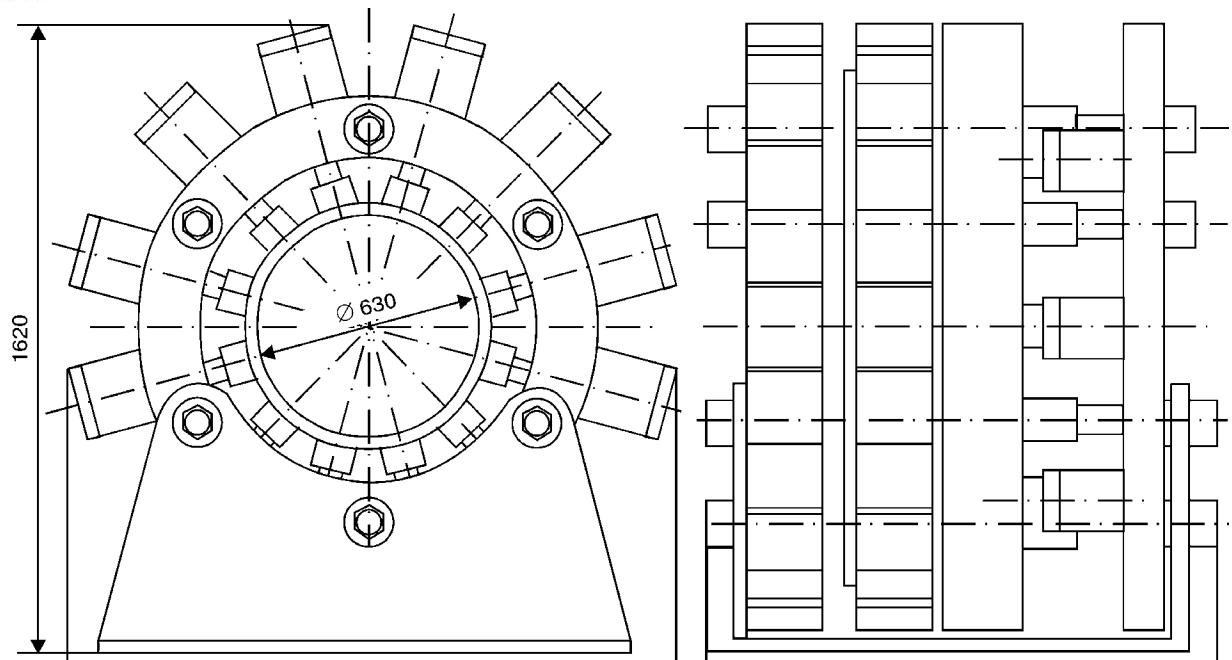


Рис. 6. Схема наружнотрубной машины К 1007 для контактной сварки труб диаметром 630 мм

