



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор
Б. Е. ПАТОН**

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)
Гуань Цяо (Китай)
А. С. Зубченко (Россия)
М. Зиниград (Израиль)
В. И. Лысак (Россия)
У. Рейсген (Германия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
О. И. Стеклов (Россия)
Г. А. Туричин (Россия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

Адрес редакции:

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

Редакторы:

Т. В. Юштина, И. Ф. Соколова
Электронная верстка:
И. Р. Наумова, А. И. Сулима,
Д. И. Середа

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

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

Журнал переиздается
на английском языке
ИЭС им. Е. О. Патона под названием
«The Paton Welding Journal»
ISSN 0957-798X

**The Paton
WELDING JOURNAL**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады международной конференции
«Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее»
25-26 ноября 2013, г. Киев, Украина

95-летие Национальной академии наук Украины и ее президента Бориса Евгеньевича Патона	3
<i>Патон Б. Е.</i> Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона для современной энергетики	14
<i>Каблов Е. Н., Осленникова О. Г., Ломберг Б. С.</i> Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего	23
<i>Гуань Цяо.</i> Комплексное аддитивное производство на основе технологий сварки и соединений	33
<i>Райсген У., Шлезер М.</i> Сварные или клеевые соединения — является ли это вопросом будущего?	38
<i>Де А., Диброй Т.</i> Последние достижения в сварке трением с перемешиванием ...	43
<i>Горынин И. В.</i> Инновационные технологии в области конструкционных сталей и их сварки	48
<i>Уяма Т.</i> Тенденции в разработке оборудования для дуговой сварки в защитных газах в Японии	51
<i>Пилярчик Я., Земан В.</i> Сварка сегодня и завтра	59
<i>Алешин Н. П.</i> Современные информационные автоматизированные системы акустического контроля сварки	66
<i>Плескачевский Ю. М., Ковтун В. А.</i> Основы технологии электроконтактного спекания наноструктурированных металлополимерных покрытий триботехнического назначения	72
<i>Димлай В., Мудж П., Джексон П., Там-Хин Ган, Суа С.</i> Неразрушающий контроль конструкционной целостности элементов резервуара	80
<i>Жарди А.</i> Расчетное моделирование и экспериментальные исследования процессов переплава	83
<i>Энзингер Н., Соммитч К.</i> Тенденции в развитии сварки в Австрии	89
<i>Виларинхо Лоу, Виларинхо Лаура.</i> Современные исследования и перспективные разработки сварочных технологий в исследовательском центре «Лапрозольд—Бразилия»	93
<i>Окамото Я., Накашиба С., Сакагава Т., Окада А.</i> Микросварка алюминиевых сплавов пульсирующим лазером NdYAG и непрерывным диодным лазером	101
<i>Гдоутос Е.</i> Механическое поведение и разрушение слоистых конструкций	107
<i>Цветков Ю. В., Николаев А. В., Самохин А. В.</i> Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов	112
<i>Дуб А. В.</i> Перспективные технологии создания высоконадежных изделий из конструкционных сталей для базовых отраслей промышленности	119
<i>Белоев М., Хоменко В. И., Кучук-Яценко С. И.</i> Анализ и выбор сварочных технологий при строительстве магистральных трубопроводов большого диаметра	125
<i>Кудрявцев Ю., Клейман Я.</i> Регулирование остаточных сварочных напряжений: измерения, анализ усталости, упрочняющие обработки	129
<i>Патон Б. Е., Кривцун И. В., Маринский Г. С., Худецкий И. Ю., Ланкин Ю. Н., Чернец А. В.</i> Сварка, резка и термическая обработка живых тканей	135
<i>Коул Н., Вебер Дж., Пфартр М., Хернандес Д.</i> Привлечение и подготовка руководящего персонала в области сварки и пайки	147
ИНФОРМАЦИЯ	
Я. И. Микитину — 70	157
Центральная фильтровентиляционная система AIRTECH — гарантия чистого воздуха на производстве	159

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНТИ
РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA
Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция);
представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется
в журналах «Biuletyn Instytutu Sprawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия);
освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society»;
«Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
Guan Qiao (China)
A. S. Zubchenko (Russia)
M. Zinigrad (Israel)
V. I. Lysak (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
U. Reisgen (Germany)
O. I. Steklov (Russia)
G. A. Turichin (Russia)

FOUNDERS:

National Academy
of Sciences of Ukraine,
Paton Welding Institute,
IA «Welding» (publisher)

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com
URL: www.rucont.ru

Editors:

T. V. Yushina, I. F. Sokolova
Electron galley:
I. R. Naumova, A. I. Sulima,
D. I. Sereda

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001
ISSN 0005-111X

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

The journal is republished in English
by the E. O. Paton Electric Welding Institute
under title «The Paton Welding Journal»
ISSN 0957-798X

The Paton
WELDING JOURNAL

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

CONTENTS

Plenary papers of the International Conference
«Welding and Related Technologies. Present and Future»
25-26 November, 2013, Kiev, Ukraine

95th birthday anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine and Paton Boris Evgenievich, its president	3
<i>Paton B. E.</i> Research and developments of the E. O. Paton Electric Welding Institute for the nowadays power engineering	14
<i>Kablov E. N., Ospennikova O. G., Lomberg B. S.</i> Strategic trends of development of structural materials and technologies of their processing for modern and future aircraft engines	23
<i>Qiao Guan.</i> Generalized additive manufacturing based on welding/joining technologies	33
<i>Reisgen U., Schleser M.</i> Welding or Adhesive Bonding — is this a question for the future?	38
<i>De A., DebRoy T.</i> Recent advances in the quantitative understanding of friction stir welding	43
<i>Gorynin I. V.</i> Innovation technologies in the field of structural steels and their welding	48
<i>Ueyama T.</i> Trends in developments in gas-shielded arc welding equipment in Japan	51
<i>Pilarczyk J., Zeman W.</i> Welding today and tomorrow	59
<i>Alyoshin N. P.</i> Advanced information automated systems of acoustic control of welding	66
<i>Pleskachevsky Yu. M., Kovtun V. A.</i> Fundamentals of technology of electric contact sintering of nanostructured metal-polymeric coatings of tribotechnical purpose	72
<i>Dimlaye V., Mudge P., Jackson P., Tat-Hean Gan, Slim Soua.</i> Non-invasive structural health monitoring of storage tank floors	80
<i>Jardy A.</i> Numerical simulation and experimental investigation of remelting processes .	83
<i>Enzinger N., Sommitsch C.</i> Research in joining technologies in Austria	89
<i>Vilarinho Louriel, Vilarinho Laura.</i> Ongoing activities and prospects related to welding technology at Laprosolda-Brazil	93
<i>Okamoto Y., Nakashiba S., Sakagawa T., Okada A.</i> Micro-welding of aluminium alloy by superposition of pulsed Nd:YAG laser and continuous diode laser	101
<i>Gdoutos E.</i> Mechanical behavior and failure of sandwich structures	107
<i>Tsvetkov Yu. V., Nikolaev A. V., Samokhin A. V.</i> Plasma processes in metallurgy and technology of inorganic materials	112
<i>Dub A. V.</i> Challenging technologies of manufacture of highly-reliable structures of structural steels for basic branches of industry	119
<i>Beloev M., Khomenko V. I., Kuchuk-Yatsenko S. I.</i> Analysis and selection of welding technologies in construction of large-diameter main pipelines	125
<i>Kudryavtsev Yu., Kleiman J.</i> Residual stress management in welding: measurement, fatigue analysis and improvement treatments	129
<i>Paton B. E., Krivtsun I. V., Marinsky G. S., Khudetsky I. Yu., Lankin Yu. N., Chernets A. V.</i> Welding, cutting and heat treatment of live tissues	135
<i>Cole N., Weber J., Pfarr M., Hernandez D.</i> Recruiting and Preparing skilled personnel for leadership roles in welding and brazing	147
INFORMATION	
Ya. I. Mikitin is 70.....	157
Central filter-ventilation system AIRTECH is the guarantee of pure air in manufacturing	159

«Automaticheskaya Svarka» journal abstracted & indexed in Ukrainian refereed journal «Source», RJ VINITI «Welding» (Russia), «Welding Abstracts», ProQuest (UK), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (USA), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (France); Presented in Russian Science Citation Index & «Google Scholar»; Abstracted in «Welding Institute Bulletin» (Poland) & «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy); Covered in the review of the Japanese journals «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

95-ЛЕТИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ И ЕЕ ПРЕЗИДЕНТА БОРИСА ЕВГЕНЬЕВИЧА ПАТОНА

Борис Евгеньевич Патон — выдающийся украинский ученый в области сварки, металлургии и технологии материалов, материаловедения, видный общественный деятель и талантливый организатор науки, академик Национальной академии наук Украины, Академии наук СССР, Российской академии наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники УССР, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР и Украины, дважды Герой Социалистического Труда, Герой Украины, участник Великой Отечественной войны, ликвидатор аварии на Чернобыльской атомной электростанции.

Вместе со своим отцом — Евгением Оскаровичем Патоном — он создал всемирно известную патоновскую научную школу.

Мировой авторитет Б. Е. Патону принесли разносторонняя и чрезвычайно плодотворная научная и инженерная деятельность, стремление направить фундаментальные научные исследования на решение проблем общества.

Б. Е. Патон более 60 лет возглавляет всемирно признанный научно-технологический центр — Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — и уже более 50 лет является бессменным президентом Академии наук УССР (ныне Национальной академии наук Украины).

Борис Евгеньевич Патон родился 27 ноября 1918 г. в Киеве. Он выходец из известного дворянского рода Патонов, семейной традицией которого было служение Отечеству и военная служба. Его прадед, Петр Иванович Патон, был зачислен в армию М. И. Кутузова шестнадцатилетним юношей и участвовал в Отечественной войне 1812 г., награжден орденом, завершил службу генералом от инфантерии и сенатором Российской империи. Дед, Оскар Петрович, — военный инженер, гвардейский полковник, консул Российской империи. Отец, Евгений Оскарович Патон, — выдающийся ученый и инженер, основатель и руководитель Института электросварки, человек высокого гражданского долга, Герой Социалистического Труда, участник Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., внес большой вклад в победу над фашизмом, награжден боевыми орденами. Мать Бориса Евгеньевича, Наталья Викторовна Будде, происходила из старинного дворянского рода. Она — воспитанница Фребелевского женского педагогического института. Во времена революции, в тяжелые годы гражданской войны и становления нового государства, в годы Великой Отечественной войны она была ближайшим другом и помощником Евгения Оскаровича.

Производственная и научная деятельность Б. Е. Патона началась на Уралвагонзаводе в Нижнем Тагиле в 1942 г. С тех пор в течение одиннадцати лет Борис Евгеньевич работал вместе с отцом — это были годы его становления как ученого, исследователя, а затем и как руководителя большого научного коллектива.

Борис Евгеньевич оказался одним из наиболее одаренных учеников и достойным последователем своего отца. Он продолжил и блестяще развил дело, начатое Е. О. Патоном.

Наряду с большой и напряженной работой на оборонных заводах коллектив института продолжал вести научные исследования. В 1942 г. В. И. Дятлов обнаружил явление саморегулирования плавления электрода при электродуговой сварке под флюсом. Последующее изучение этого явления Б. Е. Патоном совместно с А. М. Макарой, П. И. Севбо, М. Н. Сидоренко послужило основой для создания простого и надежного сварочного автомата. Применение сварочных автоматов позволило многократно увеличить производительность работ при изготовлении танков.

Крупносерийное производство на Уралвагонзаводе и других заводах страны танка Т-34, который был признан специалистами лучшим средним танком Второй мировой войны, в значительной мере предопределил нашу победу над фашизмом. Благодаря надежной сварной броне

были спасены жизни многих тысяч танкистов.

За достижения в механизации и автоматизации сварочных работ при изготовлении боевой техники Б. Е. Патон в 1943 г. был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В годы войны Борис Евгеньевич выполнил ряд важных исследований статических свойств автоматов для сварки под флюсом, ставших основой его кандидатской диссертации, которую он защитил в 1945 г. В последующих трудах он показал, что оптимальные характеристики имеют автоматы с постоянной скоростью подачи проволоки, укомплектованные источниками питания с быстродействующим регулятором напряжения.

За разработку полуавтоматов для сварки под флюсом Б. Е. Патону, специалистам Института электросварки, а также Ленинградского завода «Электрик» была присуждена в 1950 г. Сталинская премия в области науки и техники. Позже этот принцип управления был положен в основу создания полуавтоматов для сварки в защитных газах.

Б. Е. Патон плодотворно работал над завершением исследований, связанных с условиями устойчивого горения дуги и ее регулирования. Он успешно защитил докторскую диссертацию и был избран в 1951 г. членом-корреспондентом Академии наук УССР.

В эти годы под руководством Б. Е. Патона выполнены исследования сварочных источников питания. Актуальность этих работ была обусловлена тем, что автоматическая сварка под флюсом была одним из самых высокопроизводительных процессов и промышленность остро нуждалась в новых разработках в этой области. В институте развернулись исследования металлургических процессов сварки под флюсом. За короткое время были созданы основы теории металлургии сварки и наплавки под флюсом, разработана гамма флюсов различного назначения. Созданы новые технологии и мощное производство плавящихся флюсов.

На основе этих разработок на Харьцызском трубном заводе налажено первое в стране производство высококачественных труб большого диаметра. Б. Е. Патон — один из его создателей. Эта работа была основополагающей в организации и развитии современного массового производства труб большого диаметра для мощных газотранспортных систем СССР на Харьцызском, Челябинском, Волжском, Выхсунском и других заводах.

В институте был создан новый процесс дуговой сварки под флюсом швов, расположенных в различных пространственных положениях. Впервые он был применен на монтаже пролетных строений киевского моста через Днепр, названного именем главного идеолога сварного мостостроения, технического руководителя проектирования и строительства этого уникального сооружения Е.О.Патона. Позднее был разработан способ дуговой сварки порошковой проволокой с принудительным формированием шва, который был широко использован при сооружении пролетных строений Московского и Южного мостов через Днепр в Киеве и через Волгу в Саратове, сооружении магистральных трубопроводов, металлургических агрегатов, химических аппаратов, корпусов судов.

После кончины Евгения Оскаровича Патона в 1953 г. директором Института электросварки им. Е. О. Патона Академии наук УССР был избран Борис Евгеньевич Патон.

Борис Евгеньевич развил плановый характер в организации научных исследований института. Он устанавливает деловые связи с руководителями предприятий, совнархозов, министерств, Госплана СССР, организует и возглавляет подготовку предложений о развитии сварки в СССР. В июне 1958 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление «О дальнейшем внедрении в производство сварочной техники», которое предусматривало развитие фундаментальных исследований сварочных процессов, разработку оборудования, материалов, технологий, создание новых НИИ и заводских лабораторий, строительство специализированных заводов по производству сварочного оборудования, материалов, сварных конструкций. В течение последующих пятилеток был принят еще ряд подобных постановлений, выполнение которых предопределило развитие сварочной науки и техники во второй половине XX в. не только в СССР, но и в ряде зарубежных стран. СССР стал ведущей страной мира в области сварки, а наши американские коллеги назвали Киев столицей сварщиков мира.



Борис Евгеньевич отличается исключительным умением работать с коллективом. Он всегда готов поддержать интересную идею, по достоинству оценить выполненную работу. Его энтузиазм, редкостная трудоспособность и внимание к каждому сотруднику создают в коллективе института здоровую творческую атмосферу. Примером тому является развитие электрошлаковой сварки. Сотрудник института Г. З. Волошкевич обнаружил, что источником нагрева свариваемого металла может служить расплавленный шлак, по которому протекает электрический ток. Этот процесс был назван электрошлаковым. Борис Евгеньевич сумел предвидеть большое будущее этого процесса. Он сосредоточил силы коллектива на решении наиболее важных проблем электрошлаковой сварки. В кратчайшие сроки был создан новый перспективный способ сварки металла большой толщины, проверенный в производственных условиях и готовый к широкому внедрению.

Применение электрошлаковой сварки внесло коренные изменения в технологию производства таких изделий, как барабаны котлов высокого давления, станины тяжелых прессов и прокатных станов, колеса и валы гидротурбин и т. д. Вместо литых и кованных крупногабаритных деталей появились значительно более экономичные — сварные и сварнокованные.

В 1957 г. Б. Е. Патон и Г. З. Волошкевич были удостоены Ленинской премии за создание процесса электрошлаковой сварки и производства на его основе крупногабаритных ответственных изделий. Это достижение было отмечено в 1958 г. Большим призом на Всемирной выставке в Брюсселе. Ряд фирм развитых стран мира приобрели лицензии на использование этого высокопроизводительного способа сварки.

В ноябре 1958 г. Б. Е. Патон был избран действительным членом Академии наук Украинской ССР.

По мнению Бориса Евгеньевича, в обозримом будущем основой сварочного производства останется дуговая сварка. Дальнейшему совершенствованию и развитию этого процесса он уделяет большое внимание и направляет коллектив института на решение актуальных проблем в этой области.

По инициативе Б. Е. Патона были исследованы процессы образования сварочных аэрозолей и создано новое поколение низкотоксичных сварочных электродов. Построены мощные цеха и заводы по производству электродов. Широкое внедрение этой разработки позволило коренным образом улучшить условия труда, во много раз снизить профессиональные заболевания сварщиков. В 1950-х годах в Институте электросварки начало развиваться новое направление работ — автоматизация и механизация процессов наплавки различных материалов на поверхности рабочих органов машин и оборудования горно-металлургического комплекса с целью повышения их износостойкости. Проведены фундаментальные исследования процессов наплавки под флюсом, в защитных газах, самозащитной порошковой проволокой, плазменной струей. Созданы уникальные наплавочное оборудование, материалы и технологии. Организовано промышленное производство наплавочных порошковых проволок. Это направление оказалось чрезвычайно перспективным, оно до сих пор развивается в институте и широко используется в различных отраслях промышленности и строительства.

В 1958 г. Б. Е. Патон выступил с инициативой создания новых способов механизированной сварки конструкций в полевых условиях, на монтаже, на стапелях, под водой и предложил использовать для этих целей порошковую проволоку. Выполнен большой комплекс исследований металлургических и технологических особенностей этого способа сварки. Создан ряд само- и газозащитных порошковых проволок различного назначения, организовано производство порошковой проволоки. Это направление сейчас является одним из ведущих в мировой сварочной науке и технике.

Исследовательские работы и создание способа полуавтоматической сварки порошковой проволокой под водой открыли новые возможности в освоении континентального шельфа, возведении и ремонте портовых сооружений, трубопроводных переходов через реки и других объектов.

Большой вклад внес Борис Евгеньевич в развитие контактной стыковой сварки. Впервые изучено влияние сопротивления короткого замыкания машин для контактной сварки на стабильность плавления и свариваемость металла. Установлена высокая эффективность обратной связи по сварочному току. Предложены оригинальные конструкции трансформаторов, разработаны теоретические основы их расчетов. Под руководством Б. Е. Патона и при его непосредственном участии впервые в мировой практике были созданы системы многофакторного управления процессом контактной сварки оплавлением. Разработано несколько поколений оригинальных машин, которые эксплуатируются в течение десятков лет во многих странах мира. Среди них — машины для сварки рельсов, уникальные комплексы внутритрубных контактных машин «Север», машины для сварки узлов ракет из алюминиевых сплавов и многие другие.

Применение электронного луча оказалось перспективным при сварке различных толсто-стенных сосудов из сталей, высокопрочных сплавов на основе алюминия и титана, а также других материалов. Решены сложные задачи обеспечения устойчивости электронного луча в атмосфере металлических паров, выявлены особенности формирования узких и глубоких швов, найдены способы управления, обеспечивающие воспроизводимость оптимальных режимов сварки. Все это позволило создать современное оборудование и технологии, получившие международное признание. Способ дуговой сварки вольфрамовым электродом по слою активированного флюса-пасты, получившей впоследствии название А-ТИГ, был разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона в середине 1960-х годов. Благодаря испарению флюса-активатора удается сжать столб дуги, в несколько раз увеличить глубину провара, повысить производительность сварки и улучшить форму швов. В последние годы Б. Е. Патоновым были инициированы исследования, направленные на создание теоретических основ процессов дуговой сварки, с использованием активирующих флюсов. Были установлены основные закономерности влияния сжатия дуги на характеристики теплового и динамического воздействия на сварочную ванну, объяснен механизм глубокого проплавления металла. Эта оригинальная технология получила развитие в СССР и СНГ. Патоновская технология ПАТИГ нашла признание также в странах дальнего зарубежья.

В конце 1980-х годов в Институте электросварки под руководством Б. Е. Патона начались исследования гибридных (лазерно-дуговых и лазерно-плазменных) процессов сварки и обработки материалов. Предложены конструкции лазерно-дуговых плазмотронов прямого и косвенного действия, создан ряд плазмотронов различного технологического назначения. Разработаны новые процессы гибридной лазерно-плазменной сварки и наплавки, в том числе процесс гибридной лазерно-микроплазменной сварки металлов малых толщин.

В 1960-е годы под руководством Б. Е. Патона начаты исследования технологий получения различных покрытий и композиционных материалов путем электронно-лучевого испарения компонентов и конденсации паров на поверхностях изделий или специальных подложек. Электронно-лучевая технология нанесения покрытий, получившая применение в ряде областей техники, позволяет многократно повышать эксплуатационный ресурс многих изделий, в частности, лопаток газовых турбин.

В 1980-е годы по инициативе Б. Е. Патона в институте проводятся исследования способов термического нанесения покрытий с использованием газокислородного пламени и дуговой плазмы; создаются аппаратура и материалы, обеспечивающие получение защитных слоев с различными свойствами.

В 1969 г. под руководством Бориса Евгеньевича была осуществлена первая космическая сварочная технология — сварка в околоземном пространстве. На пилотируемом корабле «Союз-6» космонавт В. Н. Кубасов провел эксперименты по электронно-лучевой, плазменно-дуговой сварке и сварке плавящимся электродом. Были изучены особенности формирования сварных швов в условиях невесомости, доказано, что при работе в космическом пространстве можно получать плотные и хорошо сформированные швы.



В 1979 г. успешно проверена идея нанесения различных металлических покрытий на поверхности элементов космической станции и приборов. Разработан специальный аппарат «Испаритель», создан универсальный ручной инструмент, предназначенный для сварки, пайки и нанесения покрытий. В 1984 г. космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков провели его испытания в открытом космосе. Затем последовал цикл систематических многоцелевых экспериментальных исследований по отработке конструкционных элементов и технологии сооружения крупногабаритных орбитальных конструкций и объектов. В 1986 г. в космосе построена конструкция в виде разборной фермы (эксперимент «Маяк»). В 1991 г. впервые была проведена пайка узлов ферменных конструкций, создан агрегат для раскрытия и разворачивания солнечных батарей многократного использования орбитальной станции «Мир».

Результаты многолетних исследований в области космических технологий опубликованы в монографии Б. Е. Патона и В. Ф. Лапчинского «*Welding in Space and Related Technologies*», изданной в 1997 г. в Великобритании, а также обобщены в сборнике «Космос: технологии, материаловедение, конструкции», изданном в 2000 г. под редакцией Б. Е. Патона.

Бывший Генеральный конструктор ракетно-космических комплексов НПО «Энергия» академик РАН Ю. П. Семенов, многие годы работавший вместе с С. П. Королевым, так оценивал вклад Б. Е. Патона в развитие космической программы СССР: «Б. Е. Патон входит в великую плеяду советских ученых и конструкторов, благодаря которым СССР в годы своего существования был могучей и великой державой... Б. Е. Патон — выдающийся ученый XX столетия. Его характерная особенность — уникальное качество претворять идеи в жизнь...».

В начале 1970-х годов под руководством Б. Е. Патона были созданы первые образцы систем, использующих экспериментально-статистические модели сварочных процессов. Интенсивное развитие этих работ привело к созданию автоматических систем управления сварочными процессами, установками и механизированными линиями с использованием микропроцессорной техники.

Под его руководством выполнен большой комплекс фундаментальных и прикладных исследований в области статической и циклической прочности сварных соединений, их сопротивления хрупким и усталостным разрушениям, работоспособности в условиях низких температур. Создан ряд выдающихся сооружений. К ним прежде всего относится уникальный цельносварной мост имени Е. О. Патона через Днепр. Принципы, подходы и конструктивно-технологические решения, отработанные при его проектировании и сооружении, открыли дорогу широкому использованию сварки в мостостроении. Этот мост получил признание Американского сварочного общества как выдающаяся сварная конструкция XX столетия. Опыт строительства моста им. Е. О. Патона был использован при постройке мостов через Днепр в Киеве (Южного, Московского, Гаванского, Подольско-Воскресенского, автодорожного и железнодорожного), в Днепропетровске и в Запорожье, а также моста через реку Смолрич в Каменец-Подольском.

Ярким примером нового подхода к возведению сварных конструкций высокой заводской готовности стало создание технологии разворачивания рулонированных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, благодаря которой в короткие сроки была решена проблема восстановления резервуарного парка страны, разрушенного в годы Второй мировой войны.

Совместно с Научно-исследовательским и проектным институтом Укрпроектстальконструкции разработаны проекты и технологии строительства, которые успешно реализованы при возведении уникальных телевизионных башен в Киеве, Санкт-Петербурге, Ереване, Тбилиси, Витебске, Харькове. К выдающимся сварным конструкциям следует отнести и монумент «Родина-мать» в Киеве.

Б. Е. Патон является инициатором и научным руководителем целевой научно-технической программы «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин», к выполнению которой привлечены многие академические и отраслевые институты, вузы и большое количество промышленных предприятий. Получены весомые научно-техни-

ческие и практические результаты по созданию методических основ, технологий, методов и способов оценки, а также продления ресурса конструкций. В планах академии предусматривается дальнейшее развитие этих работ.

Большое внимание уделяется развитию методов неразрушающего контроля качества и диагностики. Созданы автоматизированные установки для ультразвукового контроля сварных соединений труб большого диаметра, корпусов буровых долот, узлов энергетических установок, сварных соединений из легких сплавов и неметаллических материалов. Развиваются исследования с применением низкочастотных ультразвуковых волн и использованием бесконтактного введения акустических волн в объекты.

Впервые в Украине созданы системы непрерывного мониторинга сварных конструкций, к которым предъявляются повышенные требования безопасности эксплуатации.