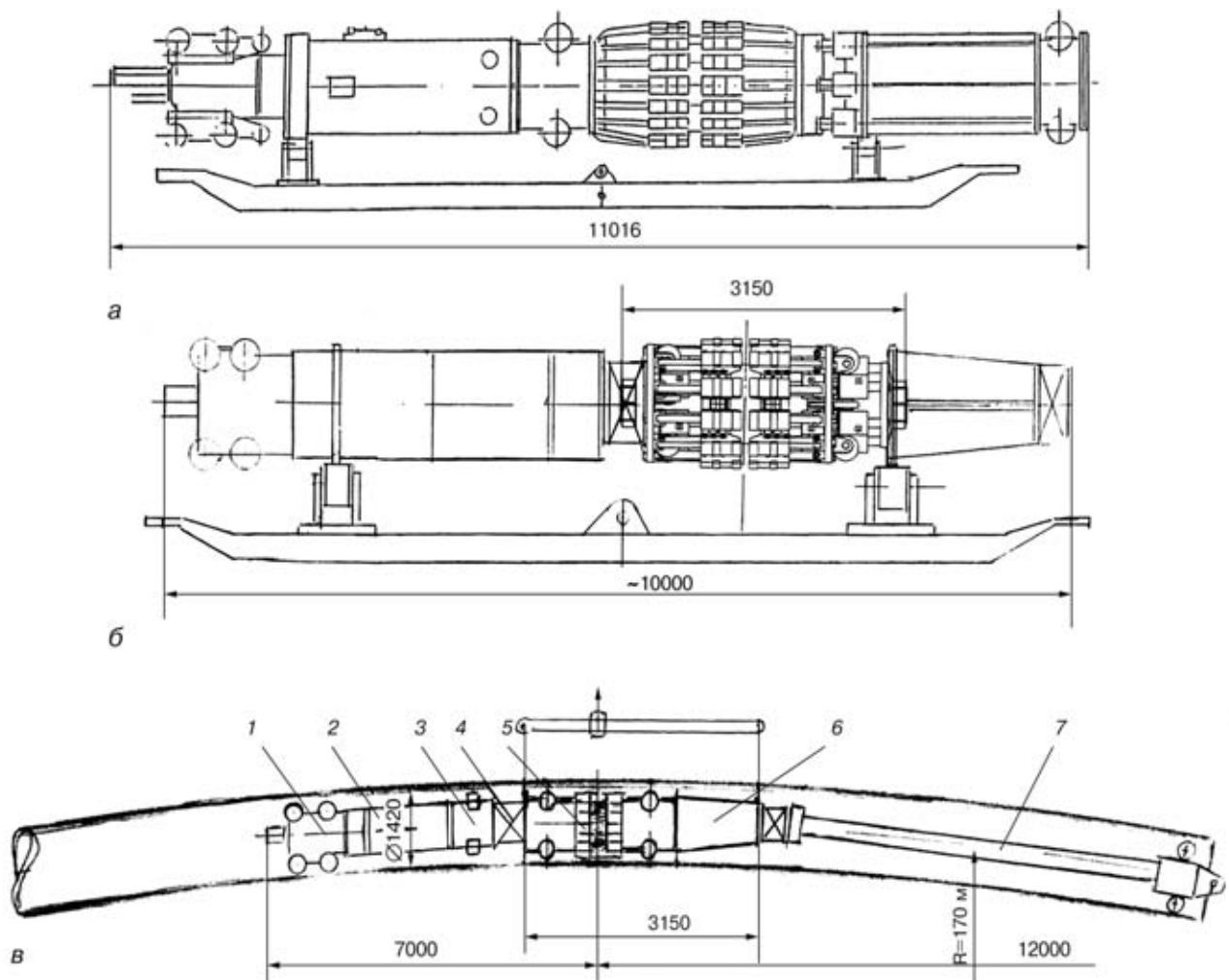


Рис. 7. Схемы внутритрубных машин К 700 (а) и К 1007 (б) для контактной сварки труб диаметром 1420 мм; размещение машины К 1007 в трубе (в): 1 — привод перемещения; 2 — насосная станция; 3 — гратосниматель; 4 — шарнир; 5 — сварочная головка; 6 — гидростек; 7 — штанга



ределяется мобильностью всего комплекса оборудования, точностью центровки концов труб, который обеспечивает механизм центровки машин, а также работой гратоснимателя. Кроме того, при сварке в монтажных условиях во многих случаях возникает необходимость сварки гнутых труб. Реализация перечисленных выше разработок дает возможность существенно повысить технико-экономические показатели при КСС труб, однако для этого необходимо существенно изменить конструкцию основных кинематических узлов, электрического контура, гидравлического привода и системы управления с использованием современных компонентов гидравлических узлов и электроники. Это дает возможность значительно снизить массу механической части машин, уменьшить сопротивление сварочной цепи и потребляемую мощность, повысить быстродействие привода и реализовать новую технологию сварки пульсирующим оплавлением.

В основе разработки нового поколения машин для КСС труб лежит такая же концепция организации работ при сварке в стационарных и полевых условиях, как и в первом поколении машин. Для сварки труб диаметром 114... 325 и 377... 630 мм принято наружнотрубное исполнение машин, а для труб больших диаметров (710... 1420 мм) — внутритрубное. Наружнотрубные машины оборудованы встроенными гратоснимателями для удаления в горячем состоянии наружного грата и отдельным гратоснимателем нового типа для обработки внутреннего грата, которая также выполняется в горячем состоянии. Внутритрубные машины имеют встроенный гратосниматель для удаления внутреннего грата в горячем состоянии. Наружный грат, как и в машинах первого поколения, обрабатывается после сварки в холодном состоянии отдельным механизмом.

Для сварки труб диаметром 114... 320 мм с толщиной стенки до 16 мм может быть использована модернизированная машина К 584Б, производство которой освоено на Каховском заводе электрос-

варочного оборудования. Для труб диаметром 377... 630 мм с толщиной стенки до 14 мм разработана новая машина (рис. 6), которая может быть использована как в стационарных, так и полевых условиях.

Типовая конструкция внутритрубной машины приведена на рис. 7, а. Центральная ее часть представляет собой центратор, шарнирно соединенный с двумя вспомогательными блоками, что позволяет выполнять ее перемещение внутри изогнутых труб (рис. 7, в). В машинах применена новая конструкция гратоснимателей, обеспечивающих чистовую обработку грата сварных швов.

В табл. 5 приведены основные технические характеристики нового поколения машин. Для сравнения в ней указаны аналогичные данные для машин первого поколения. Новое поколение оборудования имеет почти в 2 раза меньшую массу, что повышает его мобильность, для энергооборудования могут быть использованы электростанции меньшей мощности, в 1,5... 2,0 раза уменьшено время сварки, что особенно ощутимо при сварке толстостенных труб. В 2003 г. планируется изготовить пилотные образцы некоторых из перечисленных машин.

1. *Punchon C.* Reduced pressure electron beam welding for steel pipelines // The Intern. conf. on advances in welding technology, Huston, Oct., 1999.
2. *Dorling D. V., Loyer A.* Homopolar pulsed welding for pipeline application // Proc. of Intern. conf. on solid-phase Bonding, Cambridge, Sept., 1999.
3. *Huff G.* Radial friction welding for offshore pipelines and risers // Ibid.
4. *Prebschweiben mit magnetisch bewegtem Lichtbogen* // Proc. of DVS 2934, May, 1987.
5. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992.
6. *Пат. US6297752B1 США.* Способ контактной сварки оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, А. В. Дидковский, М. В. Богорский и др. — Оpubл. 25.09.2001.
7. *Качество* сварки трубных сталей X70, полученных контактной сваркой оплавлением / В. Ф. Загадарчук, С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казымов и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 4. — С. 27–32.

The paper describes new developments of technology and equipment for flash-butt welding of pipes, allowing enhancement of the technological features of application of this welding process in construction of various pipelines.

Поступила в редакцию 28.02.2003



СИСТЕМЫ АТТЕСТАЦИИ И СЕРТИФИКАЦИИ СВАРОЧНОГО ПЕРСОНАЛА В ЯПОНИИ

Х. КОГУРЭ, исполнительный директор Японского технического сварочного общества,
Ю. ФУДЗИТА, президент Японского технического сварочного общества

Представлены системы сертификации сварщиков и инженеров-сварщиков, введенные и принятые в практику Японским техническим сварочным обществом (JWES) в 1971 г. и пересмотренные в 1998 г. При JWES были учреждены уполномоченные национальные комиссии Японии и аккредитованы МИС в 2000 г. В Нагое находится единственный в своем роде специализированный центр обучения со своей системой аттестации инженеров-сварщиков, технологов-сварщиков и сварщиков-специалистов.

Ключевые слова: сварочный персонал, системы аттестации, классификация, промышленные стандарты, аккредитация, центр обучения

Системы сертификации сварочного персонала, представленные в табл. 1–5, разработаны Японским техническим сварочным обществом (JWES) и должны вводиться персоналом научных организаций, исследовательских институтов и промышленных предприятий на добровольных началах с целью усовершенствования сварочных технологий в Японии. Данные системы аккредитованы Японской аккредитационной комиссией по оценке соответствия (JAB) согласно методикам, предписываемым стандартом JAB CP-100 (эквивалентным Руководству ISO 61/EN 45013).

При поддержке (включая также финансовый аспект) японских промышленных организаций (ассоциации автомобиле-, машино-, судостроения и т. д.) в 1993 г. была создана JAB для выполнения оценки и сертификации/регистрации промышлен-

ного персонала в соответствии со стандартами ISO (например, ISO 9000). JWES также участвовала в создании этой организации, обеспечивая качество сварочной продукции в соответствии со стандартами ISO 9000 и/или ISO 3834 «Требования к уровню качества сварки».

В рамках серии стандартов ISO 9000 по качеству систем управления сварка рассматривается как «специальный процесс», так как ее качество невозможно проверить путем последующего контроля и испытания продукта с целью обеспечения соответствия стандартам. Специальные процессы требуют, как минимум, проверки для подтверждения их надежности, качества и приемлемости. Процедура проверки имеет следующий порядок:

- процессы, требующие аттестации до использования;
- аттестация используемого оборудования и занятого персонала;

Таблица 1. Классификация сертификации сварщиков для сварки углеродистых сталей

Степень, уровень и положение сварки					Сварочный процесс и тип соединения			
Пластина				Труба	Сварочный процесс	Толщина материала	Сварное соединение	
Нижнее	Вертикальное	Горизонтальное	Верхнее	Горизонтальное зафиксированное			Разделка кромок	Использование подкладки
N-1F	N-1V	N-1H	N-10	N-1P	Дуговая сварка под флюсом	Небольшая	Н- или V-образная	Нет
A-2F	A-2V	A-2H	A-20	A-2P		Средняя		Да
N-2F	N-2V	N-2H	N-20	N-2P		Большая		Нет
A-3F	A-3V	A-3H	A-30	A-3P				Да
N-3F	N-3V	N-3H	N-30	N-3P				Нет
C-2F	C-2V	C-2H	C-20	C-2P	Комбинированный процесс	Средняя	»»	
C-3F	C-3V	C-3H	C-30	C-3P		Большая		
T-1F	T-1V	T-1H	T-10	T-1P	Дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе	Небольшая	Н- или V-образная	
G-1F	G-1V	G-1H	G-10	G-1P	Газовая сварка			

Примечания. 1. Обозначение степени: N — без подкладки; A — с подкладкой; 1 — тонкая пластина; 2 — пластина средней толщины; 3 — толстая плита; F — нижнее положение, V — вертикальное; H — горизонтальное; O — верхнее; P — сварка труб с горизонтально зафиксированной трубой; 2. Комбинированный сварочный процесс, например, дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе + дуговая сварка под флюсом. 3. В соответствии с JIS Z 3801–1997.



Таблица 2. Задания экзамена на сертификацию

Степень сертификации					Виды заданий экзамена			
F	V	H	O	P	VT	FB	RB	SB
N-1F	N-1V	N-1H	N-1O	N-1P	—	—	—	*
A-2F	A-2V	A-2H	A-2O	A-2P	—	—	—	*
N-2F	N-2V	N-2H	N-2O	N-2P	—	—	—	*
A-3F	A-3V	A-3H	A-3O	A-3P	—	*	—	—
N-3F	N-3V	N-3H	N-3O	N-3P	—	*	—	—
C-2F	C-2V	C-2H	C-2O	C-2P	—	—	—	*
C-3F	C-3V	C-3H	C-3O	C-3P	—	*	—	—
T-1F	T-1V	T-1H	T-1O	T-1P	—	—	—	*
G-1F	G-1V	G-1H	G-1O	G-1P	—	—	—	*

Примечания. 1. Обозначения F, V, H, O, P см. табл. 1; VT — визуальный контроль; FB — испытание на изгиб с растяжением внешней стороны шва; RB — испытание на изгиб с растяжением обратной стороны шва; SB — испытание на боковой изгиб; — выполнять; * не выполнять. 2. В соответствии с JIS Z 3801-1997.