Созданы методики прогнозирования механических свойств, ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов при наличии в них трещиноподобных дефектов и деградации материалов в процессе эксплуатации.

В институте на протяжении многих лет проводятся исследования по материаловедению. Разрабатываются новые конструкционные материалы, технологии их производства, исследуется связь «состав–структура–свойства» применительно к материалам различного назначения. Институт электросварки стал крупным материаловедческим центром, в котором работают и проводят самые сложные материаловедческие исследования высококвалифицированные специалисты по физике металлов, металловедению, электронной микроскопии, масс-спектропии, Оже-спектрометрии, анализу газов в металлах и сварных швах, рентген-спектральному элементному анализу и другим специальностям.

В 1954 г. Б. Е. Патон возглавил исследование по использованию электрошлакового процесса для улучшения качества металлов и сплавов. В итоге возникло принципиально новое направление в металлургии — электрошлаковый переплав, который в короткие сроки нашел широкое применение и получил мировое признание. Он используется для улучшения свойств жаропрочных, нержавеющих, инструментальных, шарикоподшипниковых и других сталей и специальных сплавов. Металл электрошлакового переплава применяется в настоящее время при производстве роторов мощных турбин, валков прокатных станков, сосудов высокого давления, запорной арматуры тепловых и атомных станций, литого штампового инструмента и других ответственных изделий.

Еще в 1959 г. были начаты работы по рафинированию металлов и сплавов с помощью электронного луча. Электронно-лучевая плавка оказалась эффективным способом повышения качества специальных сталей и сплавов на основе никеля и железа, эффективным технологическим процессом получения особо чистых ниобия, титана и многих сплавов на их основе.

В последние годы успешно развивается электронно-лучевая технология получения слитков титана. Разработаны новые высокопрочные титановые сплавы, легированные алюминием, цирконием, ниобием, железом, конструкции промышленных электронно-лучевых установок с промежуточной емкостью. Многие из них не имеют аналогов в мировой практике.

Развиты способ, оборудование и технологии плазменно-дугового переплава металлов и сплавов. Возможности применения плазменно-дуговой технологии особенно расширились после разработки плазматронов переменного тока, что позволило существенно повысить надежность конструкций плавильных агрегатов и источников питания.

В последние годы в мировой металлургической практике широко используется внепечная обработка металлургических расплавов. В Институте электросварки им. Е. О. Патона созданы новые типы порошковых проволок, которые содержат высокоактивные элементы для микролегирования, модификации и десульфурации сталей и чугуна. Разработаны технология и оборудование для изготовления порошковых проволок большого диаметра. Эти исследования получили дальнейшее развитие в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича, Донецком политехническом институте и других институтах и предприятиях. Се-



годня метод инжекционной металлургии широко применяется на металлургических заводах Украины и России. С его помощью обработаны десятки миллионов тонн стальных расплавов.

В Институте электросварки успешно развиваются исследования в области пайки металлов и сплавов. Новые материалы и технологии пайки широко используются при изготовлении решетчатых крыльев ракет и деталей авиационных двигателей, космической и буровой техники.

В послевоенные годы в СССР были открыты гигантские месторождения нефти и газа. В основном они находятся в Средней Азии, Западной Сибири, на Северном Урале и в других отдаленных районах. Для транспортировки нефти и газа в западные районы СССР и за границу предусматривалось строительство мощных магистральных газо- и нефтепроводных систем.

Под руководством Б. Е. Патона проведен комплекс работ по разработке технологий для сварки трубопроводов. Были созданы уникальные оригинальные технологии и оборудование для контактной сварки неповоротных стыков труб — комплексы «Север». С помощью контактной сварки сварено больше 70 тыс. км трубопроводов, в том числе около 6 тыс. км газопроводов большого диаметра в условиях Крайнего Севера.

Создана оригинальная технология дуговой автоматической сварки неповоротных стыков труб самозащитной порошковой проволокой с принудительным формированием шва — комплекс «Стык». С помощью этой технологии построено свыше 10 тыс. км магистральных газо- и нефтепроводов: «Дружба», «Средняя Азия—Центр», «Уренгой—Помары—Ужгород», «Хива—Бейнеу», «Шебелинка—Измаил», «Ямал—Западная граница», «Ямал—Поволжье» и др.

Профессор Н. К. Байбаков, крупнейший авторитет в нефтегазовом комплексе страны, отмечал, что «Борис Евгеньевич Патон как президент Академии наук Украины, как директор Института электросварки им. Е. О. Патона оказал огромное влияние на прогресс нефтегазового строительства, на развитие нефтяной и газовой промышленности бывшего Советского Союза...».

Борис Евгеньевич уделяет большое внимание реализации достижений современной науки и техники в практической медицине. В 1990-х годах он предложил использовать методы сварки для соединения живых тканей и организовал творческий коллектив с участием сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Института хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова НАМН Украины, Центрального госпиталя СБУ и других медицинских учреждений. Это сотрудничество привело к созданию нового способа соединения (сварки) мягких тканей, который позволяет быстро и почти бескровно разрезать и соединять биологические ткани, сохраняя их жизнеспособность. Заживление ран при этом происходит значительно быстрее, чем при использовании традиционных хирургических методов, существенно сокращается продолжительность операций, уменьшаются кровопотери, сокращается период послеоперационной реабилитации больных. Способы электросварки живых тканей применяют более чем в 50 клиниках Украины, а также в клиниках России и Беларуси. Успешно выполнено свыше 100 тысяч хирургических операций различного профиля: в общей, торакальной и детской хирургии, онкологии, урологии, гинекологии, отоларингологии, офтальмологии, лечении травм внутренних органов и других направлениях хирургии. В ИЭС им. Е. О. Патона разработано современное оборудование для сварки живых тканей и налажено его производство. Разработаны и применяются на практике более 130 хирургических методик.

В 2004 г. комплекс работ по сварке живых тканей, выполненный под руководством и при активном творческом участии Бориса Евгеньевича Патона, был удостоен Государственной премии Украины в области науки и техники.

Плодотворно сотрудничество института с Национальным институтом хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова, Донецким областным противоопухолевым центром, Национальной медицинской академией последипломного образования им. П. Л. Шупика, Национальным медицинским университетом им. А. А. Богомольца, Военно-медицинским управлением СБУ, Киевским городским центром электросварочной хирургии и новых хирургических технологий при Киевской городской клинической больнице №1, Институтом болезней глаза

и тканевой терапии им. В. П. Филатова, Национальным институтом сердечно-сосудистой хирургии им. Н. М. Амосова, Институтом нейрохирургии им. акад. А. П. Ромаданова, киевскими городскими клиническими больницами № 1, 12, 17, 18 и многими другими медицинскими учреждениями Украины.

Б. Е. Патон уделяет большое внимание международной деятельности института и его ученых. Институт электросварки является постоянным членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации. Под руководством Бориса Евгеньевича издаются и переводятся на английский язык журналы «Автоматическая сварка», «Современная электрометаллургия», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». Это позволяет донести до мировой научно-технической общественности информацию о результатах исследований и новых разработках института.

В институте выросли десятки и сотни талантливых ученых и инженеров. Среди патоновцев много академиков и членов-корреспондентов НАН Украины. Сотрудники института защитили 138 докторских и 716 кандидатских диссертаций. Много работ, о которых говорилось выше, — труд большого и дружного коллектива, сплочению которого в большой мере способствуют личные качества его руководителя — Бориса Евгеньевича Патона.

Одним из основных принципов, заложенных Е. О. Патоном при создании института и развитых Б. Е. Патоном, является проведение целенаправленных фундаментальных исследований и тесная связь науки с производством. Этот принцип настойчиво воплощается в жизнь на протяжении 80-летней истории института.

Научные отделы института, конструкторский отдел, экспериментальные мастерские, опытное конструкторско-технологическое бюро, инженерные центры, экспериментальные производства, опытные заводы создавались на протяжении всей истории института — это неотъемлемые звенья системы организации исследований и внедрения их результатов в производство. Реализация этой системы позволила создать уникальные конструкции, оборудование, материалы, технологии, внедрение которых оказало большое влияние на развитие многих отраслей промышленности: машиностроение, судостроение, ракетно-космический комплекс, авиастроение, энергетику, горнопромышленный комплекс, металлургию и химическое производство, систем трубопроводного транспорта, строительную индустрию и др.

Самоотверженный труд коллектива института высоко оценен государством. Институт награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, многие сотрудники института награждены орденами и медалями СССР и Украины.

Девять работ, в выполнении которых участвовали сотрудники института, удостоены Ленинских премий в области науки и техники, 24 работы — Государственных премий СССР, 34 работы — Государственных премий УССР и Украины.

Многолетний самоотверженный труд коллектива института под руководством Бориса Евгеньевича Патона получил мировое признание.

В 1962 г. Б. Е. Патон был избран действительным членом (академиком) Академии наук СССР. В этом же году ученые Академии наук УССР избрали Б. Е. Патона президентом Академии наук УССР (ныне Национальной академии наук Украины). Глубокое понимание роли науки в обществе, ее целей и задач, высокий международный авторитет ученого, преданность науке, неиссякаемая энергия и высокие моральные качества, общественно-политическая деятельность, опыт руководства большим научным коллективом стали решающими аргументами при избрании Бориса Евгеньевича на пост президента Академии наук Украины. В соответствии с уставом академии выборы ее президента проводятся каждые пять лет и Борис Евгеньевич девять раз переизбирался на эту должность. На этом ответственном посту еще шире раскрылся его талант организатора науки. Под его руководством разработана новая структура академии, новый устав, направленный на наиболее рациональное использование научных сил и средств, концентрацию их на решении важнейших фундаментальных проблем науки, которые имеют решающее значение для экономики страны.



По инициативе Б. Е. Патона и при его активной поддержке в системе Академии наук УССР созданы десятки новых институтов и организаций, расширяющих и углубляющих исследования в наиболее важных научных направлениях. Так, 1965 г. по инициативе Б. Е. Патона в Донецке создан академический научный центр и открыт университет, позднее другие научные центры АН УССР — Западный (Львов), Южный (Одесса), Северо-Восточный (Харьков), Приднепровский (Днепропетровск) и Крымский (Симферополь), которые выполняют функции региональных межотраслевых органов координации научной деятельности. Он постоянно добивается четкого определения научного профиля каждого института, заботится о том, чтобы каждый из них стал ведущим в своем направлении в республике, государстве, в мире.

Академия наук является главным научным центром страны, где широким фронтом проводятся исследования по актуальным проблемам естественных, технических, социогуманитарных наук. Учреждения академии занимают достойные позиции в отдельных разделах математики, теоретической физики, физики твердого тела и низких температур, в радиофизике и радиоастрономии, материаловедении, кибернетике и вычислительной технике, нейрофизиологии, молекулярной биологии, микробиологии и вирусологии, генной инженерии и в ряде других областей знаний.

В академии создается опытно-производственная база, получают развитие новые формы связи науки с производством.

В 1963 г. Б. Е. Патон избирается членом Президиума АН СССР. Работа на этом посту позволила ему ознакомиться с работой институтов АН СССР, изучить опыт работы Президиума академии и ее отделений.

Тесное сотрудничество между АН УССР, АН СССР, ГКНТ, РАН, академиями наук союзных республик способствовало развитию в УССР многих новых научных направлений, созданию новых институтов, инженерных центров, укреплению международного авторитета академии.

Борис Евгеньевич инициировал создание крупных комплексных научно-технических программ по отдельным отраслям промышленности, транспорта, связи и сельского хозяйства. Выполняя эти программы, ученые академии внесли весомый вклад непосредственно в решение актуальных проблем развития экономики страны. Эта форма организации научной деятельности получила всеобщее признание.

Б. Е. Патон организовал Научный совет при Президиуме АН СССР по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов», который объединил ученых академических учреждений со специалистами многих других ведомств и способствовал развитию науки о материалах в АН СССР, РАН и НАН Украины. Многие ученые-материаловеды и металлурги, активно работавшие в этом совете, по рекомендации Бориса Евгеньевича были избраны в Академию наук СССР и Российскую академию наук и внесли большой вклад в развитие науки о материалах.

Борису Евгеньевичу присуще глубокое понимание роли и места науки в решении гуманитарных проблем развития общества. Уделяя огромное внимание разработке и внедрению современных технологий в производство, он одновременно добивается осуществления обоснованных научных оценок их влияния на окружающую среду и человека. Под его руководством большими коллективами ученых академии были выполнены прогнозные оценки негативных экологических и социально-экономических последствий крупномасштабной осушительной и оросительной мелиорации в УССР, интенсивной химизации сельского хозяйства, переброски части стока рек Дунай и Днепр. Принципиальную позицию Б. Е. Патон занял и в вопросе строительства атомной электростанции в районе Чернобыля. К сожалению, известные всему миру события 1986 года на ЧАЭС полностью подтвердили его предостережения.

Выдающиеся способности Бориса Евгеньевича Патона как лидера, ученого и организатора раскрылись в памятные дни Чернобыльской трагедии. Коллективы многих институтов Академии наук УССР, ее Президиума уже с первых дней включились в работу по ликвидации последствий катастрофы. К выполнению этой работы были привлечены сотни ученых,

специалистов Академии наук, министерств, ведомств, предприятий республики. Б. Е. Патон руководил подготовкой предложений для директивных органов УССР и Правительственной комиссии СССР. Позже, в сентябре 1997 г., Б. Е. Патон возглавил вновь созданный при Президенте Украины Консультативный совет независимых экспертов по комплексному разрешению проблем Чернобыльской атомной станции.

В 2004–2005 гг. Издательским домом «Академперіодика» НАН Украины был издан двухтомник «Чернобыль 1986–1987 гг.». Приведенные в этом капитальном труде документы объективно и достаточно полно отражают роль Академии наук УССР и самоотверженный труд коллективов институтов академии под руководством ее президента.

После развала Советского Союза и образования независимой Украины в условиях длительного экономического и финансового кризиса, который затронул академию, президент НАН Украины сумел сохранить академию, ее основные научные школы. Удалось на законодательном уровне закрепить статус академии как высшей научной государственной организации, сохранить принципы ее академического самоуправления, осуществить перестройку ее структуры в соответствии с новыми условиями, направить фундаментальные и прикладные исследования на решение неотложных задач строительства государства.

Определены новые приоритеты в области естественных, технических и социогуманитарных наук. Создан ряд новых институтов и центров социогуманитарного профиля.

По ряду направлений математики, информатики, механики, физики и астрономии, материаловедения, химии, молекулярной и клеточной биологии, физиологии удалось сохранить мировой уровень исследований. Растет вклад ученых академии в развитие фундаментальных и прикладных исследований в Украине. Созданы новые технологии, материалы, вычислительная техника, найдены новые месторождения полезных ископаемых и др.

Созданы и успешно работают институты экономики и прогнозирования, экономико-правовых исследований, проблем рынка и экономико-экологических исследований, региональных исследований, демографии и социальных исследований, украиноведения, востоковедения, политических и этнонациональных исследований, социологии, украинской археографии и источниковедения, украинского языка и ряд других отделений, институтов и центров.

Институты академии принимают активное участие в разработке инновационных программ развития экономики Украины, в исследовании ее истории, культуры, языка.

Совершенствуется организация фундаментальных и прикладных исследований, определены приоритеты в развитии отдельных научных направлений и междисциплинарных исследований. Среди них программа «Наносистемы, наноматериалы и технологии», «Сенсорные системы», «Интеллектуальные информационные технологии», «Водородная энергетика», «Энергосбережение», «Проблемы демографии и развития человечества» и др.

Много усилий Б. Е. Патон прилагает для сохранения и развития международного научного сотрудничества, внешнеэкономических связей с деловыми партнерами зарубежных стран.

Ученые Украины участвуют в выполнении многих международных программ. Проводятся совместные конкурсы научных проектов с Украинским научно-технологическим центром, Российским фондом фундаментальных исследований, Российским гуманитарным научным фондом, Сибирским отделением Российской академии наук.

Б. Е. Патон — один из инициаторов создания и сохранения общего научного пространства в рамках СНГ. В 1993 г. была создана Международная ассоциация академий наук (МААН), объединившая национальные академии 15-ти стран Европы и Азии. Борис Евгеньевич уже 20 лет — бессменный президент этой ассоциации. Под его руководством работает Научный совет МААН по новым материалам.

Академик Б. Е. Патон — почетный президент Международной инженерной академии, член Академии Европы, почетный член Римского клуба, Международной академии технологических наук, почетный член Международной академии наук, образования и искусств, Международной астронавтической академии, иностранный член академий и научно-технических обществ



многих стран. Десятки отечественных и зарубежных университетов избрали академика Б. Е. Патона почетным доктором, в их числе — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Санкт-Петербургский государственный технический университет, НТУУ «Киевский политехнический институт», Московский государственный физико-технический университет и др.

Б. Е. Патон вел и продолжает вести большую общественную работу. Его многократно избирали депутатом Верховного Совета СССР и УССР, заместителем Председателя Совета Союза Верховного Совета СССР, членом Президиума Верховного Совета УССР, членом Центрального Комитета КПСС и Коммунистической партии УССР, он был руководителем и членом различных высоких комитетов и комиссий. Перечень его должностей поражает. Он успешно работает на этих должностях благодаря глубокому чувству личной ответственности перед государством, народом, собственной совестью.

Кроме того, его отличают выдающаяся организованность, деловитость, редкая способность безошибочно схватывать главное, мгновенно принимать правильное решение.

Бывший президент Российской академии наук академик Ю. С. Осипов, характеризуя Бориса Евгеньевича, сказал: «Жизнь Б. Е. Патона — в науке, в сфере организаций научных исследований и практической реализации научных достижений, его общественная и государственная деятельность — воистину великий подвиг во имя расцвета науки, во имя будущего».

За огромные заслуги перед наукой и государством Б. Е. Патон удостоен высоких званий дважды Героя Социалистического Труда, Героя Украины. Он — кавалер четырех орденов Ленина, орденов Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, Свободы, князя Ярослава Мудрого I, IV и V степени, орденов «За заслуги перед отечеством» I и II степени и «Почета» (РФ), ордена «Дружбы» (КНР), Франциска Скорины и Дружбы народов (Республика Беларусь), «Ордена Чести» (Грузия), «Достык» (Республика Казахстан), «Шикрет» (почета) (Республика Азербайджан) и многих других наград стран СНГ. Б. Е. Патон — лауреат Ленинской и Государственных премий СССР и Украины в области науки и техники. Ему присуждена Международная премия «Глобальная энергия». Он награжден золотыми медалями им. М. В. Ломоносова, С. И. Вавилова, С. П. Королева, серебряной медалью им. А. Эйнштейна ЮНЕСКО и многими другими наградами и знаками отличия.

Борис Евгеньевич безгранично предан Науке, Институту, Академии, Отечеству.

Сегодня нельзя представить Институт электросварки и Национальную академию наук Украины без Б. Е. Патона. Его житейская мудрость, огромный опыт, международный авторитет в науке и обществе позволили сохранить научный потенциал Украины.

Борис Евгеньевич Патон — лидер, боец, творческая личность, глубоко порядочный и добрый человек, с фантастической энергией и трудоспособностью, огромным опытом, глубокими знаниями во многих областях, способностью постоянно учиться. У него широкая натура, острый аналитический ум, он демократичен, доброжелателен, открыт для общения, доступен, всегда готов поддержать человека в беде, помочь ему.

Символично, что Борис Евгеньевич родился в день основания Национальной академии наук Украины в 1918 г. В 1998 г. при праздновании восьмидесятилетия академии и ее президента огромный зал дворца «Украина» овацией встретил сообщение о присвоении Б. Е. Патону, первому в государстве, звания Героя Украины.

Таков наш дорогой Борис Евгеньевич!

Пожелаем ему от всей души новых успехов, доброго здоровья и большого счастья.

Академик НАН Украины И. К. ПОХОДНЯ



ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Б. Е. ПАТОН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. Украина. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлен ряд разработок ИЭС им. Е. О. Патона для энергетики, в частности, технологии сварки крупногабаритных роторов турбин, электронно-лучевой сварки заготовок большой толщины из высокопрочных сталей, технологии сварки под флюсом и контактной сварки пульсирующим оплавлением труб для магистральных газопроводов большого диаметра, технология и оборудование для создания энергосберегающих теплообменных устройств. Отмечены разработки, направленные на повышение коррозионной стойкости твэлов и безопасной эксплуатации АЭС благодаря применению жаропрочной износостойкой механизированной наплавки коррозионностойкими сплавами трубопроводной арматуры. Представлены практические рекомендации по ремонту магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. Выполнены исследования, показавшие возможность применения акустической эмиссии для мониторинга сварных конструкций, работающих при высоких температурах. Разработан способ для предотвращения катастрофического вытекания нефти из разрушенных труб скважин нефтедобывающих платформ. Рис. 20.

Ключевые слова: сварка под флюсом, контактная сварка пульсирующим оплавлением, электронно-лучевая сварка, защитные покрытия твэлов, оребренные плоскоовальные трубы, ультразвуковой контроль сварных швов, акустическая эмиссия, износостойкая наплавка, техническая диагностика

Развитие энергетики во многом определяет масштабы и темпы роста мировой экономики. По самым осторожным оценкам, в XXI в. общее энергопотребление на планете удвоится. Наиболее интенсивно будет расти производство электроэнергии (рис. 1), которое к 2030 г. достигнет 40 % мирового спроса на энергоресурсы. Уголь, нефть и газ останутся главным источником энергии в ближайшие десятилетия. Однако их месторождения исчерпываются, а разведка новых требует значительных инвестиций. При этом экологические последствия от использования ископаемого топлива становятся все больше угрожающими: атмосферные выбросы ведут не только к загрязнению окружающей среды и ухудшению здоровья населения, но и к глобальным изменениям климата.

Сегодня усилия мирового сообщества направлены на:

- повышение эффективности энергопотребления;
- развитие экономически обоснованных источников энергии;

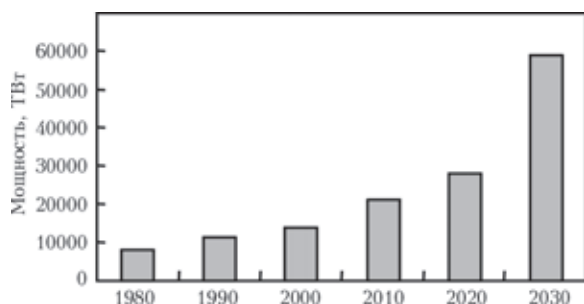


Рис. 1. Рост мирового производства электроэнергии

© Б. Е. Патон, 2013

• снижение вредных выбросов с помощью применения новых технологий и более экологичных видов топлива, таких как природный газ, атомная энергия и возобновляемые источники. Решение этих сложных задач, направленных на создание энергетики будущего, более чем когда-либо зависит от результатов научных исследований, их быстрого и эффективного использования.

Весомый вклад в создание энергоэффективных, экологически чистых технологий и продуктов вносят ученые и специалисты-сварщики. Современное сварочное производство является одной из наукоемких, межотраслевых составляющих мировой экономики. В развитых странах с применением сварочных технологий производится более половины национального валового продукта. Рынок сварочной техники, несмотря на



Рис. 2. Рынок сварочной техники по состоянию на 2011-2012 гг.



кратковременные спады в период мировых кризисов, продолжает уверенно расти. В 2012 г. объем мирового рынка сварочной техники составил 17 млрд дол. США и, по оценке экспертов, в ближайшие пять лет возрастет до 22 млрд дол. США. Наибольшую его долю составляет рынок сварочной техники в энергетике (рис. 2). Прогнозируется, что в ближайшие три года он увеличится на 30 %.

Сегодня имеется мощный арсенал технологий, которые позволяют получать неразъемные соединения различных конструкционных и функциональных материалов. Сварочные технологии дают возможность создавать уникальные конструкции энергетического оборудования — турбин, энергетических котлов, корпусов реакторов АЭС и др.

Институт электросварки им. Е.О. Патона выполняет большой комплекс работ в области сварки и родственных технологий для энергетической отрасли. Применительно к турбостроению разработана и внедрена в производство технология и специализированное оборудование для сборки и автоматической сварки под флюсом в узкую разделку крупногабаритных роторов мощных паровых турбин для тепловых и атомных электростанций на одном сборочно-сварочном стенде. При этом роторы цилиндров низкого и среднего давления изготавливаются из отдельных дисков, что исключает достаточно сложную проблему получения крупногабаритных тяжелых цельнокованых заготовок для роторов массой до 200 т и длиной более 10 м. Установка сборки и сварки укомплектована четырьмя аппаратами для автоматической сварки под флюсом с программным управлением процесса раскладки валиков в узкой разделке и системой слежения электрода за дном и стенками разделки кромок (рис. 3).

Для производства изделий энергетического машиностроения необходимо сваривать заготовки из высокопрочной стали большой толщины. Весьма эффективна для этого электронно-лучевая сварка (ЭЛС), которая обеспечивает высокую производительность сварочного процесса, высокое качество

соединений и минимальные деформации. В ИЭС им. Е. О. Патона выполнены исследования и разработки по созданию технологий и оборудования для ЭЛС конструкционных сталей толщиной до 210 мм (рис. 4). Стабильное формирование сварных соединений и предотвращение дефектов в металле глубоких швов достигается с помощью развертки луча с его параллельным переносом вдоль и поперек направления сварки.

Задача получения сварных соединений высокого качества значительно усложняется на участке замыкания кольцевого шва, где возникают корневые дефекты. Она решена с помощью применения развертки луча, фокусировки пучка в плоскости на 10 мм выше середины шва и наклона плоскости стыка и сварочного пучка на угол 10° относи-

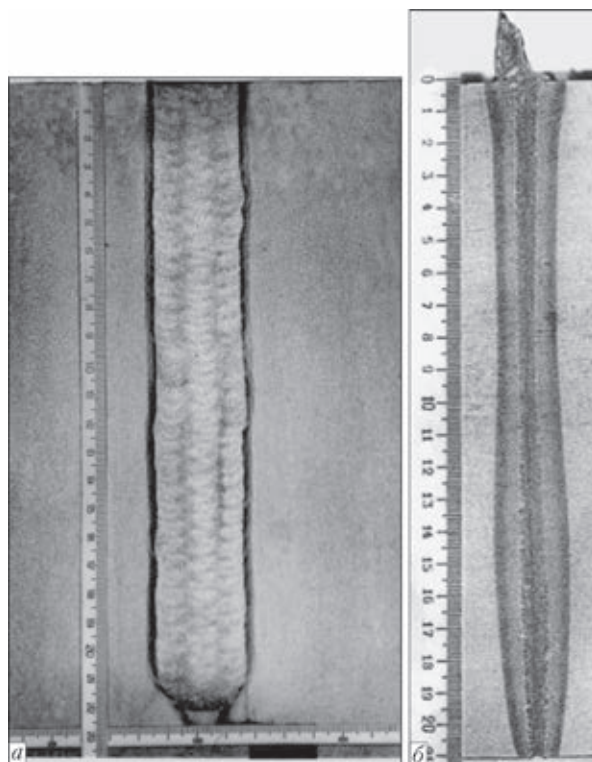


Рис. 4. Макрошлифы поперечного сечения кольцевых швов низколегированной стали большой толщины, выполненных многослойной дуговой сваркой под флюсом (а) и однопроводной ЭЛС (б)

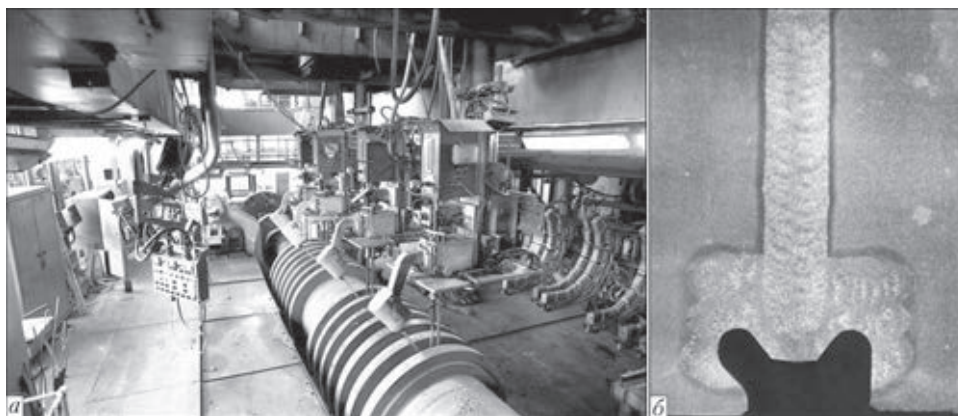


Рис. 3. Автоматическая сварка под флюсом ротора паровой турбины мощностью 1000 МВт для АЭС (а) и макрошлиф металла сварного шва ротора паровой турбины (б)

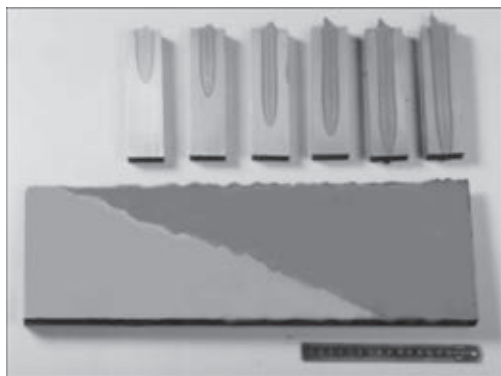


Рис. 5. Макрошлифы участка замыкания кольцевого шва при ЭЛС стали 15X2NMФА толщиной 150 мм

тельно горизонта. На рис. 5 хорошо видно качественное формирование закругления в корне шва и полное отсутствие дефектов.

Созданы новое поколение крупногабаритных вакуумных камер, технологии их сборки и ЭЛС (рис. 6). Основной отличительной чертой этих камер является использование двух вакуумно-плотных и прочных оболочек, соединенных между собой ребрами жесткости. Высокая геометрическая точность стенок камеры обеспечивает новые возможности построения высокоточных манипуляторов пушки и изделия. Для управления манипуляторами и всем процессом сварки разработано программное обеспечение с удобным графическим интерфейсом оператора.



Рис. 6. Оборудование ЭЛС, изготавливаемое в ИЭС им. Е. О. Патона

Разработанная технология ЭЛС высокопрочных сталей большой толщины имеет перспективы применения при изготовлении корпусов реакторов АЭС. Как показывает практика, продолжительность дуговой сварки кольцевых швов в корпусе реактора составляет сотни часов, тогда как ЭЛС такого шва — нескольких часов. Принципиальная схема предлагаемой промышленной установки для сварки кольцевых швов корпуса реактора ВВР-1000 показана на рис. 7.

Развитие атомной энергетики неразрывно связано с повышением безопасности атомных реакторов и снижением затрат на их эксплуатацию. Причиной аварийной ситуации на атомной станции Фукусима-1 стало химическое взаимодействие циркониевых оболочек твэлов с паром.

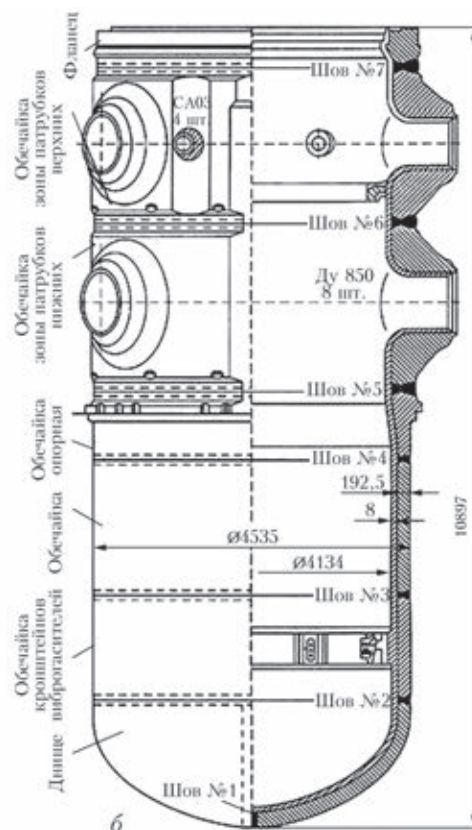
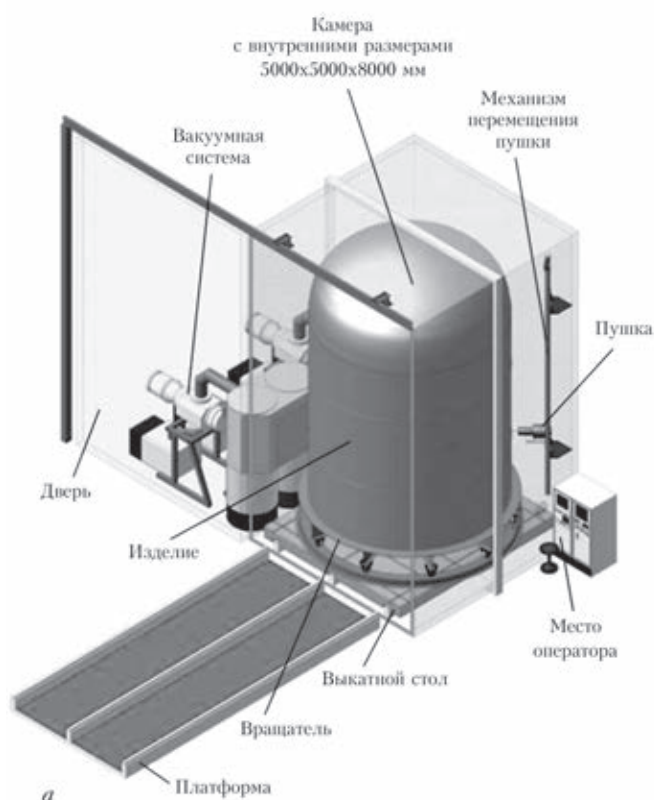


Рис. 7. Принципиальная схема промышленной установки для ЭЛС кольцевых швов корпуса реактора ВВР-1000 (а) и схема корпуса реактора (б)



Пароциркониевая реакция привела к генерации водорода, вследствие чего и произошел взрыв. Одним из путей снижения затрат на эксплуатацию АЭС является увеличение цикла перезагрузки ядерного топлива, что также требует повышения коррозионной стойкости циркониевых сплавов в воде в штатном режиме работы реактора. Поэтому разработка методов и технологии изготовления твэлов, обеспечивающих повышение коррозионной стойкости циркониевых оболочек в воде и паре в штатном и аварийном режимах работы реактора, является актуальной.

Одним из путей решения этой задачи является создание на поверхности циркониевой оболочки твэлов защитных покрытий, которые должны обеспечить ей более длительный срок эксплуатации в штатном режиме, а в случае аварийной ситуации существенно снизить вероятность возникновения пароциркониевой реакции.

Для решения поставленной задачи были проведены исследования, направленные на разработку метода осаждения толстых покрытий на основе карбида кремния на циркониевые оболочки твэлов. Предлагаемый метод основан на использовании разработанного в институте высокоскоростного электронно-лучевого осаждения толстых покрытий неорганических материалов. Использование мощных электронно-лучевых пушек в стационарном режиме позволяет испарять в вакууме с большой скоростью металлические и керамические вещества и формировать на их основе покрытия с заданной структурой. Этот метод может обеспечить осаждение покрытий на основе карбида кремния со скоростями 5...10 мкм/мин и получить покрытия на длинномерных оболочках твэлов со скоростью порядка 1 м/мин. Отличительной особенностью разработанного метода является возможность совмещения процесса осаждения покрытий с другими процессами, которые необходимы для обеспечения высокой прочности сцепления подложки и покрытия, модифицирования структуры покрытия и т. п.

Общий вид фрагментов циркониевых оболочек твэлов без покрытия и с покрытием представлен на рис. 8. Разработанная методика осаждения обеспечивает получение однородного по поверхности

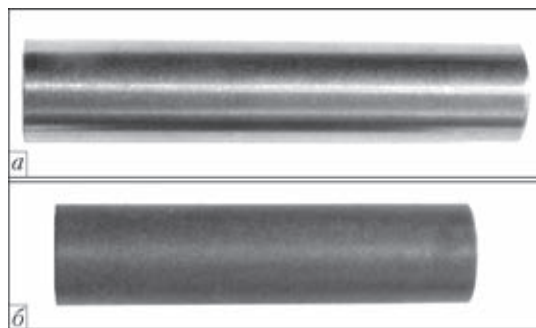


Рис. 8. Общий вид фрагментов циркониевых оболочек твэлов без покрытия (а) и с покрытием (б) на основе карбида кремния

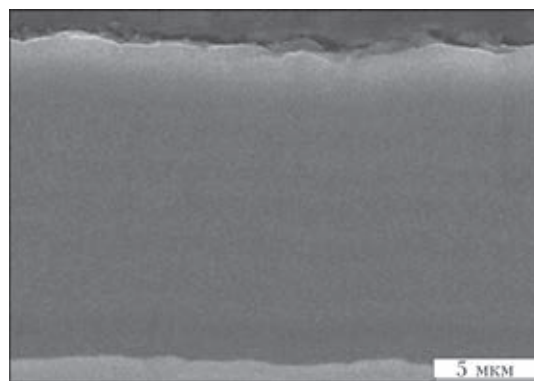


Рис. 9. Микроструктура покрытий на основе карбида кремния

бездефектного покрытия с малой шероховатостью и высокой адгезионной прочностью, с высокой твердостью, без дефектов как в самом покрытии, так и на границе раздела покрытие–подложка (рис. 9).

ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ВНИИНМ им. А. А. Бочвара проведены исследования коррозионной стойкости покрытий при высоких температурах (аварийный режим работы твэлов), которые показали их стойкость к окислению. Как видно из рис. 10, в процессе испытания покрытие сохраняет целостность и хорошее сцепление с подложкой, тогда как образцы без покрытия при тех же условиях испытывают интенсивную коррозию в непокрытой области циркониевого образца.

ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Киевским политехническим институтом разработал технологию и оборудование для поперечного оребрения плоскоовальных труб способом контактной сварки и создания на их основе широкой номенклатуры энергосберегающих теплообменных устройств (рис. 11). Поперечное оребрение плоскоовальных труб способом контактной сварки имеет ряд неоспоримых преимуществ: высокую технологичность без применения расходных материалов; практически идеальный термический контакт между ребрами и трубой; высокую интенсивность

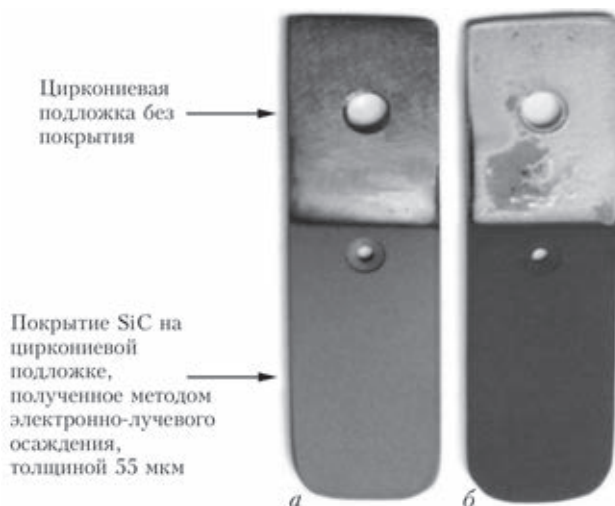


Рис. 10. Общий вид циркониевых образцов до (а) и после (б) испытания на коррозионную стойкость покрытий при высокой температуре

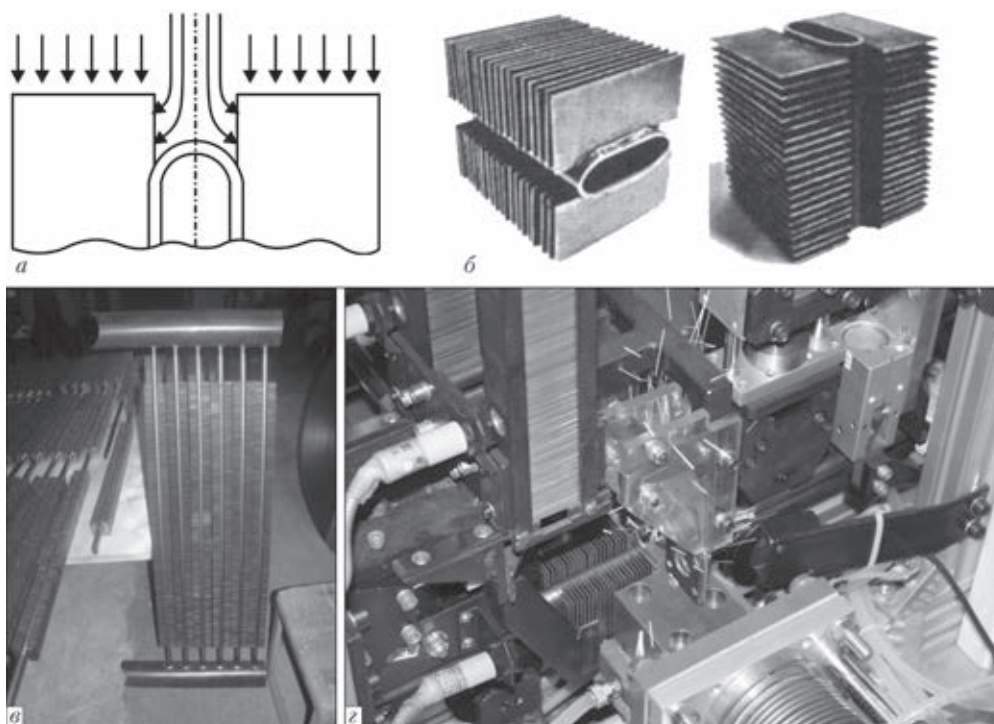


Рис. 11. Плоскоовальные трубы с поперечным оребрением для энергосберегающих теплообменных устройств: *а* — схема потока теплоносителя; *б* — элементы труб; *в* — секция экономайзера-утилизатора мощностью 0,2 МВт; *г* — автоматизированная установка для контактной сварки плоскоовальных труб

конвективного теплообмена; низкое аэродинамическое сопротивление. При модернизации котлов средней и малой мощности весьма эффективным способом экономии топлива является применение экономайзеров с плоскоовальными оребренными трубами. При этом достигается большой экономический эффект.

В связи с возрастающей потребностью мировой экономики в энергоресурсах задача обеспечения надежной транспортировки углеводородного топлива из районов его добычи к основным потребителям является чрезвычайно актуальной. Несмотря на развитие альтернативных способов (перевозка сжиженного газа танкерами или компримированного газа в специальных сосудах), трубопроводный транспорт по-прежнему остается преимущественным средством доставки природного газа к потребителям.

Исследована новая многодуговая технология сварки под флюсом с комбинированным питанием дуг для улучшения качественных показателей сварных соединений за счет оптимизации фазировки дуг, режимов их горения и установочных параметров электродов. Для заводского изготовления труб разработаны 4- и 5-дуговые процессы сварки с повышенным до 1900 А током передней дуги, что позволило уменьшить размеры разделки кромок, повысить скорость сварки и снизить расходы сварочных материалов (рис. 12). Дополнительным преимуществом в этом случае является благоприятная конфигурация линии сплавления, что улучшает результаты испытания на ударный изгиб металла сварных соединений, особенно тол-

стостенных труб. Технология рекомендована для сварки труб с толщиной стенки от 25 до 50 мм.

При изготовлении труб с небольшой и средней толщиной стенки можно применять многодуговую сварку с электродом меньшего диаметра (3,2 мм) на первой дуге, отличающуюся глубоким проваром, достаточно благоприятным формированием швов и некоторым снижением погонной энергии.

Для обеспечения высоких показателей вязкости в институте разработана система управления химическим составом и структурой металла шва труб. Она основана на использовании многодуговой сварки под флюсом, при которой на отдельных дугах устанавливаются сварочные проволоки разного химического состава, что позволяет дозированно с большой точностью регулировать содержание легирующих элементов в металле шва в зависимости от состава применяемой трубной стали, режимов сварки и других факторов. При изготовлении труб наибольшее распространение получило сочетание агломерированного алюминатного флюса небольшой основности и сварочных проволок, содержащих марганец, молибден, или марганец, никель, молибден, или марганец, молибден, титан, бор. Требуемый химический состав шва достигается путем изменения количества дуг со сварочной проволокой той или иной системы легирования и различной скорости ее подачи на отдельных дугах. Управление химическим составом металла шва труб обеспечивает получение наиболее благоприятной его структуры. На рис. 13, *в* показана микроструктура металла

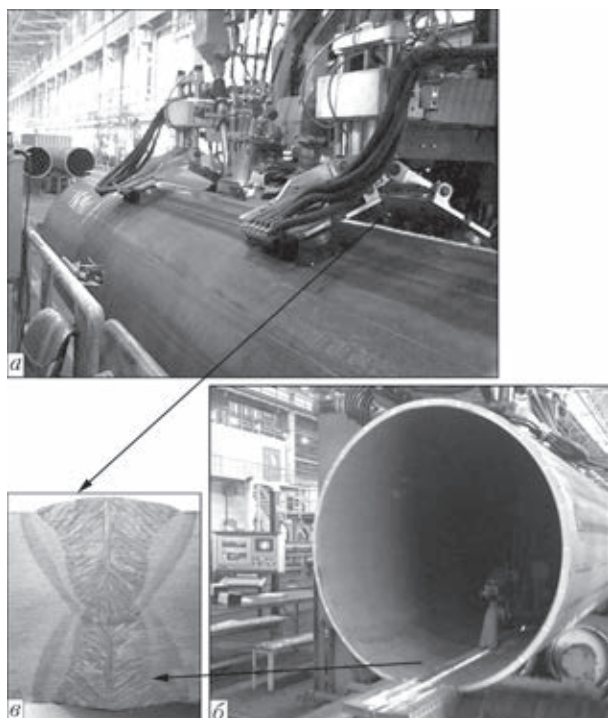


Рис. 12. Многодуговая сварка под флюсом трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 40 мм: а — 5-дуговая сварка наружного шва, скорость 110 м/ч; б — 4-дуговая сварка внутреннего шва, скорость 100 м/ч; в — макрошлиф сварного соединения трубы

продольного шва газо- и нефтепроводной трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 25 мм из стали класса прочности К60 (категории Х70), состоящей из 85...90 % игольчатого феррита и менее 1 % межзеренного полигонального феррита. Такая структура гарантирует высокие вязкие характеристики металла шва, например, ударную вязкость в пределах 180...200 Дж/см² на образцах с острым надрезом при температуре -30 °С.

Разработанное сочетание сварочных материалов и новые процессы многодуговой сварки под флюсом, в том числе с повышенным током передней дуги, включая рекомендации по оптимизации

режимов и установочных параметров, реализованы на различных трубосварочных заводах Украины и Российской Федерации при изготовлении труб с толщиной стенки от 16 до 40 мм из стали класса прочности К60-К65 (категории Х70-Х80) для магистральных трубопроводов.

При строительстве магистральных трубопроводов ИЭС им. Е. О. Патона совместно с организациями ОАО «Газпром» накопил большой опыт использования контактной стыковой сварки неповоротных стыков трубопроводов в полевых условиях в различных климатических зонах, в частности в районах Крайнего Севера. Комплексами «Север» (рис. 14) и другими сварочными машинами контактным способом было сварено более 70 тыс. км различных трубопроводов, в том числе больших диаметров, которые успешно эксплуатируются.

В настоящее время институт разрабатывает новый процесс контактной сварки труб, получивший название «пульсирующее оплавление» (КСО). Новизна заключается в том, что благодаря применению быстродействующих систем управления сварочной машиной и новых алгоритмов управления возможна значительная интенсификация нагрева при одинаковой установленной мощности источника электрического питания.

Процесс пульсирующего оплавления имеет ряд преимуществ по сравнению с непрерывным оплавлением. Так, режим сварки с использованием пульсирующего оплавления уменьшает время сварки кольцевого стыка по сравнению с непрерывным с 3,5...4 мин до 2 мин, а припуск на оплавление сокращается почти в 2 раза. Последнее весьма существенно, так как при этом снижаются соответственно потери металла. Благодаря использованию систем автоматического регулирования скорости оплавления удалось получить качественную сварку при меньших удельных мощностях, чем при сварке труб комплекса-

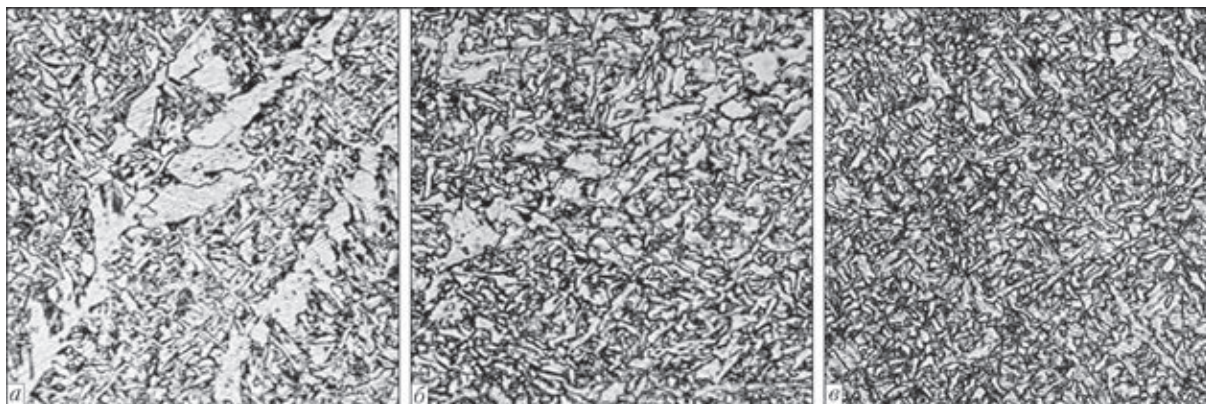


Рис. 13. Микроструктура (×500) металла швов труб из стали класса прочности К60, выполненных с применением различных сварочных материалов: а — Mn-Mo система легирования, кислый плавненный флюс, полигонального феррита 20...25 %; игольчатого 35...45 %; $KV_{-30} = 27...30$ Дж/см²; б — Mn-Ni-Mo система легирования, алюминатный агломерированный флюс небольшой основности, полигонального феррита 3...5 %, игольчатого 75...80 %; $KV_{-30} = 80...100$ Дж/см²; в — Mn-Mo-Ti-B система легирования, алюминатный агломерированный флюс небольшой основности, полигонального феррита менее 1 %, игольчатого 85...90 %; $KV_{-30} = 180...200$ Дж/см²

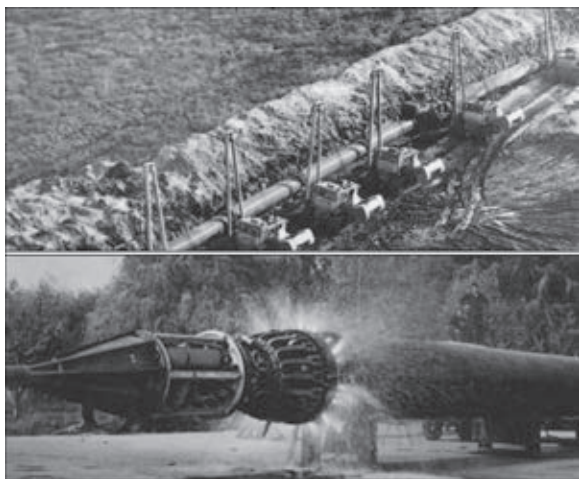


Рис. 14. Комплекс «Север» для сварки труб магистральных нефте- и газопроводов

ми «Север». Поэтому при сварке труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27 мм применим источник с установленной пиковой мощностью до 1300 кВ/А.

В соответствии с требованиями международных стандартов API1104 и DNV-OS-F101 были определены механические свойства сварных соединений в состоянии после сварки и после термообработки. Так, в состоянии после сварки предъявляемым требованиям удовлетворяют показатели прочности ($\sigma_b = 516,0 \dots 523,6$ МПа) и угол загиба (180° при отсутствии трещин), а ударная вязкость ниже нормативных требований ($KCV_{+20} = 13,3 \dots 17,1$; $KCV_{-20} = 6,1 \dots 9,7$ Дж/см²) из-за наличия в зоне термического влияния крупнозернистой структуры с повышенным содержанием феррита.