- использование специальных методик и протоколов;
- повторная проверка.

Классификация сертификации сварщиков с учетом технологических процессов, согласованных с Японским промышленным стандартом (JIS), при-

ведена в табл. 1-5. Наибольшую популярность системы сертификации JWES приобрели в отраслях промышленности, производящих рамные конструкции (строительство, мостостроение и т. д.). Сертификация выполняется на основании письменного экзамена по общей сварочной технологии, а также практического теста на уровень квалификации с использованием образцов материалов. Банк данных для письменных экзаменов включает 200 запросно-ответных заданий из области общей сварочной технологии и около 30 из каждой специальной области в зависимости от способа сварки. Практическое задание оценивается с помощью визуального контроля и испытания на изгиб. После сдачи экзамена и выполнения практического задания претенденту выдают сертификат, действительный в течение года. По истечении срока необходимо подать заявление об инспектировании, которое является подтверждением, что он проработал в течение шести месяцев текущего года (с целью поддержания своей квалификации на должном уровне на протяжении всего срока занятости на этой работе). По прошествии трех лет после получения сертификата претендент должен подать повторное заявление. Максимальное количество заявителей в 1997 г. достигло 120 тыс. чел., в даль-

Таблица 3. Классификация сертификации сварщиков для полуавтоматической сварки углеродистых сталей

Степень, уровень и положение сварки					Сварочный процесс и тип соединения						
Пластина				Труба	Сварочный процесс	Толщина материала	Сварное соединение				
Нижнее	Вертикальное	Горизонтальное	Верхнее				Разделка кромок	Использование подкладки			
SN-1F	SN-1V	SN-1H	SN-1O	SN-1P	Дуговая сварка под флюсом	Небольшая	Н- или V-образная	Нет			
SA-2F	SA-2V	SA-2H	SA-2O	SA-2P					Средняя	Да	
SN-2F	SN-2V	SN-2H	SN-2O	SN-2P		Нет					Нет
SA-3F	SA-3V	SA-3H	SA-3O	SA-3P							
SN-3F	SN-3V	SN-3H	SN-3O	SN-3P		Большая			Нет	Нет	
SC-2F	SC-2V	SC-2H	SC-2O	SC-2P	Комбинированный процесс		Средняя	»»			
SC-3F	SC-3V	SC-3H	SC-3O	SC-3P		Большая	Да				
SS-2F	SS-2V	SS-2H	SS-2O	SS-2P	Дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе (открытой дугой)	Средняя		Да			
SS-3F	SS-3V	SS-3H	SS-3O	SS-3P		Большая	Нет				

Примечания. 1. S — сварщик, выполняющий полуавтоматическую сварку. Обозначения F, V, H, O, P см. табл. 1. 2. Комбинированный процесс (например, дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе + дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе). 3. Задания экзамена: для тонких и средних пластин: VT, FB и RB; для толстых плит: VT, RB и SB. 4. В соответствии с JIS Z 3801-1997.

Таблица 4. Классификация сертификации сварщиков для сварки нержавеющей сталей

Степень, уровень и положение сварки					Сварочный процесс и тип соединения			
Пластина				Труба	Сварочный процесс	Толщина материала	Сварное соединение	
Нижнее	Вертикальное	Горизонтальное	Верхнее				Разделка кромок	Использование подкладки
CN-F	CN-V	CN-H	CN-O	CN-P	Дуговая сварка под флюсом	Средняя	V-образная	Нет
			CA-O	CA-P				Да
				CN-PM	Комбинированный процесс	Нет		
TN-F	TN-V	TN-H	TN-O	TN-P	Дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе	Небольшая	»»	»»
MN-F	MN-V	MN-H			Дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе	Средняя		»»
MN-F	MA-V	MA-H						Да

Примечания. 1. Задания экзамена: VT, FB и RB. 2. T — ТИГ (дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе). 3. Комбинированный процесс (например, дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе + дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе). 4. В соответствии с JIS Z 3801-1997.



нейшем количестве уменьшилось вследствие экономической ситуации и других причин. Одна из них заключается в том, что в Японии все большую популярность приобретают сварочные роботы, и на сегодня закуплены и находятся в эксплуатации уже 3 тыс. роботизированных сварочных установок для использования в строительстве. В 2001 г. JWES ввело систему сертификации операторов роботизированных сварочных установок в строительстве. Другой причиной является то, что сварщики из азиатских стран приезжают в Японию в рамках программы JTCSO, поддерживаемой японским правительством, и многие японские производители нанимают этих сварщиков на работу, поскольку они являются высококвалифицированными специалистами и дешевой рабочей силой. В рамках этой программы они находятся в Японии три года, и в течение этого срока должны подать заявку на получение сертификата сварщика JWES. Сейчас в Японию в рамках программы JTCSO каждый год приезжают до 800 чел. Целью программы является предоставление возможности людям из азиатских стран пройти подготовку и получить образование во время их работы на промышленных предприятиях Японии.