Для увеличения ударной вязкости разработана технология термообработки соединений, выполненных КСО, с использованием локального индукционного нагрева после сварки. Механические свойства сварных соединений в состоянии после термообработки следующие: $\sigma_b = 550,6 \dots 561,4$ МПа, угол загиба 180° , $KCV_{+20} = 147,9 \dots 219,5$, $KCV_{-20} = 86,8 \dots 171$, Дж/см². Установлено, что наиболее высокие показатели ударной вязкости сварных соединений, выполненных КСО на стали класса прочности К56, могут быть получены при температурах нормализации $950 \dots 1000^\circ\text{C}$ и длительности нагрева в пределах $2,5 \dots 3,0$ мин (рис. 15), а охлаждение после нагрева должно проводиться со скоростью не меньше $8^\circ\text{C}/\text{с}$.

При испытаниях контрольной партии соединений, сваренных на оптимальном режиме с последующей термической обработкой, качество соединений полностью удовлетворяет требованиям стандартов.

Одновременно с разработкой технологии сварки были определены алгоритмы выявления дефектов соединений, выполненных КСО с исполь-

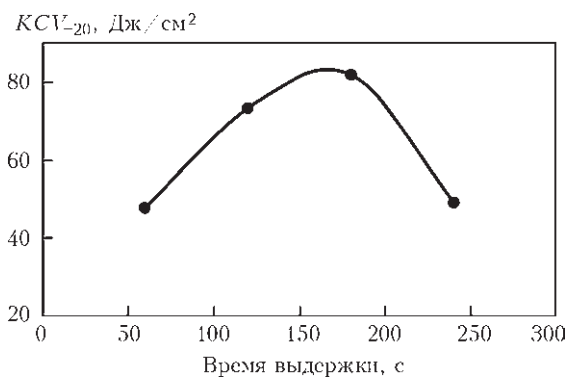


Рис. 15. Зависимость средних значений ударной вязкости от времени выдержки при температуре термической обработки 1000°C

зованием средств современной ультразвуковой дефектоскопии. Разработаны также системы и алгоритмы операционного компьютеризированного контроля параметров сварки, позволяющего оценивать качество соединений сразу же после окончания сварки. При этом автоматическая система дает в печатном виде документ на каждый стык, в котором указываются реальные значения всех параметров процесса сварки, их отклонения от заданных программой значений и оценка качества соединений.

Разработана технология неразрушающего контроля кольцевых швов толстостенных труб, выполненных КСО. Технология базируется на использовании эхозеркального метода ультразвукового контроля, который реализуется с помощью преобразователей, включенных по схеме тандем.

Характерно, что дефекты при КСО расположены в одной плоскости соединения. При КСО толстостенных труб эта плоскость всегда перпендикулярна оси трубы, что облегчает локацию дефектов, при которой можно не учитывать все сигналы от структурной неоднородности металла, поступающие от участков, которые расположены за пределами плоскости соединения. Выделены две категории дефектов, которые могут быть выявлены ультразвуковым контролем: дефекты, связанные с химической неоднородностью металла, и дефекты, вызванные нарушениями режима сварки. Определены алгоритмы оценки дефектов соединений, выполненных КСО, которые гармонизированы с эталонами при ультразвуковом контроле соединений, выполненных электродуговыми способами сварки.

В результате этих исследований сертифицирована технология неразрушающего контроля соединений труб, полученных КСО, требуемая в соответствии с нормативами как обязательная операция.

В результате выполненных исследований ИЭС им. Е. О. Патона совместно с заводом «Псковэлектросвар» разработал комплекс оборудования для КСО морских трубопроводов диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм для использования на



Рис. 16. Комплекс для контактной стыковой сварки оплавлением морских трубопроводов диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм

трубоукладочной барже (рис. 16). Комплекс изготовлен и проходит испытания.

Эксплуатационная надежность работы тепловых и атомных электростанций в значительной мере зависит от герметичности и высокой износостойкости уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры. Эрозионный и коррозионный износ, трещины термической усталости, а также появление задиров на трущихся поверхностях – основные причины выхода трубопроводной арматуры из строя.

Разработаны материалы, технология и оборудование для механизированной наплавки деталей энергетической трубопроводной пароводяной арматуры высоких параметров всех типоразмеров. Широко используется наплавка жаропрочными износ- и коррозионностойкими сплавами, что позволило существенно продлить срок службы арматуры и повысить ее надежность. Совершенствование процессов наплавки уплотнительных поверхностей арматуры будет идти по пути ее автоматизации и создания новых износостойких сплавов.

В институте разработаны практические рекомендации по ремонту сваркой магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. Они включают комплекс методик и инженерных руководств по оценке состояния магистральных трубопроводов с обнаруженными дефектами, а также по планированию ремонта сваркой под давлением. Применительно к типичным дефектам магистральных трубопроводов (локальные и общие коррозионные повреждения металла, трещины,

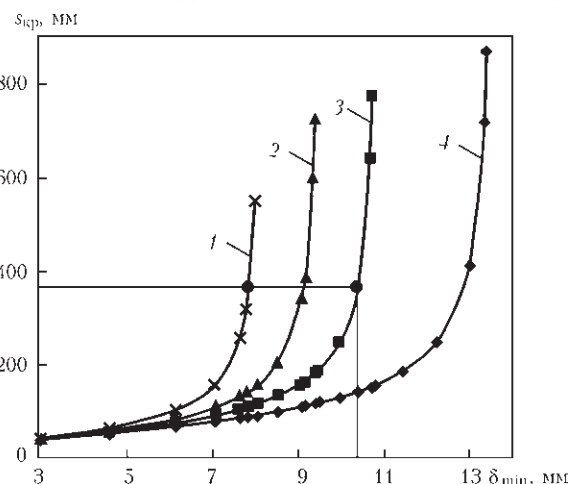


Рис. 17. Зависимость критической длины дефекта типа локального утонения $s_{кр}$ от минимальной допустимой толщины δ_{min} стенки трубы 1420×20 мм из стали 17Г1С при различном внутреннем давлении: 1 — 4,5; 2 — 5,25; 3 — 6,0; 4 — 7,5 МПа

дефекты формы) предложены критерии для оценки их допустимости с позиций степени снижения несущей способности трубопровода как при эксплуатации, так и во время ремонта (рис. 17). Особое внимание уделено вопросам планирования ремонтных работ с использованием различных усиливающих конструкций: сварных бандажей, герметичных муфт, муфт с компаундным наполнителем.

Поскольку оборудование для тепловых и атомных электростанций работает при высоких температурах и давлениях, то применение традиционных средств неразрушающего контроля в процессе эксплуатации невозможно. Поэтому необходимо создание методов и средств для мониторинга технического состояния энергетических объектов. Были проведены исследования, которые впервые показали возможность применения метода акустической эмиссии для этой цели.

На рис. 18 приведены графики испытаний на растяжение образцов из стали 15Х1М1Ф при комнатной температуре и 500° С. Как видно, сохраняется акустическая активность на всех стадиях деформирования материала при высокой температуре, что позволяет прогнозировать разрушающие нагрузки с достаточной достоверностью.

Разработана и реализуется «Программа работ непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга на оборудовании ТЭЦ «Киевэнерго». На первом этапе исследованы диагностические контрольные параметры трубопроводов горячего промежуточного перегрева, подогревателей высокого давления и деаэратора, создана и смонтирована система непрерывного мониторинга трубопроводов промежуточного перегрева.

Система запущена в опытную эксплуатацию (рис. 19). Принято решение по внедрению средств и технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга оборудования других ТЭЦ.

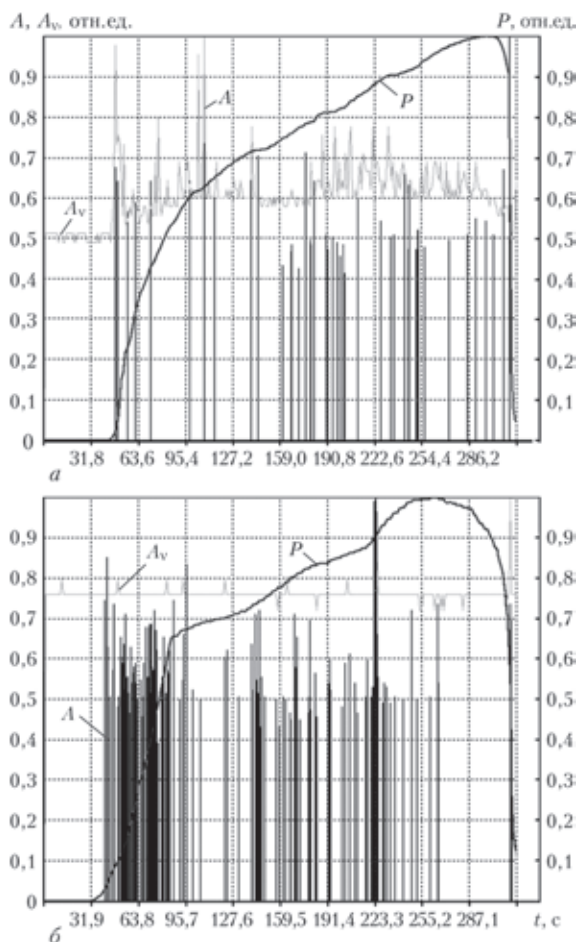


Рис. 18. Сопоставление сигналов акустической эмиссии в растягиваемых образцах из стали 15Х1М1Ф при комнатной температуре (а) и 500 °С (б) (A — амплитуда; A_v — амплитуда непрерывной эмиссии; P — нагрузка)

Как известно, к тяжелым экологическим последствиям приводят аварии на нефтегазовых промыслах. Одна из таких аварий произошла в 2010 г. в Мексиканском заливе на нефтедобывающей платформе, где из поврежденной скважины на глубине 1500 м произошло неконтролируемое вытекание нефти. Специалисты института разработали способ соединения разрушенных труб скважин во время вытекания нефти. Был разработан и изготовлен соединительный модуль, который успешно прошел испытания (рис. 20). Функциональная схема его работы заключается в следующем. С помощью грузоподъемных механизмов опускается модуль к поврежденной части скважины. Он захватывается технологически-



Рис. 19. Одна из точек измерения акустико-эмиссионной активности трубопровода промежуточного перегрева пара Киевской ТЭЦ-6



Рис. 20. Модуль для соединения разрушенных труб скважин

ми устройствами, которые удерживают модуль в вертикальном положении и не дают возможности вытекающему потоку сбросить его в сторону. При этом не происходит динамического удара и срыва модуля с места закрепления благодаря имеющимся в конструкции модуля необходимым отверстиям, которые обеспечивают свободное вытекание интенсивного потока нефти в окружающую среду. Затем эти отверстия модуля перекрываются. Для этого используются гидроцилиндры и специальные шторки, предусмотренные конструкцией модуля. После завершения работы гидроцилиндров и перекрытия отверстий модуля нефть направляется в нужном направлении по трубопроводу.

Таковы разработки института, предназначенные для современной энергетики. Исследования и создание новых технологий продолжаются.

Поступила в редакцию 01.07.2013



СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

Е. Н. КАБЛОВ, О. Г. ОСПЕННИКОВА, Б. С. ЛОМБЕРГ

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов».

РФ. 105005, г. Москва, ул. Радио, 17. E-mail: admin@viam.ru

Определены стратегические направления развития материалов и технологий их переработки для основных деталей ГТД нового поколения на период до 2030 г. Изложены современные тенденции развития литейных и деформируемых жаропрочных сплавов, в том числе интерметаллидных на основе никеля и титана. Приведены характеристики усталостного в ФГУП «ВИАМ» нового вакуумного оборудования для выплавки жаропрочных сплавов и деформации высокотемпературных материалов в условиях изотермии на воздухе, а также результаты разработок в области ионно-плазменного нанесения защитных жаростойких, упрочняющих и теплозащитных покрытий на лопатки и другие детали ГТД и создания нового поколения плазмохимического оборудования. Разработана технология получения широкого спектра сверхчистых ультрадисперсных порошков методом атомизации для вакуумной диффузионной пайки и аддитивных технологий. Библиогр. 24, рис. 10.

Ключевые слова: материалы и технологии переработки, детали газотурбинных двигателей, литейные и деформируемые жаропрочные сплавы, интерметаллиды, вакуумное оборудование, лопатки, технологии ионно-плазменного напыления покрытий, получение сверхчистых порошков

Анализ научно-технического развития в области разработки и использования сплавов и сталей со специальными свойствами, сложившиеся мировые тенденции, а также сырьевые и ресурсные возможности показывают актуальность задачи по разработке комплекса технологических решений для создания нового поколения литейных и деформируемых сплавов и сталей со специальными свойствами, включая комплексные системы защиты и теплозащитные покрытия.

Основные принципы создания современных материалов для сложных технических систем должны быть основаны на результатах фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований, полученных ведущими научно-исследовательскими организациями совместно с институтами РАН и базироваться на следующем постулате — неразрывность материалов, технологий и конструкций, включая использование «зеленых» технологий при создании материалов и комплексных систем защиты, а также реализацию полного жизненного цикла (с использованием IT технологий) — от создания материала до его эксплуатации в конструкции, диагностики, ремонте, продлении ресурса и утилизации.

С учетом приоритетных направлений и критических технологий развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденных Указом Президента Российской Федерации № 899

от 7 июля 2011 г., приоритетов государственной политики в промышленной сфере, стратегий развития государственных корпораций, интегрированных структур анализа тенденций развития материалов в мире ФГУП «ВИАМ» определены следующие стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. [1, 2]:

- «умные» конструкции;
- фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль;
- компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции;
- интеллектуальные, адаптивные материалы и покрытия;
- материалы с эффектом памяти формы;
- слоистые металлополимерные, биметаллические и гибридные материалы;
- интерметаллидные материалы;
- легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения;
- монокристаллические, высокожаропрочные суперсплавы, естественные композиты;
- энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций;
- магнитные материалы;

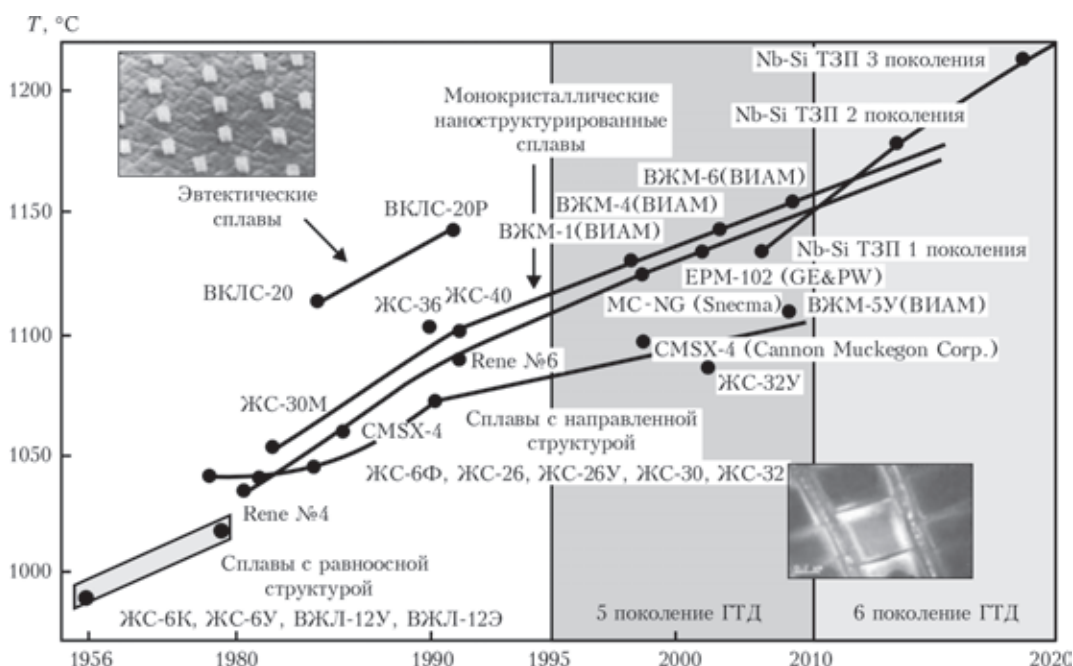


Рис. 1. Динамика развития литейных жаропрочных сплавов

- металломатричные и полиматричные композиционные материалы;
- полимерные композиционные материалы;
- высокотемпературные керамические, теплозащитные и керамоподобные материалы;
- наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия;
- сверхлегкие пеноматериалы;
- комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия;
- климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах.

Современная тенденция развития литейных жаропрочных никелевых сплавов заключается в использовании дефицитных элементов VII и VIII группы Периодической системы Д. И. Менделеева, таких как рений и рутений (рис. 1).

Для литья монокристаллических лопаток ГТД разработали специальную высокоогнеупорную керамическую оболочковую форму, работоспособную до температуры 1750 °C [3].

Современные никелевые жаропрочные сплавы (ЖС) для литья лопаток ГТД достигли предела рабочих температур 1100...1150 °C, что составляет 80...85 % их температуры плавления. Эволюционное развитие жаропрочных никелевых сплавов привело к созданию сплавов I, II, III, IV и V поколений, температура плавления которых повышалась за счет легирования тугоплавкими элементами вольфрамом, рением и рутением, достигнув 1350...1370 °C. В настоящее время внедряется в

производство для изготовления рабочих монокристаллических лопаток жаропрочный никелевый рений-рутений содержащий сплав IV поколения ВЖМ4 с уровнем длительной прочности 120 МПа при 1150 °C на базе 100 ч. [4, 5].

Одним из многообещающих направлений разработки высокожаропрочных сплавов для лопаток, работающих при температурах выше 1100 °C, является создание естественных композиционных материалов, получаемых методом высокоградиентной направленной кристаллизации сложнолегированных эвтектических сплавов на никелевой основе. Такие разработки были осуществлены созданием эвтектических сплавов с естественно-композиционной структурой γ/γ' -MeC. Для достижения рабочей температуры лопаток с естественно-композиционной структурой, равной 1250 °C, из ЖС на основе никелевых эвтектик необходимо в качестве матрицы использовать никелевые жаропрочные рений-рутений содержащие сплавы. Разработку таких эвтектических сплавов с повышенным содержанием рения и рутения предполагается осуществить к 2025 г. [2, 6].

С целью повышения температур газа перед турбиной и, как следствие, КПД двигателя создан новый класс литейных конструкционных высокотемпературных экономнолегированных материалов на основе интерметаллида Ni_3Al серии ВКНА, предназначенных для изготовления деталей газотурбинных двигателей, эксплуатируемых в диапазоне температур 900...1200 °C.

Интерметаллидные сплавы отличает низкая плотность (на 10...12 % ниже, чем у жаропрочных никелевых), высокая жаростойкость при рабочих температурах. Применение легких сплавов на ос-

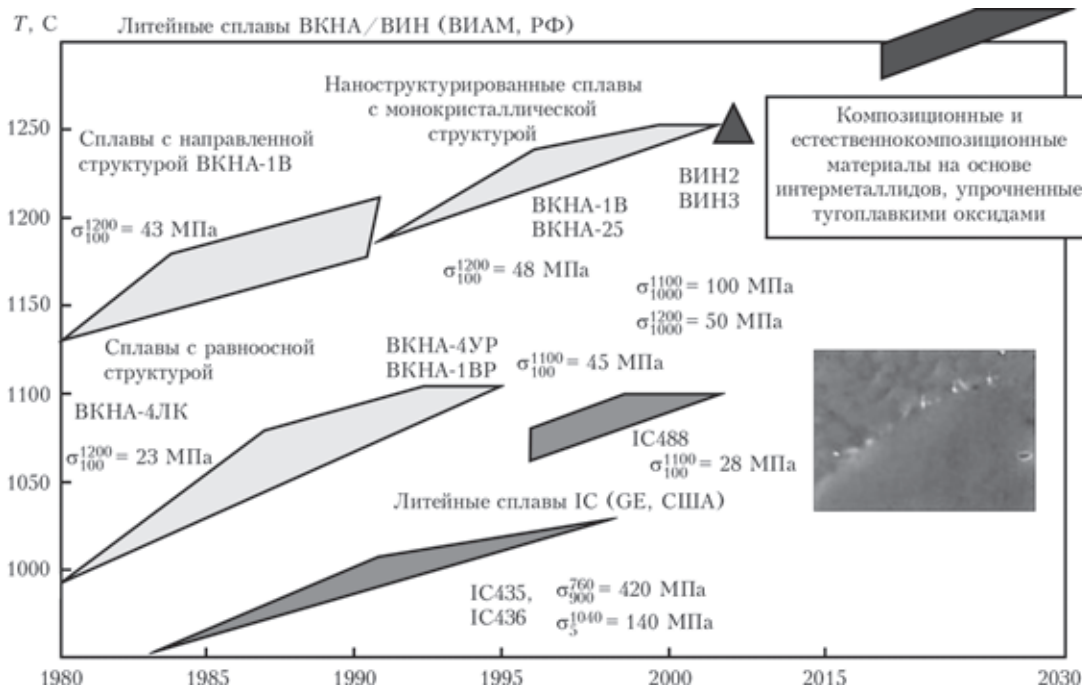


Рис. 2. Развитие литейных сплавов на основе интерметаллидов никеля

нове интерметаллида никеля в качестве рабочих лопаток позволит снизить нагрузку на диски турбины и повысить ресурс ГТД в 2,5...3,0 раза.

В соответствии с комплексом физико-механических свойств интерметаллидные сплавы марки ВКНА рекомендуются для литых сопловых лопаток, деталей жаровых труб, створок и проставок реактивного сопла с монокристаллической структурой, длительно эксплуатируемых при температурах 900...1200 °C. Впервые в мире сплавы на основе интерметаллидов никеля применяются в авиационной технике (рис. 2) [7–9].

Создание новых перспективных ГТД связано с повышением рабочих температур, что требует разработки высокотемпературных сплавов на основе тугоплавких матриц. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать высокотемпературные процессы направленной кристаллизации с использованием расчетных методов управления переменным температурным градиентом, специализированное высокотемпературное оборудование и технологии получения деталей ГТД из сплавов на основе тугоплавких матриц.

Для производства современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов, в том числе наноструктурированных в ФГУП «ВИАМ», создан производственный участок мощностью до 200 т/год. Участок включает современные вакуумные индукционные печи: ВИАМ-2002 с емкостью тигля 20 кг разработки и производства ФГУП «ВИАМ» и печи VIM-50 и VIM-150 производства фирмы «ALD Vacuum Technologies» (ALD) емкостью 350 и 1000 кг. Печи оснащены компьютерными системами управления, позволяют проводить отбор проб для химического анали-

за выплавляемого металла в процессе выплавки и последующую доводку его состава до оптимального, а также проводить фильтрацию расплава во время его слива в стальные трубы через горячий пеностержневой фильтр. Перечисленные особенности плавильного оборудования обеспечивают поддержание стабильного оптимального химического состава выплавляемых сплавов, низкий уровень вредных примесей и газов, высокую чистоту по неметаллическим включениям, сохранение в оптимальных количествах микролегирующих добавок, что обеспечивает получение из них отливок с наноструктурой.

Контроль механических свойств изготовленных сплавов, содержание основных легирующих элементов, примесей и газов осуществляется на современном компьютеризированном оборудовании и Испытательном центре ФГУП «ВИАМ» (рис. 3).

Используя результаты научно-исследовательских работ, проведенных в ВИАМ совместно с ИМЕТ РАН им. Байкова, разработана и серийно применяется ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава всех видов отходов, образующихся в металлургическом и литейном производстве, которая позволяет из 100 % отходов получать сплавы, которые полностью отвечают по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ и не уступающие сплавам, изготовленным из свежих шихтовых материалов.

Данная технология позволяет создать замкнутый цикл возврата дорогих и дефицитных легирующих металлов (рений, рутения, тантала, кобальта, ванадия и др.) в производство. ВИАМ приобрел и в настоящее время монтирует новую

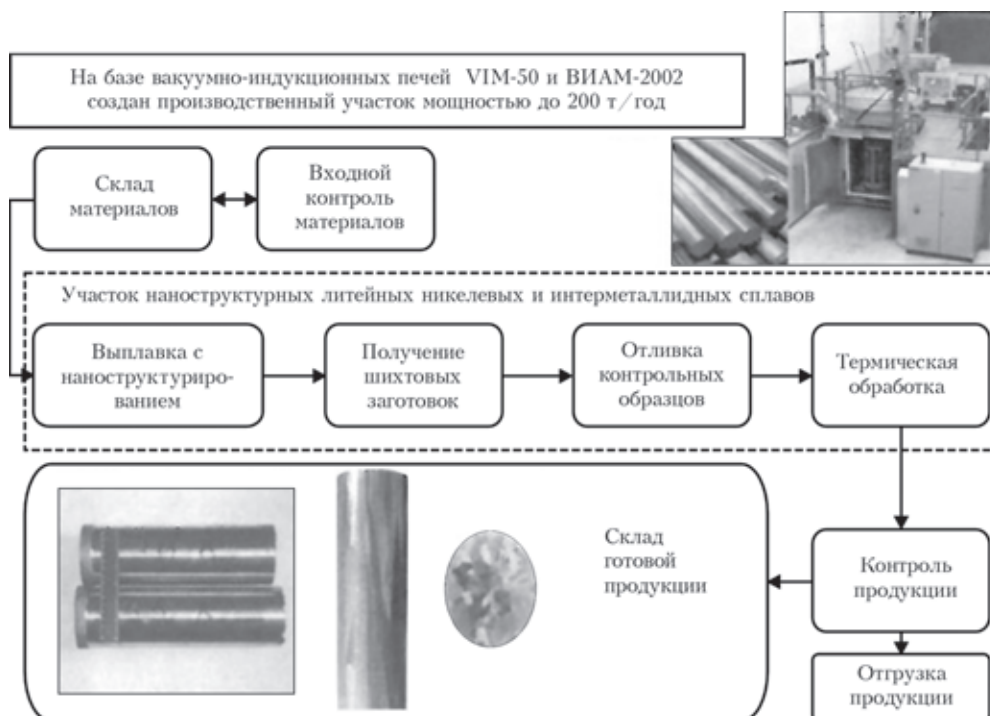


Рис. 3. Производство жаропрочных литейных сплавов

вакуумную индукционную печь VIM-150 фирмы «ALD» (Германия) последнего поколения емкостью тигля 1 т, в конструкцию которой по техническому заданию ВИАМ включены современные устройства и системы регулирования, которые позволяют дополнительно повысить качество выплавленного металла [10–13].

ВИАМ является разработчиком технологии и ведущим в мире предприятием в области ионно-плазменного нанесения защитных жаростойких, упрочняющих и теплозащитных покрытий на лопатки и другие детали ГТД и ГТУ. ВИАМ создал промышленное автоматизированное оборудование (установки типа МАП), в том числе установку МАП-3 для ассистированного газовыми ионами с энергией до 40 кВ (плотность ионного тока до 200 мкА/см²) осаждения, позволяющего за счет бомбардировки поверхности растущего конденсата (покрытия) ускоренными газовыми ионами (Ar, N₂) изменять структурно-фазовое состояние конденсатов (покрытий) и тем самым повышать функциональные свойства получаемых покрытий. ВИАМ поставил на ОАО «Мотор Січ» автоматизированную установку МАП-2 и в настоящее время готовится контракт на поставку установки МАП-3 [14–19].

Технология обеспечивает нанесение всех типов защитных покрытий (на основе металлов и сплавов различного легирования, на основе нитридов, карбидов, оксикарбонитридов, нанослойные покрытия из периодически повторяющихся от двух до четырех слоев различных материалов с общей толщиной свыше 15 мкм и др.), в том чис-

ле высокотемпературных градиентных покрытий конденсационно-диффузионного типов (не имеют аналогов), а также позволяет проводить процессы ионной обработки поверхности в металлической плазме (новейший процесс ионного модифицирования поверхности, например, низкотемпературное (до 600 °С) титанирование или титаноцирконирование подложки из конструкционных сталей) и процессы упрочнения ЖС (рис. 4).

Для двигателя ПД-14 ФГУП «ВИАМ» разработал жаростойкий соединительный слой ТЗП типа цементация+газовое алитирование+ВСДП-3 (Ni–Cr–Al–Hf–Re–Y)+ВСДП-16+Т/О и совместно с ОАО «ПМЗ» отработал технологию нанесения комплексного теплозащитного покрытия с нанесением керамического слоя ТЗП методом EB/PVD на рабочие лопатки ТВД на электронно-лучевой установке EB/PVD фирмы «ALD» (Германия).

ВИАМ начал работы по созданию нового поколения плазмохимического оборудования для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих элементы синтезируемого покрытия. Оборудование позволит в едином процессе получать многослойные жаростойкие и ТЗП с барьерными слоями на основе самоорганизующихся нанокомпозитов для лопаток турбин из ЖС на основе тугоплавких элементов (ниобия, молибдена, хрома, тантала), в том числе эвтектических композиционных материалов на основе ниобия (или молибдена, хрома) с интерметаллидным упрочнением на рабочую температуру 1300...1500 °С, а также функциональные упрочняющие моно- и многослойные 2-D и



Рис. 4. Ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия

3D наноструктурные покрытия с самоорганизующейся упорядоченной структурой на основе твердых соединений металлов и сплавов для деталей ГТД при температурах до 800 °С [14–19].

Особое внимание уделяется развитию технологий получения мелкодисперсных металлических порошков различного назначения. Это порошки припоев и наполнителей для высокотемпературной вакуумной диффузионной пайки, в том числе и композиционной, а также порошки различных сплавов (на никелевой, железной, титановой, алюминиевой

и др. основах) для аддитивных технологий и порошков магнитных материалов на основе РЗМ.

В настоящее время серийного производства таких порошков в стране нет. В ФГУП «ВИАМ» смонтирован и введен в эксплуатацию новейший атомайзер HERMIGA10/100VI, предназначенный для производства мелкодисперсных металлических порошков на основе никеля, железа и алюминия, на базе которого сформирован участок производства порошковых припоев и пилотных партий порошков сплавов для аддитивных технологий. Порошки по-

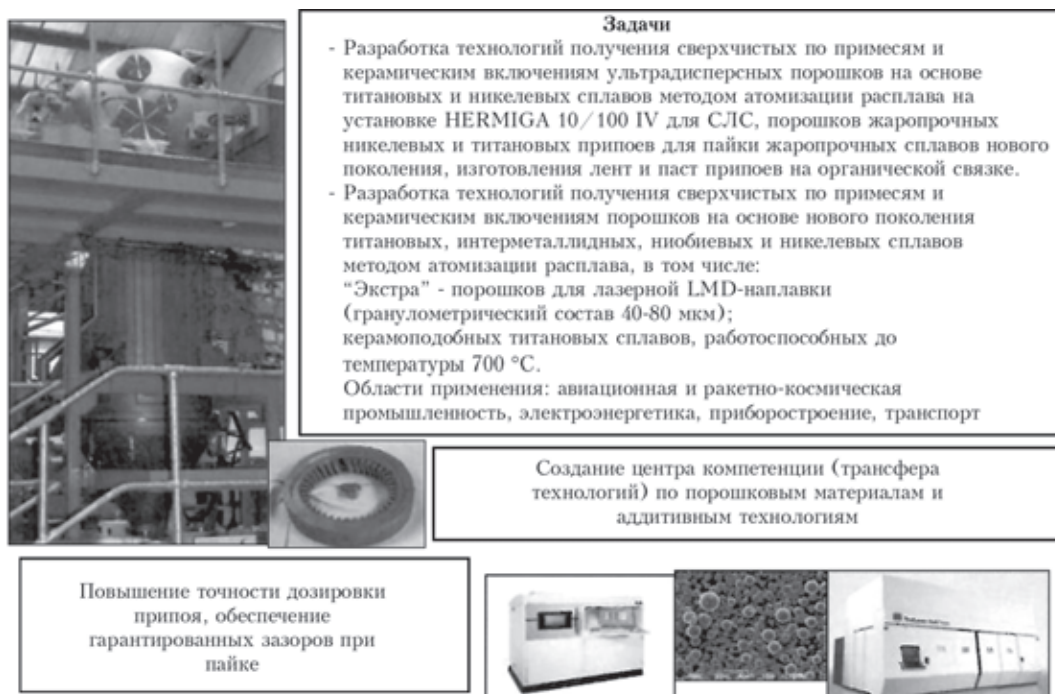


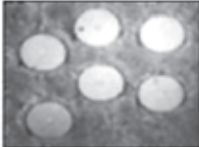
Рис. 5. Развитие технологий атонизации для получения мелкодисперсных высококачественных металлических порошков



Литейные сплавы на основе интерметаллидов титана γ -TiAl					Деформируемые сплавы на основе интерметаллидов титана				
Сплав	Полуфабрикат	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	E, ГПа	Сплав	Полуфабрикат	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Опытный ВИТ-Х	Отливка 25 мм ТО	≥ 554	≥ 538	169	ВТИ-4	Лист 2,5 мм	≥ 1150	≥ 1100	6
ВТИ-3Л	Отливка 25 мм ГИП+ТО	≥ 545	≥ 535	168	ВТИ1	Пруток $\varnothing 25$ мм	≥ 1300	≥ 1150	8



Производство: ФГУП «ВИАМ»



Лопатки и крыльчатки турбокомпрессоров на TiAl

Преимущества КМ
(по сравнению с традиционными сплавами):

- плотность на 40 % ниже;
- предел прочности в 1,5 раза выше;
- жаропрочность в 2 раза выше.

Области применения:

- авиационная промышленность
- транспортное машиностроение

Применение КМ обеспечит:

- снижение веса узлов на 40 %;
- повышение рабочих температур на 250 °С;
- повышенную пожаробезопасность до 900 °С.

Рис. 6. Перспективные материалы на основе интерметаллидов титана

ставляются на ведущие предприятия отрасли: ОАО «Авиадвигатель», ОАО «ПМЗ», ОАО «Сатурн», ОАО «НПК «Теплообменник» и др. [20].

Дальнейшее развитие этого направления связано с разработкой технологий получения порошков активных сплавов заданного гранулометрического состава с использованием бестигельной плавки расходного электрода.

Переход на получение порошков по данной технологии позволит при серийном производстве получать порошки сплавов отечественных марок на основе титана, никеля, ниобия и др. по стоимости, соизмеримой с зарубежными производителями, при широкой номенклатуре и объеме производства до 30 т/мес. (рис. 5).

В ВИАМ разработаны и широко применяются в авиационной промышленности припои марки ВПр (Впр1, Впр4, Впр7, Впр16, Впр28, Впр24, Впр27, Впр36, Впр42, Впр44, Впр50 и др.), а также технологические процессы пайки этими припоями различных материалов.

В настоящее время технологии пайки, в том числе диффузионной, разработанные в ВИАМ, нашли широкое применение при изготовлении деталей и узлов ГТД.

Интерметаллидные сплавы на основе титана наиболее востребованы в области двигателестроения. Для достижения положительных результатов промышленного производства должны быть успешно решены следующие технологические задачи:

- разработка сплавов на основе γ -фазы интерметаллида TiAl с прецизионной системой легирования и плотностью 3,5...3,9 г/см³ и рабочей температурой до 800 °С;

- создание технологий выплавки интерметаллидного γ -сплава с управлением структурой в слитках;

- разработка технологий механической обработки деталей и лопаток (рис. 6).

Развитие жаропрочных сплавов для дисков ГТД как отечественных, так и их зарубежных аналогов в первую очередь связано с увеличением рабочей температуры и повышением комплекса механических свойств: длительной и кратковременной прочности, а также усталостных характеристик (в первую очередь МЦУ).

Специалистами ФГУП «ВИАМ» разработан новый деформируемый жаропрочный сплав ВЖ175, который характеризуется уникальным сочетанием механических свойств, превосходящий известные отечественные и зарубежные сплавы — по кратковременной и длительной прочности до 15 %, по малоцикловой усталости до 30 %, с максимальной температурой работы до 800 °С. Такие показатели достигнуты благодаря сбалансированному легированию, однородной мелкозернистой структуре (зерно 15...30 мкм) и оригинальному режиму термической обработки, обеспечивающему выделение упрочняющих фаз различной дисперсности, в том числе частиц размером менее 80 нм.

Из сплава ВЖ175 освоено промышленное производство крупногабаритных штамповок дисков (диаметром до 550 мм) на ОАО «МЗ «Электро-сталь» и ОАО «СМК» для ГТД пятого поколения [21].

Дальнейшее повышение эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов на никелевой основе за счет увеличения упрочняющих тугоплавких и γ' -образующих элементов крайне проблематично.

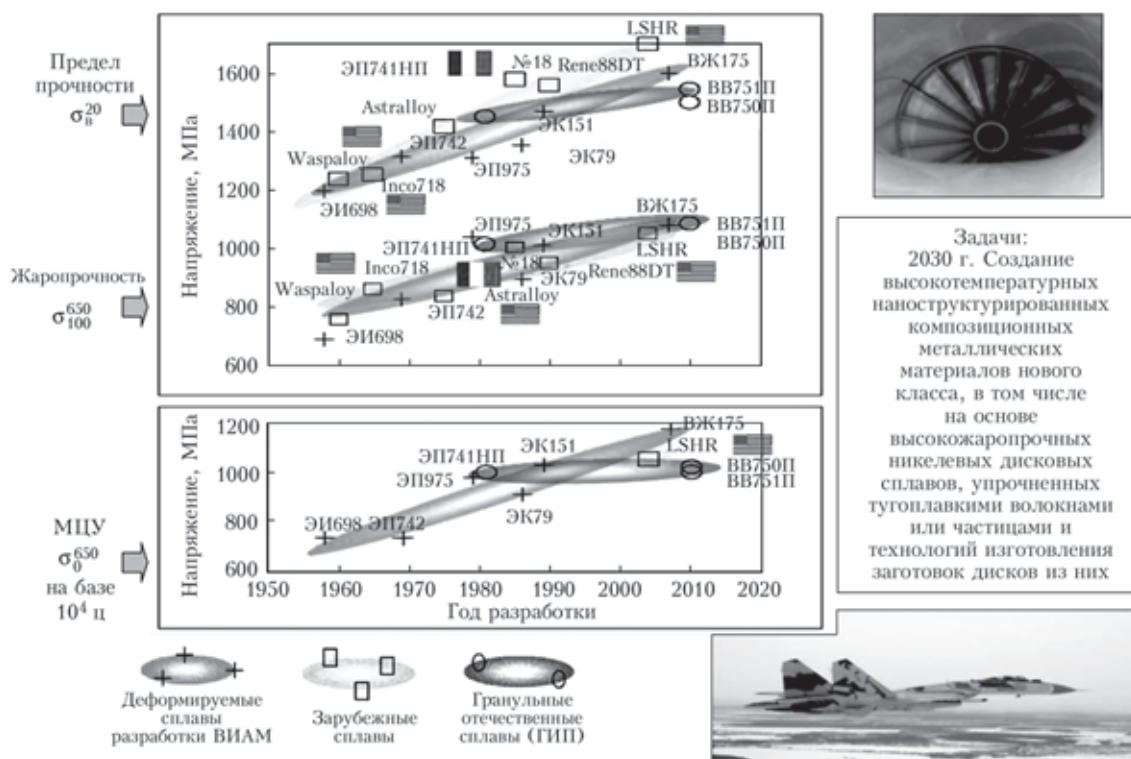


Рис. 7. Развитие жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД

но, так как уже сегодня уровень легирования этих сплавов достиг критического значения. Поэтому основные направления развития материалов для дисков ГТД связаны с разработкой новых наноструктурированных композиционных материалов, в том числе на основе высокожаропрочных никелевых деформируемых сплавов, упрочненных тугоплавкими волокнами или частицами (рис. 7).

Высокопрочный свариваемый сплав ВЖ172, благодаря сбалансированному легированию и оптимальному содержанию упрочняющей фазы, по показателям прочности и жаропрочности превосходит существующие отечественные и зарубежные сплавы аналогичного назначения на 15...70 % при сохранении высоких для данного класса материалов характеристик свариваемости и технологической пластичности.

Сплав ВЖ 172 предназначен для применения в качестве материала для корпусов камеры сгорания и турбины других нагруженных деталей и узлов статора горячего тракта ГТД, работающих при температуре до 900 °С. Кроме того, сплав ВЖ172 может быть применен в качестве материала дисков сварного ротора КВД и вальцованных лопаток КВД с температурой работы до 750 °С.

Определены технологические параметры аргонодуговой сварки нового высокожаропрочного листового никелевого сплава ВЖ171, упрочняемого химико-термической обработкой (внутренним азотированием), предназначенного для изготовления сварных деталей и узлов камер сгорания, их наиболее высокотемпературных элементов и других

деталей перспективных ГТД. Нитриды отличаются большей термодинамической стабильностью чем интерметаллиды и карбиды, что позволяет повысить рабочую температуру до 1200...1250 °С. Сварка сплава ВЖ171 с азотированием после сварки с использованием основного материала в виде присадки позволяет получить сварные соединения с высокой сопротивляемостью к образованию горячих трещин ($A_{кр} \geq 4,5$ мм/мин), с прочностью, близкой к прочности основного материала ($\sigma_{св.с} = 0,95...1,0 \sigma_{осн.м}$) [22].

Во ФГУП «ВИАМ» разработана и реализована инновационная технология изотермической штамповки на воздухе с целью получения экономичных высококачественных заготовок дисков из высокожаропрочных никелевых сплавов для малоразмерных ГТД.

Новая энергоэффективная и ресурсосберегающая технология отличается высоким коэффициентом использования материала (его значения в 2...3 раза выше по сравнению со штамповкой в открытых штампах, которая используется на крупных промышленных предприятиях), лучшей проработкой структуры металла, что обеспечивает высокую стабильность механических свойств.

В качестве исходной заготовки для изотермической штамповки может использоваться как серый пресспруток диаметром 80...150 мм, так и мерный слиток, полученный методом высокограддиентной направленной кристаллизации (ВГНК).

По сравнению с зарубежными разработками высокотемпературная изотермическая штамповка



Рис. 8. Изотермическая штамповка жаропрочных дисковых сплавов на воздухе для малоразмерных ГТД

производится на воздухе, а не в конструктивно-сложных малопроизводительных вакуумных установках с дорогостоящими молибденовыми штампами (рис. 8).



Ротационная сварка трением обеспечивает:

- возможность сварки деталей из материалов, несвариваемых методами сварки плавлением;
- получение сварных соединений с прочностью, близкой к прочности основного материала;
- повышение эффективности изготовления сварных узлов;
- значительное снижение трудоемкости изготовления;
- возможность автоматизации процесса сварки.

Сварное соединение "труба-труба" до и после сварки и Т/О (сплав ВЖ175)



Сварная конструкция "диск-вал". Сплав ВЖ175 (до и после механической обработки)



Механические свойства сварных соединений жаропрочных деформируемых никелевых сплавов

Свариваемые материалы	Технологический вариант	$\sigma_{\text{в}}^{20}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}^{650}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}^{750/1000}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}^{750}$, МПа	KCU^{20} , кДж/м ²	$K = \sigma_{\text{св.с}} / \sigma_{\text{о.м.}}$
ВЖ175+ВЖ175	Закалка+старение+сварка	1232	1295	638	-	295	≥0,8
	Закалка+сварка+старение	1550	1500	940	-	220	0,90-1,0
	Сварка+закалка+старение	1560	1510	850	-	280	0,85-1,0
ЭИ698+ЭИ698	Сварка+закалка+старение	1120	-	-	770	400	≥0,9
ЭП975+ЭП975	Сварка+закалка+старение	1120	-	-	990	360	≥0,9
ВЖ172+ЭК79	Сварка+закалка+старение	1300	-	-	850	380	≥0,8-0,95

Рис. 9. Разработка технологий ротационной сварки трением



Для силовых деталей двигателя (валы, крепеж)
(рабочая температура стали до 450 °С)

Сплав	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{400/100}$	$\sigma_{400/0,2/100}$
	МПа (20 °С)		МПа (при 400 °С)			
ВКС-170	1570	1520	1300	1200	1000	800
ВКС-180	1720	1600	1400	1350	1000	825
ЭП517(серийный)	1100	950	850	800	880	490
Maraging 250 (США)	1725	1690	1523	1447	н/д	н/д

Обеспечивают:
снижение массы деталей
двигателя до 30 %

Мелкозернистая структура
стали после упрочняющей
термической обработки
полуфабрикатов

→



x100

Применение: вал ТНД двигателя ПД-14 ОАО «Авиадвигатель»
(сталь ВКС-170ТУ 14-1-4479-88; поковки шифра «6-33» ТУ 1-801-5421-2009)



Производство: ОАО «МЗ «Электросталь», ОАО «СМК»



Рис. 10. Механические свойства высокопрочных мартенситносталяей

На базе ФГУП «ВИАМ» будет создан центр трансфера технологий изотермической деформации на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых ЖС [23, 24]. Разработаны технологии ротационной сварки трением жаропрочных деформируемых никелевых сплавов в одноименном и разноименных сочетаниях применительно к изготовлению изделий типа «диск-вал», «блиск», «блинг», обеспечивающие получение сварных соединений с прочностью 0,8...0,9 прочности менее прочного сплава ($K = \sigma_{св.с} / \sigma_{осн.м}$). Выбраны основные параметры процесса сварки трением сплавов. Исследована зависимость режимов сварки трением и механических свойств сварных соединений от термической обработки свариваемых заготовок. Проведена сварка трением имитатора диска из сплава ВЖ175 диаметром до 300 мм и вала диаметром 35 мм (рис. 9).

В ФГУП «ВИАМ» разработаны высокопрочные конструкционные мартенситносталяей особо низкоуглеродистые стали системы легирования 18Ni-8Co-5Mo-Ti-ВКС-170 ($\sigma_b \geq 1570$ МПа) и ВКС-180 ($\sigma_b \geq 1720$ МПа), рекомендованные для работы до 400...450 °С.

В таблице (рис. 10) представлены механические свойства сталей ВКС-180 и ВКС-170 в сравнении с серийно применяемой сталью ЭП517 и зарубежным аналогом Maraging 250. Из данных, приведенных в таблице, видно, что конструкционные мартенситносталяей стали ВКС180 и ВКС-170 превосходят по прочностным характеристикам до +400 °С сталь ЭП517, не уступают по соответствующим характеристикам зарубежному аналогу. Также эти стали превосходят применяемые по долговечности, выносливости, длительной прочности и ползучести.

Высокопрочные конструкционные мартенситносталяей стали ВКС-180 и ВКС-170 будут

использоваться для валов ГТД с целью снижения массы вала примерно до 30 % по сравнению с применяемыми мартенситными сталями (рис. 10).

За период 2010–2012 гг. разработан состав теплостойкой стали ВКС241 для подшипников ГТД, редукторов вертолетов, технология выплавки, горячей пластической деформации и упрочняющей термической обработки, обеспечивающие твердость при 20 °С не менее HRC 60, теплостойкость 500 °С, технологичность и структурную однородность.

По уровню свойств (ударная вязкость, твердость) сталь ВКС241-ВИ находится на уровне аналога — М50 (США) и превосходит примерно в 2 раза по ударной вязкости применяемую сталь ЭИ347.

Новая теплостойкая подшипниковая сталь ВКС241 по стоимости легирующих элементов дешевле ЭИ 347 в 1,5 раза.

В заключение следует отметить, что применение разработанных в ФГУП «ВИАМ» новых материалов позволит решить серьезные научно-технические задачи, а именно: создать ГТД с отношением тяги к весу 20:1, повысить рабочую температуру газа до 2000 К, увеличить ресурс и срок службы ГТД в 1,5...1,7 раза, обеспечивая, тем самым, опережающее развитие отрасли авиационного двигателестроения.

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // Авиаци. материалы и технологии. — 2012. — № 8. — С. 7–17.
2. Осипенникова О. Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Там же. — С. 19–35.
3. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД / Е. Н. Каблов, В. В. Герасимов, Е. М. Висик, И. М. Демонис // Тр. ВИАМ. — 2013. — № 3. (электрон. журн.).
4. Никелевые жаропрочные сплавы нового поколения / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис.



- нис // *Авиац. материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 36–52.
5. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Елютин Е. С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии»*. — 2011. — С. 38–52.
6. Светлов И. Л. Высокотемпературные Nb–Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // *Двигатель*. — 2010. — № 5 (71). — С. 36–37.
7. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминидов никеля // *Там же*. — 2010. — № 4. — С. 22–26.
8. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиац. материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 57–60.
9. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А. Материалы для высокотемпературных газотурбинных двигателей // *Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. — 2011. — С. 13–19.
10. Каблов Е. Н., Сидоров В. В. Микрелегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Перспективные материалы*. — 2001. — № 1. — С. 23–34.
11. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Вершков А. В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Тр. ВИАМ*. — 2013. — № 2. (электрон. журн.).
12. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения / Е. Н. Каблов, В. В. Сидоров, В. Е. Ригин, А. В. Горюнов // *Авиац. материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 97–105.
13. Производство литых прутковых (шихтовых заготовок) из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, В. В. Сидоров, В. Е. Ригин // *Тр. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»*. — Т. 1. — Екатеринбург: УРОРАН, 2011. — С. 31–38.
14. Никелевые жаропрочные сплавы нового поколения / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис // *Авиац. материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 36–52.
15. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. Н. Луценко // *Металлы*. — 2007. — № 5. — С. 23–34.
16. Защитные и упрочняющие покрытия лопаток и деталей ГТД / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский и др. // 75 лет. *Авиационные материалы. Избранные тр. «ВИАМ» 1932–2007 гг.: Юбилейный науч.-техн. сб.* — М.: ВИАМ, 2007. — С. 107–124.
17. Каблов Е. Н., Будиновский С. А., Мубояджян С. А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // *Тр. 6-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия»*. — С.-Пб: Изд-во СПбГТУ, 2001. — С. 247–254.
18. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Луценко А. Н. Наноструктурные ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Вопр. материаловедения*. — 2008. — № 2(54). — С. 175–187.
19. Мубояджян С. А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. — 2011. — № 3. — С. 26–30; № 4. — С. 13–20.
20. Евгенов А. Г., Неруш С. В. Технология получения порошков и полуфабрикатов припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // *Тезисы докл. VI Всерос. науч.-техн. конф. молодых специалистов: Материалы конф.* — Уфа: УМПО, 2011. — С. 162.
21. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) // *Материаловедение*. — 2010. — № 7. — С. 24–28.
22. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей / Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М., Мазалов И. С. // *Авиац. материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 52–57.
23. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // *Там же*. — С. 129–140.
24. Оспенникова О. Г., Бубнов М. В., Капитаненко Д. В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Там же*. — С. 141–147.

Поступила в редакцию 18.04.2013



GENERALIZED ADDITIVE MANUFACTURING BASED ON WELDING/JOINING TECHNOLOGIES

GUAN QIAO

Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute
P O Box 863, 100024 Beijing, China

Being in the leading position of non-conventional welding technologies R&D in China, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute (BAMTRI) has been involved in a number of research programs relating to generalized additive manufacturing based on welding / joining technologies. Such research programs and projects provide aviation industry a rapid response in design and trial manufacture of new products. BAMTRI, founded in 1957, is a comprehensive research institute specializing in the research of advanced aeronautical manufacturing technologies and development of related equipment as well as promoting such technologies and equipment to industrial applications. Based on its superiority in electron beam, laser beam, plasma & ion beam processing technologies, the National Key Laboratory for Power Beam Processes was established at BAMTRI in 1993. Power beam welding / joining / processing and solid state welding / joining are the two most important R and D areas at BAMTRI to solve the “unique” and “critical” problems in modern aeronautical manufacturing as well as to establish the technical basis for generalized additive manufacturing, providing frontier technologies and related machinery to aviation enterprises in China. 10 Figures.

Key words: survey, non-conventional welding technologies, power beam welding, additive manufacturing, aviation industry, application

1. Non-Conventional Welding / Joining Technologies at BAMTRI

To meet the increasingly growing demands of the aviation industry to develop new aircrafts and aero-engines from generation to generation, continuous efforts have been made to exploit advanced welding / joining technologies. New methods and related equipments have been developed for precise and automatic material processing and structural elements forming. For the past half century, a system of non-conventional welding / joining technologies for aeronautical manufacturing has been formed at BAMTRI, which could be outlined as follows.