Система сертификации инженеров-сварщиков. В 1970 г. JWES ввело стандарт на сертификацию инженера-сварщика в соответствии со стандартом WES 8103, и в 1972 г. система начала действовать. В 1998 г. последний был существенно переработан с учетом требований международного стандарта (например, ISO 14731 «Координация сварки — задачи и обязательства»). В информационном приложении к стандарту ISO 14731 отмечено три группы аттестации по схеме EWF (Европейской федерации сварщиков), которые соответствуют трем уровням сертификации:

- EWE (европейский инженер-сварщик);
- EWT (европейский технолог-сварщик);
- EWS (европейский специалист-сварщик).

В соответствии со стандартом JWES к концу 2000 г. были сертифицированы около 8100 инженеров-сварщиков I категории, 47400 инженеров-сварщиков II категории и 1700 старших инженеров-сварщиков. В 1999 г. JWES было аккредитовано в соответствии со стандартами JAB CP-100 и CP-200 как первый орган сертификации персонала в Японии, что сделало ее более открытой, объективной и непредвзятой системой международного уровня, согласующейся со стандартами ISO. Система сертификации JWES наиболее популярна в Японии в области строительства и производства стальных рамных конструкций, поскольку эти отрасли осознали важность роли координатора сварки в повышении качества сварочной продукции и приняли эту систему сертификации для руководства в работе. Сегодня JWES получила всеобщее признание. Что касается старших инженеров-сварщиков, между Немецким сварочным обществом (DVS) и JWES было заключено взаимное соглашение о признании первого, но оно закончилось, когда была введена схема вручения дипломов МИС/EWF. Более 20 лет назад Японское международное агентство по сотрудничеству

(JICA) приняло систему сертификации инженеров-сварщиков JWES в качестве одного из курсов подготовки и обучения людей из развивающихся стран в Центре обучения г. Нагоя. За это время около 200 человек получили образование и прошли курс подготовки. Организация перехода на дипломы МИС от трех групп владельцев сертификатов инженера-сварщика JWES началась в 2001 г., и к концу 2002 г. было выдано около тысячи дипломов МИС.

Система сертификации персонала, координирующего сварку. Существует три уровня сертификации координатора сварки в соответствии со стандартом ISO 14731 (табл. 6). Для допуска заявителя к каждому из уровней предъявляются требования (табл. 7), которые основываются на связанных со сваркой уровне образования и опыте работы заявителя. Одной из особенностей системы сертификации JWES является то, что она учитывает научную карьеру заявителя, но не ставит перед ним таких строгих ограничений, как схемы аттестации EWF и МИС. По схемам последних только заявитель, получивший техническое образование и имеющий степень бакалавра, допускается к экзаменам на европейского инженера-сварщика и международного инженера-сварщика.

JWES экзамены проводит два раза в год. Экзамен состоит из письменного и устного заданий. Технические знания и квалификация оцениваются по следующим разделам: сварочные процессы и оборудование; материалы и их поведение во время сварки; конструирование и проектирование; производственное и прикладное конструирование.

Это те же разделы, которые используются в схеме МИС (EWF), включая те же программы (ключевые слова). Технические знания и квалификация, которые необходимы для деятельности, обусловленной стандартом ISO 14731, включены в раздел «Производственное и прикладное конструирование».

Устный экзамен является обязательным для уровня старшего инженера-сварщика (SWE). В то же время заявители на I и II уровень, которые прошли полный курс обучения, заранее разработанный JWES (но не обязательно организованный JWES), могут быть освобождены от устного экзамена. Если кандидат набрал около 70 % проходного балла на письменном экзамене, то он/она должны сдать устный экзамен. Если кандидат отвечает критериям допуска, JWES выдает сертификат. Изначально он действителен в течение двух лет. В течение шести месяцев до истечения срока действия сертификата он/она подает заявление об инспектировании, в ходе которого регистрируется письменное свидетельство о занятости на работе, связанной со сваркой. Если в ходе инспектирования подтвердится квалификация владельца сертификата, срок его действия будет продлен еще на три года.

Сопоставление с квалификационной схемой аттестации МИС. Международный институт сварки был учрежден в 1948 г. Сегодня он состоит из более чем 40 стран-членов, включая страны «большой восьмерки», его деятельность охватывает об-



Таблица 5. Система сертификации сварщиков JWES

Тип сертификации	Ссылка на стандарт	Аккредитация
Дуговая сварка под флюсом углеродистых сталей (пластины и трубы)	JIS Z 3801-97	JAB
Полуавтоматическая сварка МАГ, дуговая сварка порошковой проволокой и в комбинации с дуговой сваркой вольфрамовым электродом в защитном газе нержавеющей сталей (пластины и трубы)	JIS Z 3841-97	JAB
Дуговая сварка под флюсом, дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе, дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе и в комбинации с дуговой сваркой вольфрамовым электродом в защитном газе нержавеющей сталей (пластины и трубы)	JIS Z 3821-97	JAB
Дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе и дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе для титана и сплавов на его основе (пластины и трубы)	JIS Z 3805-97	JAB
Ручная сварка струей горячего газа термопластиков (поливинилхлорида, полипропилена и полиэтилена) (пластины)	JIS Z 3831-97	JAB
Пайка с применением нагрева газовым пламенем меди, углеродистых и нержавеющей сталей (пластины и трубы)	JIS Z 3891-97	JAB
Дуговая сварка под флюсом, дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе, дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе и в комбинации с дуговой сваркой вольфрамовым электродом в защитном газе углеродистых, жаропрочных и нержавеющей сталей (пластины и трубы)	JIS Z 3801, 3821 и 3841	По выбору с JPI ¹
Дуговая сварка под флюсом с использованием присадочных материалов углеродистых сталей (только угловых соединений)	WES 8101-72	По выбору
Дуговая сварка под флюсом и дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе упрочняющих стальных стержней для сборных конструкций	WES 8105-87	По выбору ²
Дуговая сварка под флюсом, дуговая сварка металлическим электродом в защитном газе и дуговая сварка порошковой проволокой фундаментных трубчатых свай (вертикально зафиксированные трубы)	WES 8106 ³	По выбору

1. Экзамены проводятся JWES, но аттестация выполняется JPI. 2. Экзамены проводятся JWES, но аттестация выполняется Ассоциацией архитектуры и строительства. 3. Трубы из углеродистых сталей с использованием подкладки.