System of non-conventional welding/joining technologies for aeronautical manufacturing

- I Integrity of Welded Structures and Control of Stress and Distortion
- II Gas Shielded Arc Welding
- III Brazing and Transient Liquid Phase Joining (TLP)
- IV Resistance Welding
- IV Power Beam Welding/Joining/Processes
 - ◆ IV-1 Electron Beam
 - ◆ IV-2 Laser Beam
 - ◆ IV-3 Plasma and Ion Beam
- Solid State Welding/Joining
 - ◆ V-1 Diffusion Bonding (DB) and TLP
 - ◆ V-2 Super Plastic Forming/Diffusion Bonding (SPF/DB)
 - ◆ V-3 Friction Welding (FW)
 - V-3-1 Inertia FW
 - V-3-2 Linear FW
 - V-3-3 Friction Stir Welding (FSW)

Among the non-conventional welding / joining technologies in this system, power beam welding / joining / processing and solid state welding / joining, as mentioned above and will be described below, are the two most important R and D areas at BAMTRI, providing tools to solve the “unique” and “critical” problems in modern aeronautical manufacturing, which are also potentially attractive and exciting for designers together with engineers to provide more creative thought and space for innovatory implementation of new products.

1.1. Power Beam Welding/Joining/Processes

Electron beam (EB) R&D activities at BAMTRI mainly involve deep penetration welding, additive manufacturing, electron beam physical vapor deposition for thermal barrier coatings (TBCs), electron beam texturing, electron beam brazing and other material processing.

One of EB machine of 150 kV, 60 kW, 85 m³ (7.5 m×3.8 m×3 m) was built for deep penetration

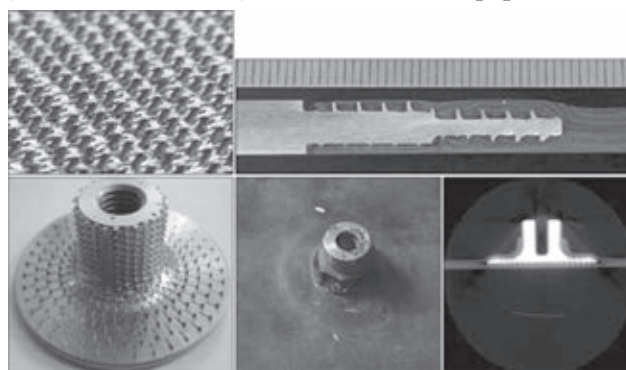


Figure 1. EB surface texturing for enhanced joining of titanium flange with composite material

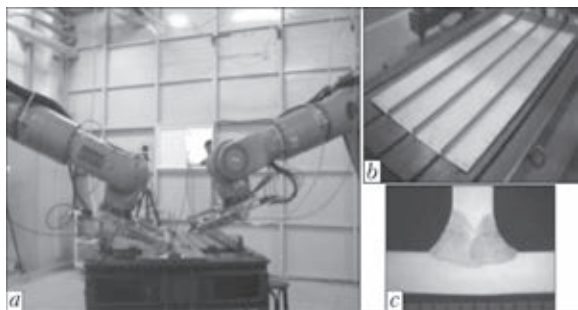


Figure 2. (a) Dual-beam laser robotic system for welding of aluminum and titanium airframe, (b) stiffened panels with (c) T-joint simultaneously from both sides of fillet welds

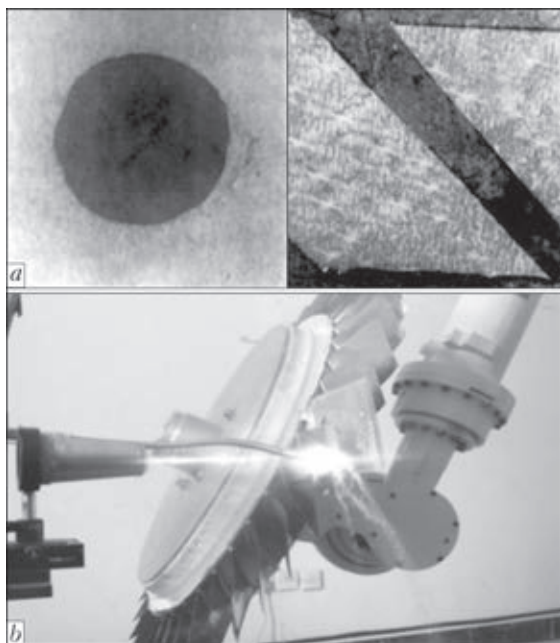


Figure 3. (a) Laser drilling for turbine blades and (b) laser peening for compressor blades

welding of titanium components with the thickness up to 150 mm.

The superiority of electron beam with extremely flexible scanning ability has been applied for surface texturing to obtain enhanced joining of titanium flange with polymer composite, as shown in Fig. 1.

Laser Beam R&D activities at BAMTRI mainly involve welding, cutting, drilling, peening, additive manufacturing as well as hybrid laser/MIG welding, texturing and surfacing. Fig. 2 illustrates an experimental set-up of dual-beam laser robotic system (Fig. 2a) for welding of aluminum and titanium airframe stiffened panels (Fig. 2b) with T-joint (Fig. 2c)

welded simultaneously from both sides of fillet welds.

Fig. 3a shows an application of precise laser drilling technologies for aero-engine turbine blades. To improve fatigue life, laser peening technology is also performed on compressor blades (Fig. 3b).

Plasma and ion beam R&D activities at BAMTRI mainly involve plasma spraying for turbine blades with TBCs as well as nano-structured TBCs, plasma immersion ion implantation and deposition, such as TiN deposition, thin film and TiCrN multilayer film deposition on aero-engine parts.

1.2. Solid State Welding/Joining Technologies

As mentioned above, the importance and contribution of solid state welding/joining technologies for aeronautical manufacturing are incomparable in solving specific “unique” and “critical” problems; in solid state welding/joining technologies there are no troubles and imperfections being inherent in fusion welding processes.

In the early 1980's, super plastic forming / diffusion bonding (SPF/DB) technology was firstly developed at BAMTRI for fabricating airframe titanium panels in order to reduce weight and improve structural performance. Nowadays multi-layered inner-stiffened titanium panels with complex configurations have been fabricated to meet specific requirements from aviation industry, space sector and other fields. Technical and economic benefits brought by SPF/DB are of great value for both designers and fabricators.

Linear friction welding (LFW) is an unique technique to manufacture high performance aero-engine blisks so as to replace the traditional tenon joints, achieving the weight reduction for the entire structure. Fig. 4 shows a part of the as-welded blisk and macro structure of the solid state joint. LFW can be considered as a block joining process in solid state additive manufacturing that will be described below.

Moreover, friction stir welding (FSW), which is also a solid state welding process, has been developed at BAMTRI for over fifteen years, and this development is ongoing. As a great alternative choice, FSW has attracted more attentions to be used instead of the traditional fusion welding in the area of aluminum structure joining. Similar to the LFW, FSW is also a powerful block joining process in solid state additive manufacturing.

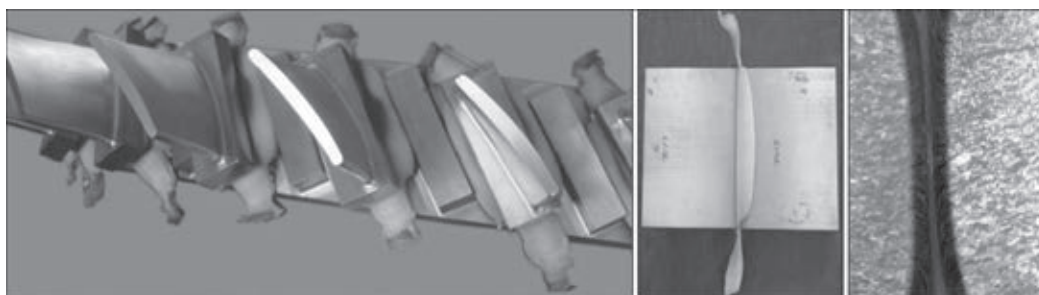


Figure 4. A part of as-welded blisk and macro structure of the solid state joint



2. Understanding of Generalized Additive Manufacturing

Additive manufacturing is different from the traditional material removal machining / cutting reduction manufacturing. In additive manufacturing, structural elements are formed usually by metal melting deposition. Such deposition is generally performed layer-by-layer with CAD/CAM techniques which is based on wire / powder feeding and melting using electron beam or laser beam. In generalized additive manufacturing, structural elements could also be produced by block joining using allied energy sources for welding /joining technologies, such as mechanical friction heating etc.

The disadvantages of traditional material removal machining / cutting reduction manufacturing techniques include low effectiveness, high material cost, and relatively long manufacturing cycle while a great portion of valuable material is turned into undesirable metal chips.

Compared with traditional techniques, additive manufacturing has many advantages and benefits, such as free forming, near net shape fabrication, material and time saving, flexibility and ability in controlling and optimizing performances of products.

Besides laser beam and electron beam, other allied energy sources are also applicable for generalized additive manufacturing, such as: chemical, electro-chemical, mechanical etc., especially pile-up forming could be performed applying block joining to produce directly integrated monolithic metallic structural elements.

From a welding researcher's point of view, the original formation of generalized additive manufacturing is buildup cladding by manual metal arc welding, or using gas tungsten arc welding as well as micro-plasma welding with wire feeding for surfacing and repair work. Although these heat sources do not possess the suitable flexibility and advantages as electron beam and laser beam used for modern additive manufacturing, all the heat sources for fusion welding are applicable for additive manufacturing, provided computer aided automation is entrusted to them. Besides, block joining processes using mechanical friction heating like linear friction welding are also considered as the solid-state additive manufacturing.

For the past two decades, the technical basis for rapid development of additive manufacturing has been attributed to the extreme flexibility of power beams like electron beam and laser beam (such as power control, focusing control, deflection capability, scanning control, long focused active zone) combined with CAD/CAM technologies.

At the same time, additive manufacturing has been more and more applied for direct metal free forming fabrication.

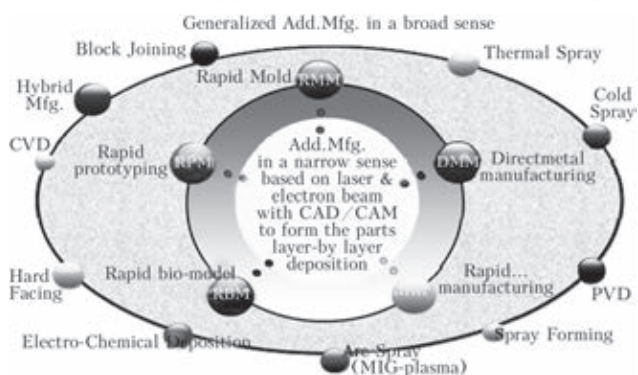


Figure 5. Distinctions between Add. Mfg. in a narrow sense (inner circle) and Add. Mfg. in a broad sense as generalized Add. Mfg. (outer ellipse)

In general, modern advanced generalized additive manufacturing could be classified into three categories: 1) direct metal free forming fabrication, 2) non-metallic parts direct manufacturing, 3) rapid bio-model direct forming.

Fig.5 shows the distinctions between additive manufacturing in a narrow sense (inner circle) and additive manufacturing in a broad sense (outer ellipse). The inner circle represents the additive manufacturing in a narrow sense based on laser and electron beams with CAD/CAM to form the parts by deposition layer-by-layer. The outer ellipse gives an idea to understand the generalized additive manufacturing based on allied energy sources such as electrical arc and plasma for melting deposition, light sources for photo curing stereo-lithography, electro-chemical sources for deposition in liquid phase, and mechanical friction heating sources for block joining etc.

It should be stressed that in past years the enthusiasm to promote 3D printing is mostly related to non-metallic part direct fabrication. But nowadays direct metal free forming manufacturing is expected to be the follow-up upsurge of additive manufacturing to change gradually the traditional manufacturing mode from mass production to customized product made to order. Another breakthrough in bio-model direct forming as generalized additive manufacturing is predictable in the near future.

3. Potential Application of Generalized Additive Manufacturing

3.1. Additive manufacturing based on electron beam

Fig.6 shows the principle of additive manufacturing process based on electron beam with wire feeding.

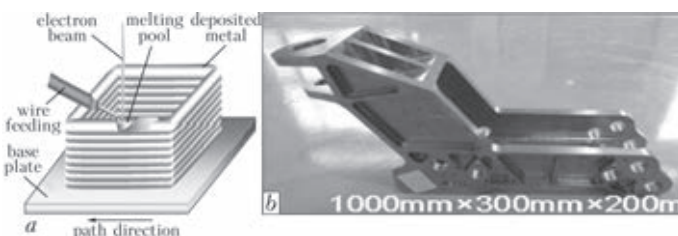


Figure 6. Principle of (a) Add. Mfg. based on EB with wire feeding and (b) deposited titanium structural element after machining

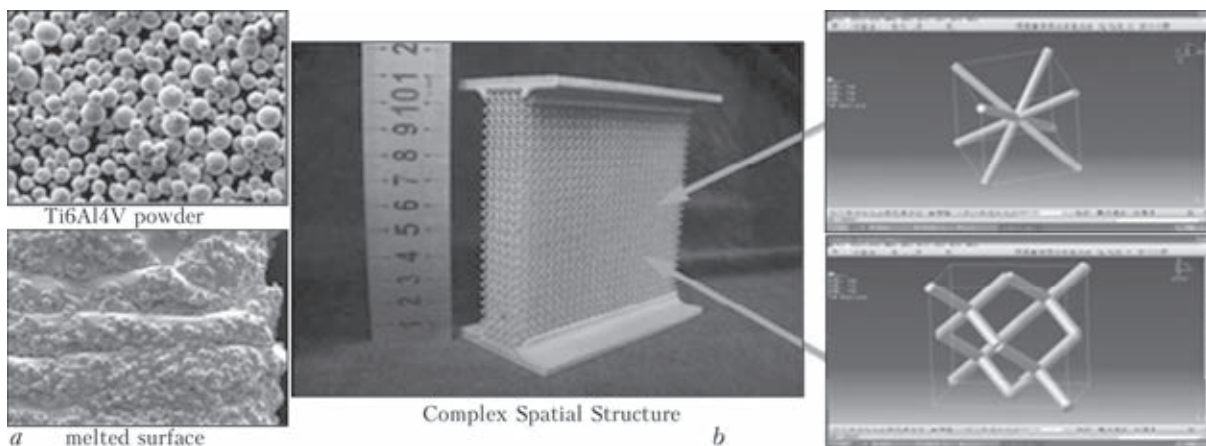


Figure 7. Add. Mfg. based on selective powder melting using EB, (a) Ti6Al4V powder and melted surface, uilt-up complex spatial structure

In vacuum chamber the wire fed to welding pool is melted by CAD controlled focused scanning electron beam, layer-by-layer deposition path is directed according to the CAD model (Fig.6a); a typical deposited titanium structural element after machining of 1000 mm×300 mm×200 mm is also shown in Fig.6b.

In the past few years, EB additive manufacturing titanium alloy wire composition system made to custom-order has been developed at BAMTRI to meet the required properties and structural performance. Technologies for deposition path control, parameter optimization, as well as post treatment are utilized to avoid possible emergence of imperfections and distortion. In general, mechanical properties of the deposited elements are compatible with forged parts.

Up to now the largest-sized facility for electron beam additive manufacturing with wire feeding system has been set up at BAMTRI. It is capable to fabricate structural elements with dimensions of 1500 mm/800 mm/3000 mm.

Additive manufacturing based on selective powder melting using electron beam is also implemented in a vacuum chamber. Metal powder spread on the powder bed is melted layer-by-layer by scanning electron beam following the CAD model paths.

In Fig.7 Ti6Al4V powder and melted deposition surface are shown (Fig.7a); in this way complex spatial structure (Fig.7b) can be built-up easily.

3.2. Additive manufacturing based on laser beam

Using laser beam, additive manufacturing could be implemented based on either direct laser melting deposition with coaxial feeding powder or selective laser melting with spread powder on bed layer-by-layer. Besides, laser beam additive manufacturing based on wire feeding is also explored at BAMTRI.

Fig.8 shows the universal laser beam additive manufacturing robot facility at BAMTRI for direct laser deposition melting, selective laser melting deposition as well as wire feeding laser melting deposition (chamber with dimension of 3 m×3 m×2.5 m).

Technological procedures for laser beam additive

manufacturing almost the same as for electron beam additive manufacturing. Material system with either wire or powder composition preparation made to custom-order also has been developed to meet the required properties and structural performance.

For more precise deposition forming (e.g. surface



Figure 8. Universal laser beam additive manufacturing robot facility at BAMTRI for direct laser melting, selective laser melting as well as wire feeding laser melting

roughness Ra: 10 ~ 30 μm), high performance laser beam, fine granulated powder layer thickness should be matched. Subsequently, it is undoubtedly logical that the as deposited parts will be the final products or just finished surface polishing is needed.

3.3. Generalized additive manufacturing based on block joining

For high performance aero-engine, the compressor weight reduction can be reached up to 50% if the traditional tenon joining of blades to disk can be replaced by blisk (blades to be welded to disk). Solid state additive manufacturing based on block joining by linear friction welding to produce integrated monolithic welded blisk is an effective tool for achieving the above mentioned idea.

Fig.9 exhibits the weight reduction for aero-engine tenon joining replaced by welded integrated monolithic blisk (Fig.9a) using linear friction welding (Fig.9b) as solid state additive manufacturing.

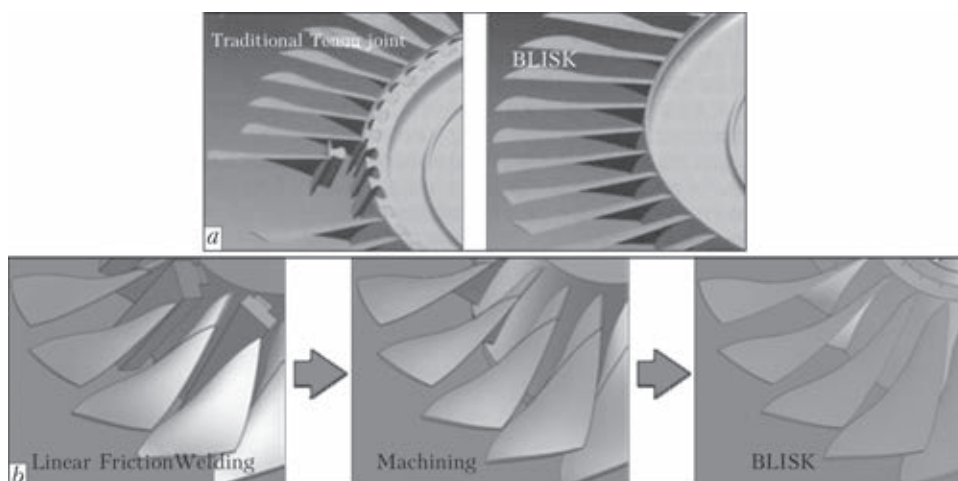


Figure 9. For aero-engine weight reduction (a) tenon joining replaced by (b) welded integrated blisk using linear friction welding as solid state additive manufacturing

Low effectiveness in material saving and time saving of traditional material removal reduction manufacturing based on machining & cutting is fully reflected on monolithic stiffened airframe panel fabrication. Nowadays Friction Stir Welding (FSW) turns the tide and brings about a radical change in the situation of block joining additive manufacturing of aluminum monolithic stiffened airframe panels. Stiffening ribs are assembled and welded to skin sheets using FSW for aluminum monolithic stiffened airframe panel fabrication. The name of solid state block joining additive manufacturing by FSW matches the reality.

In the case of titanium alloy, monolithic stiffened airframe panel fabrication can be achieved by block joining additive manufacturing using laser welding; titanium stiffening ribs are assembled and welded to titanium skin sheets using dual-beam laser robotic system as already shown in Fig.2.

3.4. Generalized additive manufacturing based on other energy sources

The variations of generalized additive manufacturing based on other applicable allied energy sources have been shown above in Fig. 5. As a typical application shown in Fig.10, an example is given to electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) for additive manufacturing of turbine blade with complicated inner cooling gas channeling. Technology and material composition of the blades made to custom-order for electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) are selected to match the required properties and structural performance. In the vacuum chamber either a single electron beam gun or multiple electron beam guns can be used to form the blades by depositing different materials. It is expected that EB-PVD will be full of promise in additive manufacturing of newly designed aero-engine parts.



Figure 10. Turbine blade with complicated inner cooling gas channeling to be fabricated by additive manufacturing using electron beam physical vapor deposition (EB-PVD)

Concluding remarks

In terms of market pull there is very strong interest in additive manufacturing (particularly using power beams: electron beam & laser beam) from the aviation industry, especially for airframe and aero-engine applications as strategically important. BAMTRI has been involved in a number of research programs for aviation companies to provide a rapid response in design and trial manufacturing of new products.

For generalized additive manufacturing other allied energy sources are also applicable such as electrical, chemical, electro-chemical, mechanical etc. Especially pile-up forming could also be performed applying block joining (e.g. friction welding) to produce directly integrated monolithic metallic structural elements including aero-engine blisks and airframe stiffened panels.

Generalized additive manufacturing based on block joining (particularly friction welding) offer the potential for solid-state joining to build up near net shape elements by assembling of relatively simple parts. BAMTRI has been developing this solid state additive manufacturing technology for aero-engine parts as well as for airframe stiffened panels fabrication, demonstrating high value applications in other industry sectors.

Received 21.02.2013



WELDING OR ADHESIVE BONDING – IS THIS A QUESTION FOR THE FUTURE?

U. REISGEN, M. SCHLESER

RWTH Aachen University, ISF Welding and Joining Institute, Germany. E-mail: office@isf.rwth-aachen.de

Modern light-weight structures are composed of most different materials. The joining of these materials with and among one another requires the application of different joining techniques with the focus on welding and adhesive bonding. In this paper, the advantages of both methods are discussed and possibilities for the combined application of welding and bonding techniques are presented. 5 Figures.

Key words: laser beam welding, plasma soldering, friction stir welding, adhesive bonding, steels, aluminium alloys, automotive car body, advantages of methods

Introduction

The joining technology is an interdisciplinary technology which allows the combination of parts which have most different geometries and which are consisting of a wide variety of materials towards complex structures and products.

Riveting has been the dominating joining technology of the 19th century. Numerous impressive structures serve as demonstration, for example, the Eiffel tower with more than 2.5 million rivets. In the course of the 20th century, riveted structures were increasingly replaced by welded structures. The production of welded structures is, on the one hand, economically more efficient and the structures have, on the other hand, a higher strength. Besides welding, the adhesive bonding technology is, nowadays, increasingly used for many applications.

A major advantage of welding compared with adhesive bonding is its advance of several decades in research and industrial application. The welding technology is for many joining tasks still the called-for method.

Particularly for thick-walled welded structures which are joined on butt joint, T-joint or cruciform joint, the application of the welding technique is unrivalled. In this field, also methods which are assumed to be out-of-date, such as electro-slag welding, can be applied with a high efficiency. Figure 1 depicts an impressive example.

For the manufacturing of a large press, a steel sheet structure has been chosen instead of a cast structure. The steel sheet structure was manufactured with particularly lesser quantities of material and was, thus, much more cost-favourable. However, this type of structure required to join the large-for-

mat steel plates with one another. Each plate had a thickness of several centimetres. As a standard welding technology for this task, multiple-pass submerged arc welding has been applied with a production duration of three up to four weeks just for the weld. The application of electroslag welding allowed a reduction of the welding time down to 14 hours, compare Figure 1.

In working with modern designs it is often not possible to apply just one welding method. They are often characterized by the use of many different materials such as different steel grades, aluminium or fibre reinforced plastic. This applies in particular to light-weight structures. The production of these applications requires the control over the entire band width of industrially available joining methods in order to identify and qualify the best solution for a specific design under specific production boundary conditions.

The complexity of this task can be clarified by the example of automotive car body design. In the following text this example is used to discuss the question which technology will prevail in the near future: adhesive bonding or welding technology.

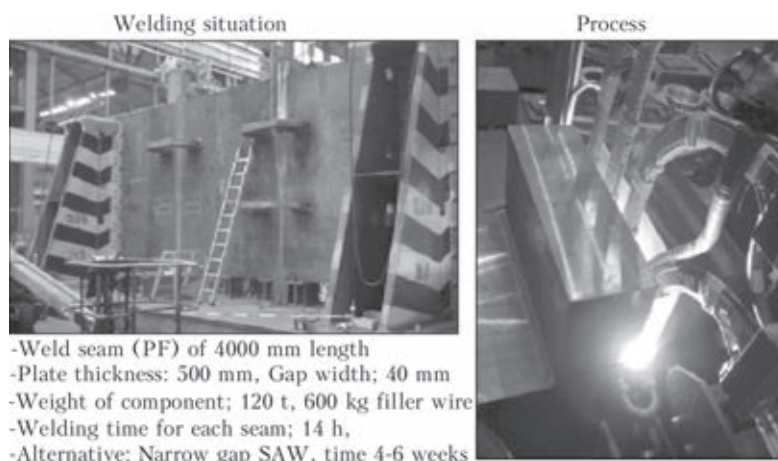


Figure 1. Electro slag welding of large components for presses

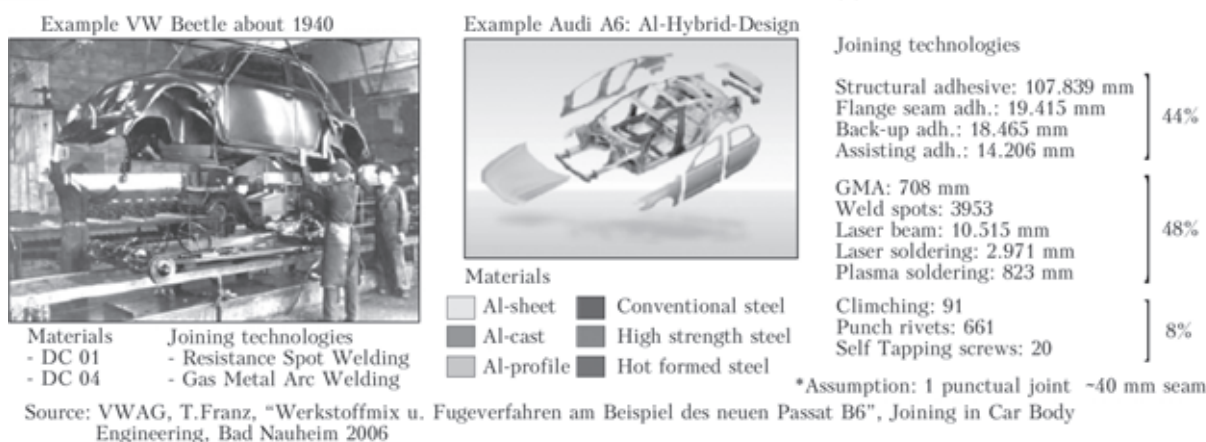


Figure 2. Conventional steel design (left) and modern aluminium-steel-hybrid design (right)

Requirements of modern light-weight structures to the joining technique, using the example of the vehicle body construction

In the beginning of the automobile large-scale production, complex structures such as the car body have been joined using a few simple welding methods. Figure 2 (left) shows the example of the car body of a VW beetle from the forties of the last century. The car body has almost exclusively been made using resistance spot welding, supplemented by gas metal arc welding to a small degree. This is, nowadays, unthinkable. Besides increased demands made to corrosion protection, strength and production speed, also the application of most different materials for a car body is, here, particularly responsible.

In the nineties of the last century, aluminium car bodies were to an increasing level introduced to the market and, as a consequence, also aluminium-steel hybrid design structures. Besides this, also pure steel bodies are, nowadays, in principle material mixed constructions. Other than in the car body of the VW beetle where mainly two steel sorts, DC 01 and to a certain degree also DC 04, have been used, modern steel car bodies are made of many different steels, such as deep-drawing steels, high and highest-strength steels and hot-formed steels. Besides this, also fibre-reinforced plastic materials are increasingly gaining in importance in the field of automotive car body construction.

From the perspective of joining, the following important challenges result:

1. Joining of materials which are difficult to weld, e.g. highest-strength steels with a defined micro-structure,
2. Joining of multi material-mixed compounds, e.g. steel-aluminium, steel-CFK,
3. Joining of complex geometries, e.g. combination of plates, profiles, sandwich.

These requirements can no longer be fulfilled with only one joining method. For the production of modern car bodies, therefore numerous joining methods are applied. Besides the established methods resist-

ance spot welding and arc welding, also "younger" welding methods such as laser beam welding, mechanical joining techniques such as clinch riveting and riveting also adhesive bonding are applied, compare Figure 2 (right).

Adhesive bonding vs. welding

Propelled by the request to apply also materials which are difficult to weld or even multi material compounds, research about alternative joining techniques has been promoted. The focus is, on the one hand, on the mechanical joining techniques and, on the other hand, on adhesive bonding. Both technologies are capable of low-heat joining of most different materials with one another.

Compared to the mechanical joining methods, adhesive bonding has several process-related advantages. Adhesive bonding allows the production of optically excellent, leakproof joints with a good corrosion protection and a favourable load transmission using a big joining area. In order to use the advantages also under the high requirements of automotive serial production, several generations of adhesive developments had been required. The most important developments comprise:

1. The washout resistance — modern car body adhesives are, also in the non-cured state, not washed out in the paint bath of the cathaphoretic immersion priming.

2. The oil tolerance — modern car body adhesives are capable to develop good adhesion also on oiled sheets. The expenditure for surface preparation is thus drastically reduced.

3. The crash resistance — modern car body adhesives do not suffer brittle failure despite high stiffness and strength. Through the embedding of elastic domains into the stiff matrix, the stress-strain diagram of the adhesives has, in the beginning, a high elastic modulus and transforms in the crash case on a high load level into a deformation plateau.

Due to these developments, the application of adhesive bonding technology in vehicle car body production has, meanwhile, become a standard. The



adhesive bonding technology is, thus, directly competing with the welding technology. When working with materials or material mixed compounds which are difficult to weld, the advantages of adhesive bonding will become obvious, also for laypersons. But also pure metal joints are, to an increasing degree, adhesively bonded.

As far as structural tasks are concerned, adhesive bonding is preferentially applied together with spot welding. Attention must be paid to the fact that the main loads are transmitted from the adhesive layer. From the point of mechanics, the weld spots are, above all, minimising the peel load which is unfavourable for adhesively bonded joints. The main reason for the application of spot welding is to guarantee a sufficient handling strength and stiffness of the car body during the production process for the period between adhesive application and adhesive curing.

Having the many advantages of adhesive bonding in mind, the question arises where the welding technology is superior to adhesive bonding. It applies to the joining of metal materials: Adhesive bonding requires a certain expanse in order to transmit the necessary forces. The strength of polymer adhesives is by at least one order of magnitude lower than the strength of metal materials. Especially in the case of only small flange widths or if plate geometries are not to be joined overlapping but on butt joint, the application of welding technology is recommendable. Welding allows, moreover, joining under high thermal load, a robust manufacturing process under rough conditions and the application of established repair concepts.

Furthermore recent developments in the field of welding meet the demands for low expenditure for devices, high productivity and lowest-possible influencing of the base material by a defined heat input. The latter is explained especially from the request to weld also light-weight materials, such as high-strength steels, aluminium or even mixed compounds with good joining properties.

In the field of arc welding, increasingly controlled short-arc processes are applied. Those processes are capable of a defined heat input and allow thus even the joining of aluminium and steel. In the field of laser technology, solid-state lasers which allow high production speed with, at the same time, excellent beam qualities, are applied to an increasing degree. Remote welding processes where the laser beam is deflected via a scanner system with extreme speed, allow meanwhile to achieve welding speeds of up to 20 m/min almost without downtime. For the joining of heat-susceptible materials which lose their good properties permanently through fusion welding, meanwhile joining technologies are used which are capable of working below the fusion temperature, for example ultra-sonic welding or friction stir welding.

Figure 2 makes clear that welding technologies, to a certain degree also mechanical joining methods and also the adhesive bonding technology all have their place with good cause. If sufficient flange areas are provided and especially if materials which are difficult to weld and material compounds are to be joined, the increasing degree of application of adhesive bonding is anticipated.

Since the advantages of both methods are well complementing one another, it is an interesting question whether, in future, better combination possibilities may be found for both technologies. A good example for a successful implementation of this idea is the above-mentioned resistance spot welding adhesive bonding.

Adhesive bonding + welding

In resistance spot weld adhesive bonding, welding and adhesive bonding are combined within one joining zone. While the adhesive bonding guarantees high strength values, stiffness and a good corrosion protection, the resistance spot welding provides above all for the minimising of the peel load and for a high initial strength immediately after the joining process.

The ISF Welding and Joining Institute at RWTH Aachen University (ISF) is working intensely on the development of further possibilities for combining welding and adhesive bonding. Thus, among others, the combination of laser beam welding and adhesive bonding and also the combination of friction stir welding and adhesive bonding have been developed and investigated. Both methods will be presented in the following.

Laser beam welding + adhesive bonding

Laser beam welding allows the production of high-quality welded seams with a small heat affected zone at high production speeds. Besides the high investment costs for an industry-standard laser including safety devices, the required clamping devices for a specific joining task represent a substantial cost factor.

In cooperation with the TU Braunschweig together with partners from industry, the ISF has combined the processes laser beam welding with adhesive bonding. While in spot weld adhesive bonding, the bonded seam carries the main load and the weld spots serve mainly for the fixation, it is, here, the opposite. The used adhesives are pressure-sensitive adhesives. These allow the immediate fixation without requiring additional mechanical devices. Since it is not possible to weld straight through the adhesive layer, the advantage of easy and inexpensive clamping comes with larger flange widths, because a certain minimum distance between adhesion and welding must be maintained, compare Figure 3.

Besides the fixation, there are also technical advantages as far as the welding process itself is con-

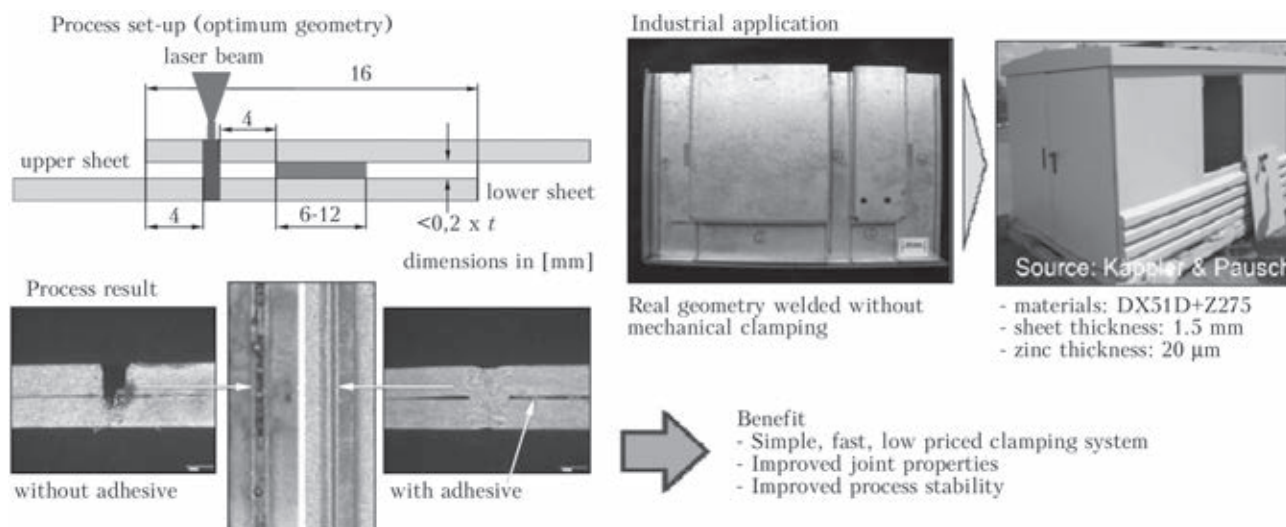


Figure 3. Laser beam welding combined with adhesive bonding

cerned. During the welding of galvanised sheets with overlap joint, the degassing zinc layer often results in pores in the weld if the sheets are pressed firmly together. To avoid this problem a gap has to be provided between the plates which is so small that the reliable running of the welding process is ensured and which is, on the other hand, so large that the zinc layer is still capable to degas reliably. Gap measures of $0,2 \times$ plate thickness have proven to be recommendable. The clamping of plates with a defined gap measure is extremely complex and requires expensive preparation in terms of clamping devices. Here, the combined process offers the ideal preconditions since, via the adhesive layer thickness, it is possible to comfortably set the degassing gap without any additional expenditure.

Accordingly, very good weld qualities are achieved. The advantages of the degassing gap and of the reduced expenditure for clamping are, especially in the joining of galvanised sheets for small-scale production, outweighing the disadvantages of the larger flange widths and the expenditure for the additional application of the adhesive bonding technology.

It has, thus been possible to industrially implement this technology already during the first research project which has been dealing with this subject.

Friction stir welding + adhesive bonding

Based on the successful implementation, the idea has been transferred to friction stir welding. In friction stir welding, tools with a pin and a tool shoulder are used. These tools are set into rotation, subsequently the pin is dipping into the workpiece until the tool shoulder is reaming over the workpiece surface. Via the mechanical rotation and the developing frictional heat, the material is stirred with one another below melting temperature and firmly bonded. Process-related, very high forces are developing which, normally, require clamping devices close to the joining point with high forces. Otherwise, there is the risk of plate warping, Figure 4 (right).

The application of the combined process allows to weld almost completely without mechanical clamping technology. It is from a technical point of view, moreover, possible to join thinner plates due to the lateral load transmission. It is even possible to weld directly through the adhesive layer.

The applied pressure-sensitive adhesives are, at that, pushed out and high-quality welded seams are developing, Figure 5. The strength values of the base material are almost achieved.

Further advantages, such as reduced cranny corrosion are to be expected and are subject to current research work.

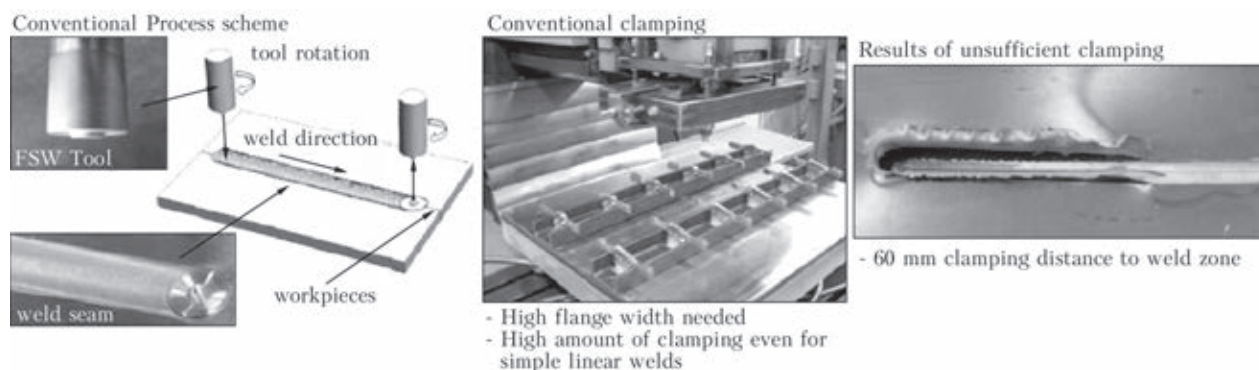


Figure 4. Conventional friction stir welding

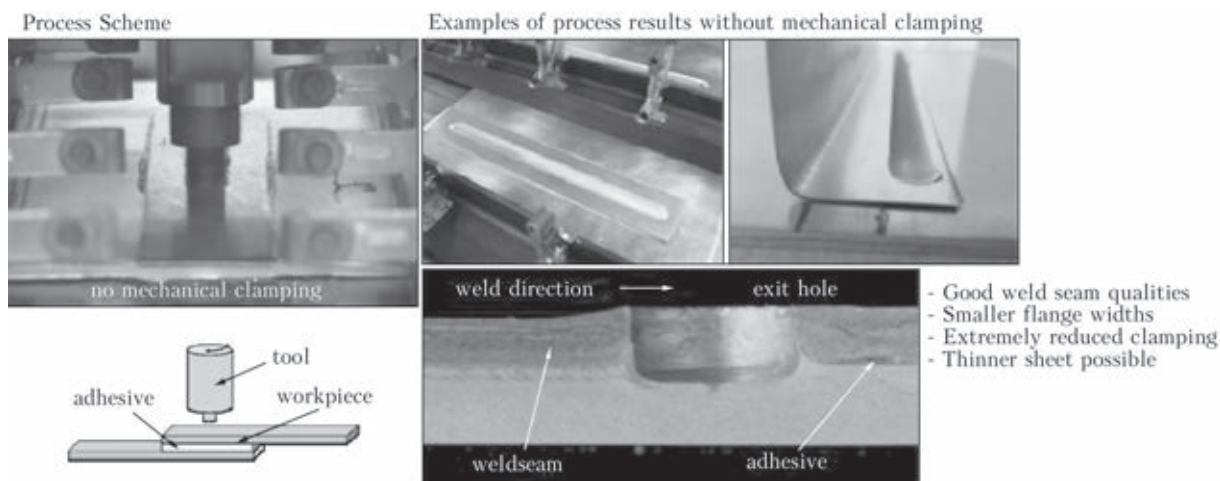


Figure 5. Friction Stir Welding combined with adhesive bonding

Conclusion

Using the example of automotive car body manufacturing, the application fields of the technologies of adhesive bonding and of welding have been discussed. The application of the welding technology is preferentially used for metal joints, particularly if only small flange widths are available, plates are to be butt-jointed, high application temperatures are prevailing or if immediate strength under demanding production conditions is required. If sufficient adhesive surface is available, the adhesive bonding technology, on the other hand, allows the low-heat joining of most different materials with excellent mechanical properties. It is thus possible to join steels, aluminium alloys and fibre-reinforced plastic materials with most different properties without loss of strength in the base material. The application of the adhesive bonding technology is due to the increasing applica-

tion of multi material mixed compounds currently also strongly on the rise.

Hybrid technologies which combine the advantages of both methods in one joining zone are particularly advantageous. Besides the already established resistant spot weld adhesive bonding, the ISF Welding and Joining Institute at the RWTH Aachen University has been developing also other process combinations. The combination of adhesive bonding with laser beam welding as well as with friction stir welding was presented. Both of them offer, besides technical advantages, a considerable economical potential through the minimisation of the required clamping technique.

It can already be stated today, that the combined approach between adhesive bonding and welding holds great potentials for future developments.

Received 06.07.2013



RECENT ADVANCES IN THE QUANTITATIVE UNDERSTANDING OF FRICTION STIR WELDING

A. De¹ and T. DebRoy²

¹ Indian Institute of Technology, Bombay, India

² The Pennsylvania State University, University Park, USA. E-mail: amit@iitb.ac.in

Friction stir welding (FSW) is a relatively new welding process and its comprehensive understanding is still developing. While the process is commercially used for aluminum and other soft alloys, its commercial application for the welding of hard alloys will require development of cost-effective and durable tools. Here we review the recent progress made in numerical modeling heat transfer and material flow with particular emphasis on optimizing tool dimensions and selection of welding conditions for maximizing tool durability. 22 Ref., 6 Figures.

Key words: friction stir welding, numerical modeling, heat transfer, material flow, welding conditions, tool durability

Introduction

In the last two decades, the applications of friction stir welding (FSW) in aerospace, shipbuilding, transportation and other industries have grown significantly, particularly for the welding of aluminum and other soft alloys [1–3]. General reviews of the FSW process are available in the literature [1–3]. Because melting of the parts is avoided, the process offers several important benefits compared to the conventional fusion welding processes. As a result, there is considerable commercial interest in the friction stir welding of steels and other hard alloys [4–6]. The FSW process involves several simultaneous physical phenomena that affect the durability of the tool and the structure and properties of the welded material. Heat is generated due to both the interfacial friction between the tool and the work piece and the plastic deformation of work piece material. The work piece material is softened close to the tool and the plasticized material flows due to rotation and the linear movement of the tool.

FSW is a relatively new process, and because of the complexity of the process a comprehensive understanding of the process is still evolving [7–13]. Therefore, it is useful to undertake a review of the current status of quantitative understanding of the process. Here we review our recent research on numerical modeling of heat transfer and material flow in FSW and how it can be used for the solution of two important contemporary problems. First, the application of the heat transfer and material flow model to estimate the optimum tool dimensions is discussed. Second, we show that the model can be used to enhance longevity of the FSW tools, particularly for the welding of hard alloys.

Optimum shoulder diameter

The diameter of the tool shoulder is important because the shoulder generates most of the heat, and its

grip on the plasticized material largely establishes the material flow field [14, 15]. Both the heat generation rate and the material flow are important for the FSW process. With the increase in the shoulder diameter, the temperature increases and the work piece material is softened. For a good FSW practice, the material should be adequately softened for flow, the tool should have adequate grip on the plasticized material, and the total torque and power should not be excessive [15]. Experimental investigations have shown that only a tool with an optimal shoulder diameter results in the highest strength of the AA6061 FSW joints [16]. Although the need to determine an optimum shoulder diameter has been recognized in the literature, the search for an appropriate principle for the determination of an optimum shoulder diameter is just beginning [14, 15].

We recently proposed [14, 15] a method to determine the optimal shoulder diameter for the FSW of aluminum alloys by considering the sticking (M_T) and sliding (M_L) components of torque. The main engine for the calculations is a steady three dimensional heat transfer and material flow model which was validated for friction stir welding of aluminum alloys, steels and a titanium alloy [7, 8, 10]. The torques were calculated based on the tool geometry, flow stresses in work piece, and the axial pressure (P_N) as [14, 15]

$$M_T = \oint_A r_A \times (1 - \delta) \tau \times dA \quad (1)$$

$$M_L = \oint_A r_A \times \delta \mu_f P_N \times dA \quad (2)$$

where r_A is the distance of any infinitesimal area element, dA , in work piece material from the tool axis, δ and μ_f are spatially variable fractional slip and coefficient of friction between the tool and the work piece, respectively, and τ is the shear stress at yielding. The



tool rotation speed and the radial distance from tool axis affect the local values of d and m_f . The total torque, M is the sum of sticking and sliding torques. The required spindle power (P) can be calculated from the total torque as [14]:

$$P = \oint_A \left\{ (1 - \delta) \tau + \delta \mu_f P_N \right\} \omega r_A dA \quad (3)$$

where ω refers to the angular speed in rad/s.

Figure 1 shows that for the FSW of AA6061, the sliding torque continuously increases with shoulder diameter because of the larger tool-work piece interfacial area. However, the sticking torque increases, reaches a maximum and then decreases. This behavior can be understood from equation (1) that includes the two important factors that affect the sticking torque. First, with the increase in shoulder diameter—the area, A , increases, the temperature rises and the shear stress at yielding, τ , decreases. The product of these two opposing factors lead to a maximum value of sticking torque in the plot of sticking torque versus shoulder diameter. This value of sticking torque indicates the maximum grip of the shoulder on the plasticized material [14, 15]. The calculated results show that any further increase in the shoulder diameter will result in decreased grip of the tool on the plasticized material, higher total torque and higher spindle power requirement. For these reasons, the optimum shoulder diameter should correspond to the maximum sticking torque for a given set of welding parameters and work piece material [14, 15].

Figure 2 shows the variation of sticking torque with shoulder diameter for various tool rotational speeds for the FSW of 7075 aluminum alloy. The shoulder diameter at which the maximum sticking torque is attained depends on tool rotational speed—when all other welding variables are maintained constant. For the rotational speeds indicated in the figure, the optimum values of the shoulder diameter are in the 20 to 30 mm range for the various parameters used in the experiments. Since the 7075 alloy is harder than the 6061 aluminum alloy, the computed larger optimum shoulder diameters compared with those estimated for the FSW of 6061 is consistent with the larger heat demand for the FSW of 7075 alloy. The results show that the principle of optimizing shoulder diameter by maximizing tool's grip on the plasticized material can be applied to different alloys. Since tool durability and cost-effectiveness are crucial issues for successful commercial application of FSW to steels and other hard alloys, a general principle for the optimum design of shoulder diameter based on scientific principle such as the one discussed here is important.

Pin geometry

Since tool pins often fail during welding of hard alloys, a systematic investigation of the various tool materials and their load-bearing abilities are impor-

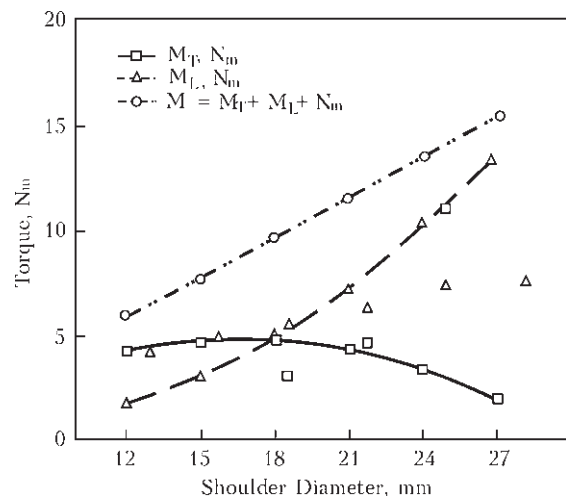


Figure 1. Variation in sliding (M_L), sticking (M_T) and total torques with shoulder diameter for FSW of 6 mm thick AA6061 at a tool rotational speed of 1200 rpm and welding speed of 1.25 mm/s [15]

tant [17]. In particular, the pin being the structurally weakest section of the FSW tool, an estimation of the load bearing ability of the tool pin is required for efficient functioning of the FSW process. Although some measurements and calculations of the forces on the tool have been reported in the literature, a procedure to calculate the load bearing ability of the tool pins of different shapes is of interest [18, 19]. Such a methodology has been discussed recently based on the calculation of maximum stresses experienced by the tool pin resulting from a combination of torsion due to torque and bending due to traverse force [18, 19].

Figure 3(a) shows a schematic force distribution, $q(z)$, on a straight cylindrical tool pin in FSW. It can be noted that the force distribution, $q(z)$ would be in a direction opposite to the welding direction. Figure 3(b) depicts a transverse cross-section of the tool pin along S-S in Fig. 3(a). The bending moment (M_y) experienced at any point A on the tool pin profile can be

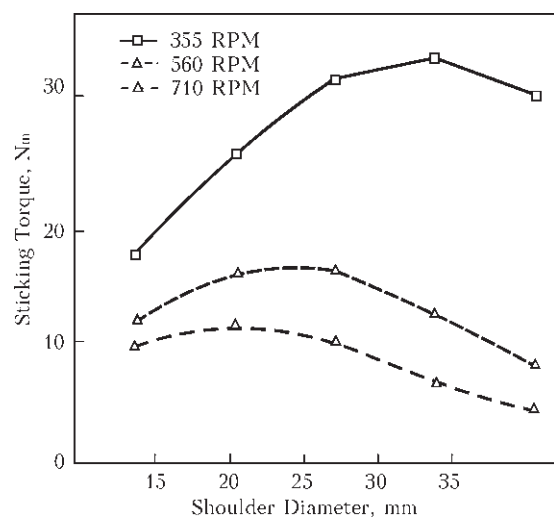


Figure 2. Variation of sticking (M_T) torque with shoulder diameter for FSW of 3.5 mm thick AA7075 at a welding speed of 0.67 mm/s [14]

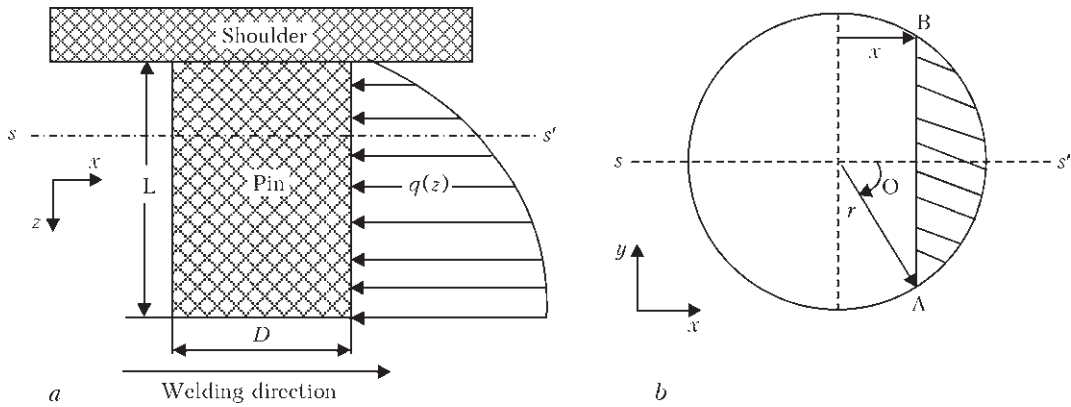


Figure 3. (a) Schematic distribution of force on a typical straight cylindrical tool pin and (b) cross-section of pin profile along section S-S.18

estimated as [18]:

$$M_y = \int_{z_1}^L z q(z) dz \quad (4)$$

where L is the length of pin, z_1 is the distance of the point A from the root of the pin, $q(z)$ is the force on an infinitesimal part, dz , of the pin at a distance $(z+z_1)$ from the root of the pin. The normal stress due to bending, s_B , and the shear stress due to torsion, t_T , and also due to bending, t_B , on any point A on the pin profile can be estimated further as [18]:

$$\sigma_B = \frac{M_y x}{I_{yy}} \quad (5)$$

$$\tau_T = \frac{M_T r}{J_z} \quad (6)$$

and

$$\tau_B = \frac{VQ}{I_{yy}g} \quad (7)$$

where I_{yy} and J_z are the second moment and polar moment of inertia for the pin structure, respectively, M_y and M_T are the bending moment and sticking torque, respectively, V is the shear force and Q is the first moment of inertia of the section beyond chord AB (in Fig. 3b) about the neutral axis, x is the normal distance between the neutral axis and the chord AB, r is the pin radius and g is the length of the chord AB. These components of stresses can be used to compute the resultant maximum shear stress, t_{MAX} , experienced by the tool pin as [18]

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_B}{2}\right)^2 + (\tau_B + \tau_T \sin \theta)^2 + (\tau_T \cos \theta)^2} \quad (8)$$

It follows that t_{MAX} times a safety factor, f , should be lower than the shear strength of the tool material at the prevailing working temperature to avoid premature shear failure of the tool pin in the operating range of process parameters. The pin length depends on the thickness of the work piece. The geometry of the pin must be determined based on its load bearing ability, i.e., the ability to withstand the maximum shear stress.