Таблица 6. Задачи, технические знания и квалификация, необходимые для координаторов сварки

Уровень	Задачи и деятельность	Технические знания и квалификация
Старший инженер-сварщик	Все виды деятельности, описанные в табл. 1 стандарта ISO 14731	Всесторонние технические знания и квалификация для надзора и контроля сварочного производства на высшем уровне
I	Деятельность, описанная в п. 1.3 и последующих частях табл. 1 стандарта ISO 14731	Специальные технические знания и квалификация для обеспечения сварочного производства и технического контроля
II	Деятельность, описанная в п. 1.3 и 1.6 и последующих частях табл. 1 стандарта ISO 14731	Основные знания и квалификация для технического контроля сварки

мен информацией на ежегодных конгрессах и промежуточных заседаниях комиссии МИС. Деятельность МИС также включает подготовку проектов стандартов ISO, публикации, организацию международных конференций и т. д. в области сварки, резки, соединения и связанного с ними проектирования. В 2004 г. в Осаке планируется проведение ежегодного конгресса МИС. На основании результатов обсуждений 13 и 14-й Комиссий ежегодного конгресса МИС, проведенного в Пекине в 1994 г., было принято решение о внедрении во всем мире схемы аттестации МИС сварочного персонала. После четырех лет дальнейшей работы схема МИС была реализована. Кроме того, МИС и Европейская федерация сварщиков пришли к соглашению, что схема EWF должна быть переведена в схему МИС в течение пяти лет или срока, оговоренного в стандартах EN 719 и ISO 14731. Схема аттестации EWF оговорена в Приложении к EN 719 и ISO 14731. При совете директоров МИС создана Международная комиссия по утверждению (IAB) с целью реализации схем МИС. Этот орган состоит из Наблюдательного совета и двух вспомога-

тельных групп (А и В). IAB определяет руководящие принципы, правила и методы работы, которые устанавливают минимальные требования к образованию, экзаменам и аттестации, а также правила и методики реализации схемы, которые должны применяться одинаково всеми странами-членами МИС. Для их выполнения в каждой из стран должен быть учрежден Национальный уполномоченный орган (АНВ), действующий от имени МИС, его работа должна оцениваться и контролироваться в соответствии с правилами. Эти национальные уполномоченные органы обязаны обеспечивать соблюдение стандартов образования, экзаменов и аттестации.

Цель системы заключается в том, что персонал, обучаемый МИС, на определенном уровне должен достичь одинакового минимального уровня знаний независимо от страны, в которой он получил квалификацию. МИС предоставил полномочия только одной организации, связанной со сварочными технологиями, в каждой из стран-членов МИС. Только уполномоченный АНВ имеет право присоединиться к деятельности IAB. Роль АНВ заключается в том,



Таблица 7. Условия допуска к сертификации

Научная карьера или сертификация	Старший инженер-сварщик	I уровень	II уровень
Степень бакалавра естественных наук (диплом об окончании университета) по сварочному производству	1	1	1
Степень бакалавра естественных наук (диплом об окончании университета) по техническим и естественным наукам	3	2	1
Диплом об окончании университета по другой специальности (не по техническим или естественным наукам)	6	4	2
Диплом об окончании колледжа (2 года обучения) сварочного производства	5	3	1
Диплом об окончании колледжа (2 года обучения) технических или естественных наук	7	5	1
Диплом об окончании колледжа (2 года обучения) по другой специальности (не по техническим или естественным наукам)	10	8	4
Диплом об окончании технического колледжа	7	5	1
Диплом об окончании профессионально-технического училища технических или естественных наук	—	6	2
Диплом об окончании технического института	—	8	4
Диплом об окончании института по другой специальности (не по техническим наукам)	—	8	4
Другая научная карьера	—	—	7
Владелец сертификата I уровня	5	—	—
Владелец сертификата II уровня	—	4	—

Примечание. Цифры в колонках — минимальное требуемое количество лет опыта работы в сварочном производстве.

чтобы проводить аттестацию сварочного персонала в своей стране от имени МИС, включая:

- утверждение утвержденных учебных организаций для руководства курсами в соответствии с нормами МИС;
- проведение итоговых экзаменов;
- аттестацию сварочного персонала и регистрацию соответствующей информации.

ANB может расширять свою деятельность по аттестации персонала вне своей страны при строгом соблюдении правил.

По сравнению с системой сертификации JWES отличительными особенностями схемы аттестации МИС является система образования на почасовой основе и большое внимание, уделяемое научной карьере. Требования к образованию, минимальное количество часов обучения и учебный план строго соблюдаются по каждому уровню:

международный инженер-сварщик, ч	446
международный технолог-сварщик, ч	340
специалист-сварщик, ч	222
практик-сварщик, ч	146

Если кандидат не может завершить научную карьеру, он/она не допускается к итоговому экзамену. В случае успешной сдачи экзамена ANB выдает кандидату бессрочный диплом. Ожидается, что в скором будущем схема МИС будет оговорена в стандарте ISO 14731. Когда она будет реализована, система JWES сможет быть связана со схемой МИС через ISO 14731.

Схема перехода от сертификации JWES к аттестации МИС. Разрешение перехода, индивидуально для каждой страны, может быть утвер-

ждено группой В (IAB), если система аттестации и сертификации страны является действующей. В Японии, если кандидаты удовлетворяют условиям допуска, уже утвержденным группой В (IAB), он/она может выбрать следующие способы перехода для получения различных уровней аттестации МИС:

- старший инженер-сварщик JWES + 5 лет опыта работы в области сварки + 24 ч обучения по целевому курсу + профессиональное собеседование;
- инженер-сварщик I уровня JWES + 5 лет опыта работы в области сварки + 24 ч обучения по целевому курсу + профессиональное собеседование;
- инженер-сварщик II уровня JWES + 5 лет опыта работы в области сварки + 24 ч обучения по целевому курсу + профессиональное собеседование;
- инженер-сварщик II уровня JWES (выпускник другого технического вуза) + 8 лет опыта работы в области сварки + 24 ч обучения по целевому курсу + профессиональное собеседование;
- сварщик-практик + 10 лет опыта работы в области сварки + 16 ч дополнительного обучения + профессиональное собеседование;
- профессиональный инженер в области сварки + 7 лет опыта работы + профессиональное собеседование.

Условия допуска, связанные с научной карьерой, также строго соблюдаются в каждом случае. Период соглашения о переходе ограничен до трех лет в каждом случае. В Японии некоторые соглашения о переходе начались в 2000, другие — в 2001 г.

Systems of certification of welders and welding engineers are presented, which were introduced into practice by the Japan Welding Engineering Society (JWES) in 1971, and reconsidered in 1998. The Authorized National Commissions of Japan were established at JWES and were certified in IAW in 2000. A unique specialized training center with its system of certification of welding engineers, welding technologists and welding specialists is located in Nagoya.

Поступила в редакцию 22.09.2003



У ДК 621.791.009(100)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СВАРКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Г. ГЕРОЛЬД, М. ЗИНКЕ, М. КАРПЕНКО (Ун-т Отто фон Гиреке, г. Магдебург, Германия)

Показаны преимущества применения гибридного процесса сварки (ИАГ-лазер и ТИГ с горячей присадочной проволокой) по сравнению с процессами ТИГ и лазерной сварки для получения надежных и технологичных соединений ответственных конструкций из высоконикелевых сплавов. При небольшой погонной энергии сварки можно достичь большой глубины проплавления и высокой производительности процесса.

Ключевые слова: высоконикелевые сплавы, ТИГ, ТИГ с горячей присадочной проволокой, лазерная сварка, гибридная сварка, высокая производительность

Общественность Германии относится к получению атомной энергии в основном отрицательно, поэтому многие электростанции работают на ископаемом топливе. Действующее законодательство страны предписывает использование установок для десульфурации дымовых газов (ДДГ) с целью ограничения образования агрессивных газов вследствие сгорания органических веществ — антрацита, бурого угля, нефти. Следовательно, существует необходимость во внедрении или модификации таких систем на новых и уже существующих электростанциях.

Установки для ДДГ подвергаются коррозионному воздействию различных агрессивных сред. В частности, такие участки, как необработанные впускные газовые клапаны, должны отличаться стойкостью к коррозионному воздействию серной, соляной и плавиковой кислот, а также воды, содержащей кислоты или галогениды, при крайне высоких локальных температурах и эрозии.

Исходя из опыта США, в установках для ДДГ начали применять высоколегированные нержавеющие стали марок 1.4429 (X2CrNiMoN17-13-3), 1.4439 (X2CrNiMoN17-13-5) и 1.4539 (X1CrNiMoCuN25-20-5). Поскольку детали, изготовленные из этих сталей, также подвержены коррозионному разрушению, в настоящее время они используются редко. Применение для этих целей специальных высококачественных сталей и сплавов на основе никеля с высокой коррозионной стойкостью требует разработки гибких, надежных и эффективных технологий для обеспечения высокой коррозионной стойкости сварных соединений, а также экономичности сварочного производства.

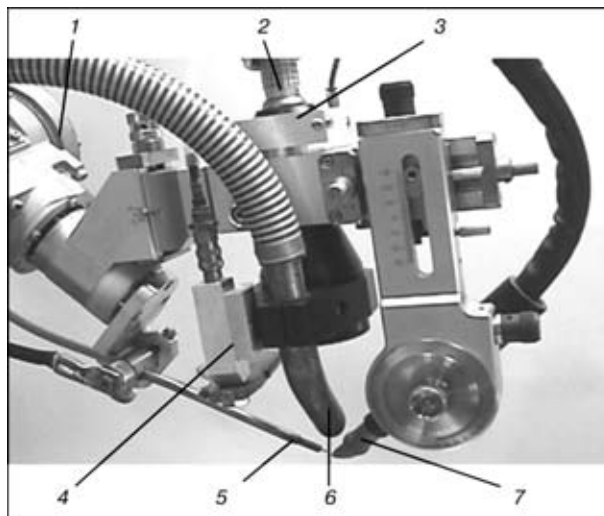
Из-за указанных коррозионных воздействий детали из сплавов на основе никеля в средних зонах установок для ДДГ соединяются практически только способом сварки ТИГ. Опыт показал, что этот процесс обеспечивает очень хорошее качество швов, необходимое при достаточно больших коррозионных нагрузках.

Существенным недостатком ручной сварки ТИГ является ее низкая производительность. Более эф-

фективным способом соединения листовых материалов из никелевых сплавов является сварка ТИГ с горячей присадочной проволокой, применяемая во всех пространственных положениях, при этом можно достичь скорости сварки приблизительно 0,8 м/мин. Еще одним ее преимуществом является высокая производительность — около 5,8 кг/ч при 100 %-м рабочем цикле, $I_{св} = 300$ А и диаметре проволоки 1,2 мм.

Плазменная сварка также является перспективным способом при серийном производстве установок для ДДГ из сплавов на основе никеля, поскольку стойкость к питтинговой коррозии соединений, полученных этим способом, не уменьшается. Однако необходимо ограничивать скорость сварки максимум до 0,33 м/мин, чтобы избежать дефектов в сварных швах при больших зазорах в нахлесточных соединениях.

Характеристики швов, полученных лазерной сваркой, зачастую эквивалентны характеристикам швов, выполненных сваркой ТИГ, или даже лучше. Тепловое воздействие на свариваемый материал на порядок меньше за счет высокой концентрации вводимой энергии. Существенными недостатками лазерной технологии с использованием CO₂-лазе-



Головка для гибридной сварки со встроенной подачей горячей проволоки, отводом паров металла и поперечной струей: 1 — рука робота; 2 — гибкий световод; 3 — головка для лазерной сварки; 4 — устройство для создания поперечной струи; 5 — горячая присадочная проволока; 6 — отвод паров металла; 7 — горелка для сварки ТИГ

© Г. Герольд, М. Зинке, М. Карпенко, 2003



ров являются ее непригодность для использования в полевых условиях и весьма значительные первоначальные затраты. Твердотельные лазеры отличаются более подходящими характеристиками для использования в полевых условиях по сравнению с газовыми лазерами, поскольку их излучение можно транспортировать с небольшими потерями по световодам на расстояние до 100 м и более. Однако применение концентрированного лазерного пучка требует строгого соблюдения небольших допусков при подготовке соединения под сварку для того, чтобы исключить образование дефектов шва.

Технология гибридной сварки, известная еще с 1970-х гг., является решением указанной проблемы. Она технически и экономически обеспечивает выгодные производственные возможности сварки деталей промышленных установок из высокоэффективных коррозионно-стойких материалов, подверженных значительным коррозионным нагрузкам.

С нашей точки зрения, комбинация процессов сварки ИАГ-лазером и ТИГ с горячей присадочной проволокой наилучшим образом подходит для сварки тонколистовых материалов в полевых условиях. С одной стороны, световоды обеспечивают гибкую передачу излучения ИАГ-лазера; с другой, сварка ТИГ независимо от применения холодной или горячей присадочной проволоки является самым надежным и наиболее часто используемым высокоэффективным способом сварки упомянутых материалов.

Оборудование для гибридной сварки включает источник питания для сварки ТИГ Magic Wave

2000 Fuzzy и импульсный твердотельный ИАГ-лазер HLS 622. Разработана специальная головка для гибридной сварки (рисунок), обеспечивающая воспроизводимую настройку всех параметров, относящихся к процессу. Взаимодействие между тремя источниками энергии (лазерным пучком, дугой ТИГ и горячей проволокой) создает дополнительную энергию, которая фокусируется в зоне сварки. Поэтому при небольшой погонной энергии можно достичь большой глубины проплавления и высокой производительности. Этот способ отличается очень большой скоростью сварки и хорошим качеством швов по сравнению с традиционной сваркой ТИГ и лазерной сваркой.

Максимальная скорость сварки на имеющемся оборудовании достигает 1,8 м/мин, тогда как использование твердотельного лазера с более высокой мощностью (например 1 кВт) позволяет увеличить скорость сварки более чем до 2 м/мин.

Таким образом, для сварки высококачественных материалов необходима разработка гибких, надежных и эффективных технологических процессов, что обусловлено требованиями к обеспечению высокого качества сварных соединений, а также к эффективности сварочного производства. Гибридная технология процессов сварки ИАГ-лазером и ТИГ с горячей присадочной проволокой имеет преимущества по сравнению с традиционной сваркой ТИГ и лазерной сваркой. Способ гибридной сварки представляет собой решение экономической проблемы создания установок для ДДГ при условии разработки соответствующих роботизированных систем сварки, пригодных для использования в стационарных условиях на электростанциях.

Advantages of application of hybrid process of welding (YAG-laser+TIG hot wire) are shown as compared with TIG processes and laser welding for producing reliable and technological joints of critical structures from high-nickel alloys. At a low heat input of welding it is possible to attain a large depth of penetration and high efficiency of the process.

Поступила в редакцию 27.06.2003