The traverse force on the pin increases with increase in the pin length as shown in Fig. 4. As the plate thickness increases, pins of longer lengths are required. A longer pin experiences higher resultant maximum shear stress and a larger cross-sectional area of the pin becomes necessary to avoid pin failure. However, as the pins of large diameters move forward, plasticized alloys must fill up the void space left behind by large pins. Any disruption of the flow of plasticized material or a small reduction in temperature will enhance the occurrence of defects such as worm-holes. The traverse force on the tool can be measured using a dynamometer, and the values can be used to monitor defect formation during FSW because the large forces indicate sluggish material flow. Thus, the lower limit for the tool pin diameter can be prescribed from the calculation of the maximum shear stress on the tool pin and the upper limit for the pin diameter can be estimated considering the weld quality.

The load bearing abilities of pins with circular, square and triangular cross-sections have been compared¹⁹ under similar welding conditions. For compar-

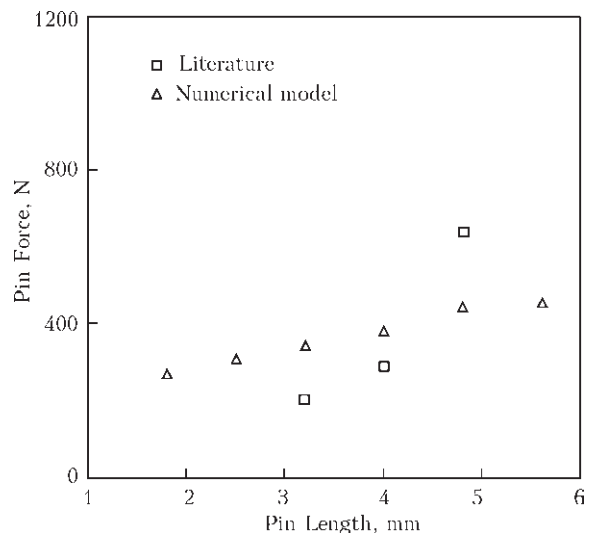


Figure 4. A comparison of computed and corresponding estimated values of traverse force on tool pin in FSW of AA6061 at tool rotational speed of 650 RPM, welding velocity of 3.33 mm/s and pin diameter of 7.6 mm [18, 20]

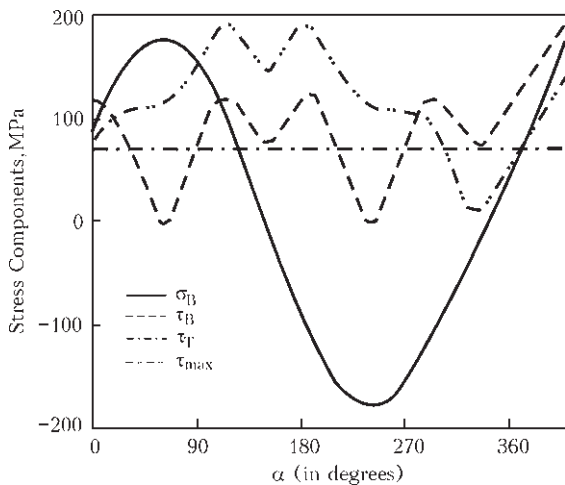


Figure 5. Variation of fluctuating stress components — normal stress for bending, σ_B , shear stress due to bending, τ_B , shear stress due to torsion, τ_T , and the maximum shear stress, τ_{max} for one complete rotation of the tool during FSW of AA7075-T6 using triangular pin profile [19]

ison of the three cross-sections, the triangular cross section is considered to be of equilateral shape and the triangular and the square cross-sections are considered to have dimensions that fit within the circular pin profile. It is found that the lowest and the highest values of the maximum shear stress are experienced by the circular and the triangular pin cross-sections, respectively. During one complete rotation, the triangular pin cross-section experiences the largest fluctuation of the maximum shear stress followed by the square and the circular pin profiles. Figure 5 shows the typical fluctuation of various stresses during rotation expressed as a function of angle with the welding direction. The large fluctuation of maximum shear stress during rotation makes the triangular cross section susceptible to fatigue failure.

Durability of FSW Tool

Since the tool pin is structurally the weakest section of FSW tool, its degradation due to plastic deformation or wear as well as its ability to withstand the torsion and bending stresses are of significant concern. A review of the currently used and potential tool materials is available in the literature [17]. The material to be used for FSW tool should be cost effective and have high strength, hardness and good toughness, and high melting and softening temperatures [17]. Furthermore, the geometry of the tool pin for a given material should also be assessed for its low susceptibility to premature failure for various values of FSW variables. Recently, a tool durability factor has been proposed that can indicate whether the thermo-mechanical environment experienced by a tool pin for a given FSW condition is safe enough to avoid a premature shear fracture [21, 22]. The tool durability factor does not consider vibration and other abrupt causes of tool degradation. However, the progressive degradation of the tool pin may be minimized by focusing on the relative severity of maximum shear stress it experiences for various welding conditions. The tool durability factor is defined as the ratio of the shear strength of the tool material at the peak temperature and the resultant maximum shear stress experienced by the tool pin due to bending and torsion.

Figure 6 shows a typical tool durability map for various tool shoulder radius and rotational speed for the FSW AA7075 alloy. A comparison of the solid and dashed lines in Fig. 6(a) shows how the tool durability index or the factor of safety for the tool pin changes with the change in plate thickness. During FSW of thick plates, there is considerable decrease in temperature away from the tool shoulder and the pin encoun-

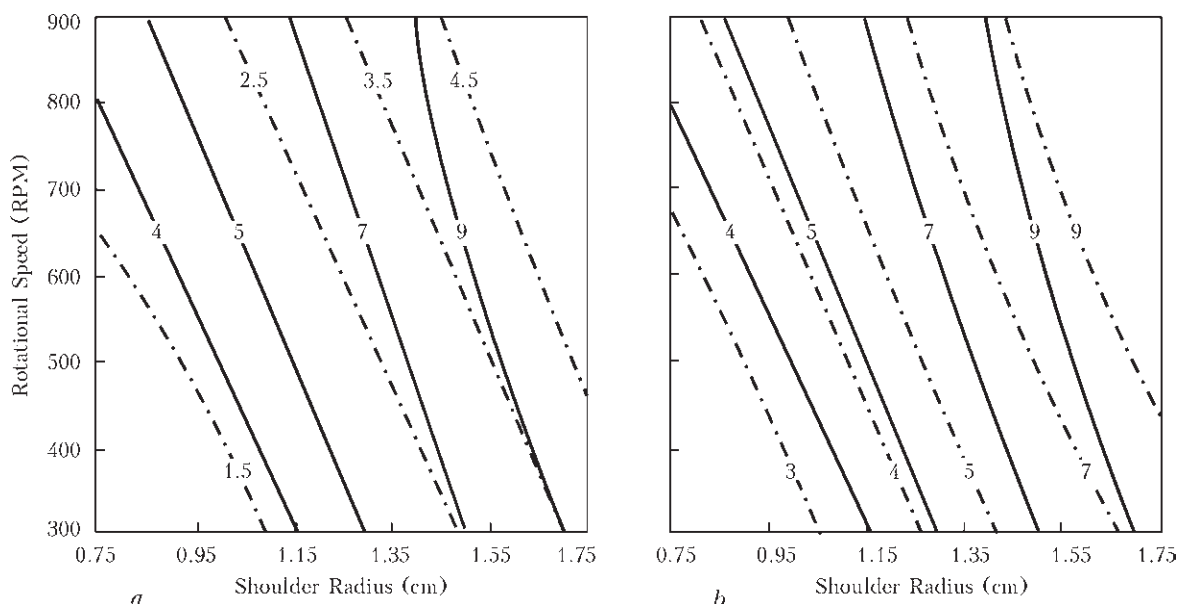


Figure 6. Tool durability indices as function of shoulder radius and rotational speed in FSW of AA 7075 using a tool pin diameter of 4 mm and axial pressure of 18 MPa. (a) shows the effect of plate thickness with the solid and dashed lines referring to thinner (2.9 mm) and thicker (5.7 mm) plates, respectively, at a welding speed of 1.0 mm/s, (b) shows the effect of welding speed with the solid and dashed lines depicting the lower (1.0 mm/s) and higher (4.5 mm/s) speeds, respectively for a plate thickness of 2.9 mm [22]



terscooler and stronger workpiece material near the lower part of the pin. As a result, tools encounter large stresses during welding of thick plates and the tool durability decreases with increase in plate thickness. Similarly, a comparison of the solid and the dashed lines in Fig. 6(b) shows that an increase in welding speed reduces the value of tool durability index. Similarly an increase in the welding speed reduces the rate of heat generation per unit length of weld resulting in relatively colder material around the tool pin. As a result, the tool durability index decreases with increase in welding speed.

Concluding remarks

Because FSW is a new and complex process, its comprehensive understanding is still developing. Unlike other welding processes, its existing knowledge base cannot be relied upon for solving important contemporary problems such as extending its reach to harder materials such as steels and titanium alloys. Well tested heat transfer and material flow models provide a recourse to address the important issues based on solid scientific principles. The examples reviewed here show how the quantitative understanding of heat transfer and material flow offer new insights about optimizing tool design. Both the optimization of shoulder diameter and the consequences of alternative tool pin shapes can be examined based on well tested numerical models. In the past, the sophisticated numerical models of heat transfer and materials flow in welding have not been widely used in industry. In recent years, the modeling results for FSW have been presented as easy to use process maps, enabling practicing engineers to select welding conditions based on scientific principles to extend tool life. Apart from revealing significant insight about the FSW process, the numerical models of heat transfer and materials flow can also provide significant competitive technological advantage.

1. Mishra, R.S., Ma, Z.Y. (2005) Friction stir welding and processing. *Mater. Sci. Eng. R*, 50(1/2), 1–78.
2. Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. (2008) Recent advances in friction-stir welding — process, weldment structure and properties. *Prog. Mater. Sci.*, 53(6), 980–1023.
3. Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R. et al. (2009) Withers: Friction stir welding of aluminum alloys. *Int. Mater. Rev.*, 54(2), 49–93.
4. Bhadeshia, H.K.D.H., DebRoy, T. (2009) Critical assessment: friction stir welding of steels. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 14(3), 193–196.
5. DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. (2010) Friction stir welding of dissimilar alloys — a perspective. *Ibid.*, 15(4), 266–270.
6. Heideman, R., Johnson, C., Kou, S. (2010) Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding. *Ibid.*, 15(7), 597–604.
7. Nandan, R., Roy, G. G., DebRoy, T. (2006) Numerical simulation of three-dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding. *Metallurgical and Materials Transact. A*, 37A, 1247–1259.
8. Nandan, R., Roy, G. G., Lienert, T. J. et al. (2007) Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. *Acta Materialia*, 55, 883–895.
9. Colegrove, P. A., Shercliff, H. R., Zettler, R. (2007) A model for predicting the heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 12(4), 284–297.
10. Nandan, R., Lienert, T. J., DebRoy, T. (2008) Toward reliable calculations of heat and plastic flow during friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy. *Int. J. of Materials Research*, 99(4), 434–444.
11. Arora, A., Nandan, R., Reynolds, A. P. et al. (2009) Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments. *Scr. Mater.*, 60, 13–16.
12. Arora, A., Zhang, Z., De, A. et al. (2009) Strain and strain rates during friction stir welding. *Ibid.*, 61, 863–866.
13. Arora, A., DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. (2011) Back of the envelope calculations in friction stir welding — velocities, peak temperature, torque, and hardness. *Acta Mater.*, 59(5), 2020–2028.
14. Mehta, M., Arora, A., De, A. et al. (2011) Tool geometry for friction stir welding-optimum shoulder diameter. *Metall. Mater. Transact. A*, 42A(9), 2716–2722.
15. Arora, A., De, A., DebRoy, T. (2011) Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter. *Scripta Mater.*, 64(1), 9–12.
16. Elangovan, K., Balasubramanian, V. (2008) Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Mater. Des.*, 29(2), 362–373.
17. Rai, R., De, A., Bhadeshia, H.K.D.H. et al. (2011) Review: friction stir welding tools. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 16(4), 325–342.
18. Mehta, M., Arora, A., De, A. et al. (2012) Load bearing capacity of tool pin during friction stir welding. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 61, 911–920.
19. Mehta, M., De, A., DebRoy, T. (2013) Probing load bearing capacity of circular and non-circular tool pins in friction stir welding. In: *Proc. of 9th Int. Conf. on «Trends in Welding Research»* (Chicago, USA, June 04-08, 2012) 563–571.
20. Sorensen, C. D., Stahl, A. L. (2007) Experimental measurement of load distribution on friction stir weld pin tools. *Metall. Mater. Transact. B*, 38B, 451–459.
21. Manvatkar, V. D., Arora, A., De, A. et al. (2012) Neural network models for peak temperature, torque, traverse force, bending stress and maximum shear stress during friction stir welding. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 17(6), 460–466.
22. DebRoy, T., De, A., Bhadeshia, H.K.D.H. et al. (2012) Tool durability maps for friction stir welding of an aluminum alloy. *Proc. of the Royal Society A*, 468, 3552–3570.

Received 21.06.2013



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ СВАРКИ

И. В. ГОРЫНИН

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». РФ. 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

Рассмотрена ретроспектива сотрудничества ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» с ИЭС им. Е.О.Патона в области создания особо надежных металлических материалов и промышленных технологий для специальной техники, разработки покрытых электродов, агломерированных флюсов, порошковых проволок, сварочных технологий и оборудования. Был использован единый подход к разработкам технологии металлургии и сварки с конечной целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности создаваемых на основе новых материалов современных конструкций. Отмечены совместные работы по оценке сопротивления материалов хрупким разрушениям, развитию методов оценки циклического ресурса сварных конструкций, совершенствованию методик сертификационных испытаний металла. Табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: инновационные технологии, конструкционные стали, сварочные материалы, эксплуатационная надежность, нанотехнологии и наноматериалы, сотрудничество

Совместные работы с ИЭС им. Е. О. Патона в советские годы и в постсоветский период положили начало научным направлениям работ, которые получили свое дальнейшее развитие в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» при создании особо надежных материалов и промышленных технологий для специальной техники, эксплуатирующейся в экстремальных условиях. Наиболее значимые из них посвящены разработкам технологий электрошлакового переплава (ЭШП) высокопрочных свариваемых сталей, созданию высококачественных сварочных материалов, а также обеспечению эксплуатационной надежности крупногабаритных сварных конструкций.

Способ ЭШП разработан в начале 70-х годов прошлого столетия совместно учеными Института электросварки им. Е. О. Патона, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ЦНИИ ЧМ им. И. П. Бардина и специалистами металлургических заводов Украины. Основная задача, требовавшая решения — повысить металлургическое качество и исключить анизотропию свойств толстолистового проката из высокопрочных сталей для предотвращения хрупких разрушений. Новая технология позволила существенно снизить содержание серы, кислорода,

неметаллических включений (рис. 1); обеспечить 2-3-кратное повышение значений пластичности и ударной вязкости (табл. 1); снижение критических температур хрупкости, повышение сопротивления распространению трещины; максимально ограничить содержание углерода, регламентировать содержание легирующих элементов в узких пределах.

Это позволило расширить сортамент и обеспечить производство крупногабаритного листового проката, высокую равномерность структуры и механических свойств по площади крупногабаритного листа и в направлении его толщины, улучшить свариваемость и повысить стабильность механических свойств в зоне термического влияния сварных соединений. Практически сталь превратилась в изотропный материал.

Переход российских предприятий на рыночные отношения потребовал новых способов выплавки — с применением комплекса внепечной обработки (внепечного рафинирования и вакуумирования). Опыт использования технологии ЭШП позволил перейти на принципиально новую схему производства металла, не уступающего по качеству металлу, получаемому ЭШП (табл. 1). Отметим, что способ ЭШП позволяет получать новые продукты, разрабатываемые в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», высокого качества (например, при производстве азотистых сталей).

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ИЭС им. Е. О. Патона проводились работы по соз-

Таблица 1. Механические свойства высокопрочных сталей

Способ выплавки	δ_5 , %	ψ , %	KCV , Дж/см ²	ψ_z , %
ЭШП	17,0...21,5	64...70	128...300	50...55
Внепечное рафинирование	17,0...20,5	64...68	124...235	40...55

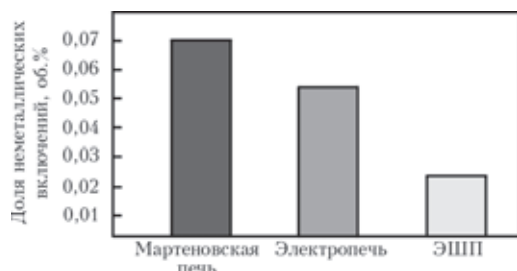


Рис. 1. Содержание неметаллических включений в высокопрочной стали различной выплавки

© И. В. Горынин, 2013



Таблица 2. Эксплуатационные характеристики металла шва при сварке порошковых проволок

Марка порошковой проволоки	R_m , МПа	R_{σ} , МПа	A_5 , %	KV , Дж
48ПП-8Н	510...650	440...480	22...28	75...90 (-20 °С)
48ПП-11Н	610...770	500...530	20...24	60...80 (-40 °С)
ПП-СВП1	650...710	500...550	23...27	75...90 (-40 °С)
48ПП-10Т	545...560	460...480	22...25	60...80 (-60 °С)

данию сварочных покрытых электродов, агломерированных флюсов для автоматической сварки, порошковых проволок малого диаметра, а также разрабатывали сварочные технологии и оборудование. Новые перспективные сварочные материалы создаются на основе оптимизации систем легирования, микролегирования и модифицирования металла шва для обеспечения требуемой работоспособности сварных соединений (в том числе при отрицательных температурах), высокой свариваемости и трещиностойкости.

Созданы новые высокотехнологичные порошковые проволоки малых диаметров для сварки сталей с пределом текучести от 360 до 550 МПа, по уровню эксплуатационных характеристик не уступающие лучшим зарубежным аналогам и разработана промышленная технология их изготовления (табл. 2).

Серия разработанных покрытых электродов флюоритно-кальциевого типа позволяет обеспечить низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, стабильно высокие эксплуатационные характеристики, заданный уровень прочностных и пластических свойств металла шва при сварке хладостойких сталей.

Для автоматической сварки под флюсом разработаны агломерированные флюсы в сочетании с различными проволоками, обеспечивающие комплекс необходимых служебных характеристик. Промышленное изготовление флюсов освоено на производственной базе ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», рис. 2. Отличительной особенностью разработанных флюсов является их высокая конкурентоспособность, базирующая на высокой технологичности процесса сварки и приемлемой стоимости.

Разработана принципиально новая технология изготовления сварочного флюса при помощи лазерного гранулирования, позволяющая обеспечить: низкую гигроскопичность флюса; возможность раскисления, легирования и модифицирования металла шва через флюс; низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, а также относительно высокую прочность гранул флюса. Внедрение нового флюса в производство позволяет снизить температуру предварительного и сопутствующего подогрева при сварке; выполнять сварку высокопрочных сталей с пределом текучести более 800 МПа; значительно повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений.

Широко используемая в трубной промышленности многодуговая сварка под флюсом разра-

ботанными новыми сварочными материалами при внедрении ее в судостроении позволяет значительно повысить производительность труда и максимально автоматизировать производственный цикл изготовления плоских секций.

Высокопроизводительная электрогазовая сварка по целевой разделке до настоящего времени является непревзойденной при сварке пазовых швов конструкций из высокопрочных сталей. Приведенная технология обеспечивает возможность сварки высокопрочных сталей без предварительного подогрева низколегированными проволоками, высокие качество металла сварных соединений и производительность процесса.

В период сотрудничества ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и ИЭС им. Е. О. Патона применялся единый подход к разработкам технологий металлургии и сварки. Целью разработок являлось не только создание новых материалов, но и обеспечение высокой эксплуатационной надежности создаваемых из этих материалов конструкций. Поставленная цель требует решения трех задач: разработки научно обоснованных требований к материалам, их всесторонней сертификации, а также работ, направленных на «подгонку» конструкции к материалу. Для решения первой и третьей задач необходима разработка расчетных методов оценки прочности и ресурса, из которых должны происходить как обоснования требований к материалу, так и обоснования требований к конструкции сварных узлов.

Для обеспечения надежности конструкций, работающих в арктических условиях, актуальна разработка методики оценки сопротивления хрупкому разрушению. Ее задачей является не только определение требований к хладостойкости металла сварных соединений, но и к эффективности и объемам неразрушающих методов контроля. Именно такую «обратную» задачу пришлось решать, оценивая возможность эксплуатации в арктических условиях конструкции, изготовленной для более высоких расчетных температур.



Рис. 2. Технологическая линия для производства агломерированных флюсов

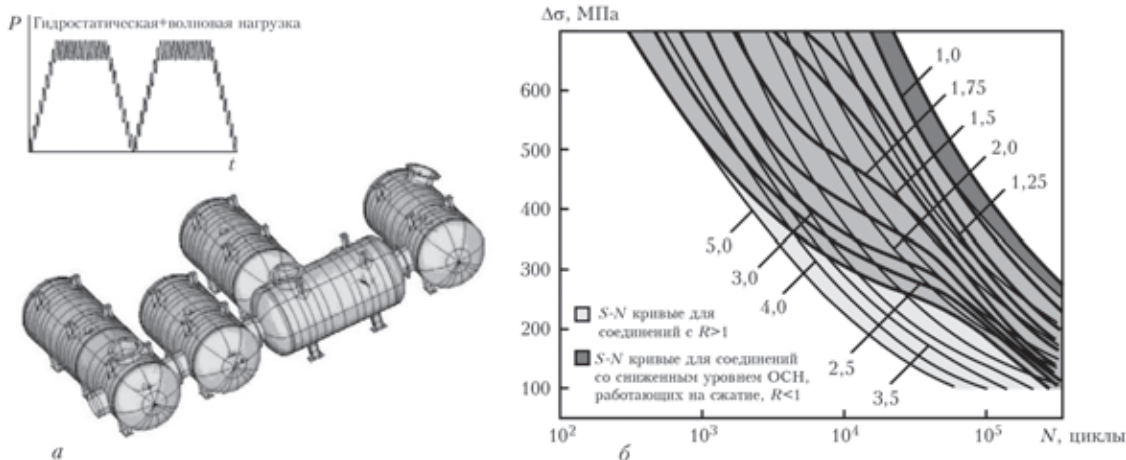


Рис. 3. Расчетные оценки для выбора конструкции узлов барокомплекса: а — система барокамер; б — расчетные кривые допускаемых усталостных повреждений



Рис. 4. Стенд для ресурсных испытаний элементов труб длиной до 6 м

Развитие методов оценки циклического ресурса сварных конструкций также берет свое начало из совместных работ с ИЭС им. Е. О. Патона — исследовалось влияние двухчастотного нагружения на усталостную прочность конструкций. Пример подобной решаемой в настоящее время задачи — с помощью расчетных оценок необходимо выбрать конструкцию узлов барокомплекса, устанавливаемого на палубе судна (рис. 3). Здесь к малоцикловым нагрузкам от изменений внутреннего давления в барокамерах добавляются нагрузки второй частоты, связанные с волновыми нагрузками на палубу.

Новые задачи, связанные со строительством трубопроводов высокой надежности в арктических регионах, требуют и совершенствования методик сертификационных испытаний металла. Для контроля энергоемкости разрушения металла магистральных газопроводов освоены методики определения работы пластического деформирования при распространении трещины при динамических испытаниях на уникальном по энергоемкости вертикальном копре 60 кДж, показана необходимость проведения испытаний на трещиностойкость металла сварных соединений при различных схемах нагружения, предложены методы контроля нового параметра — критического угла раскрытия трещины (СТОА).

Для исследования ресурса новой трубной продукции создан стенд (рис. 4), позволяющий имитировать реальный спектр нагружения труб в составе газо- и нефтепроводов. Результаты полномасштабных испытаний подтверждают необходимость их использования в ответственных конструкциях — комплексная проверка всей технологической цепочки производства позволяет выявить «слабые места», которые не отслеживаются при испытаниях стандартных образцов.

Совместно разработанные сварочные материалы, технологические процессы и методики оценки прочности позволяют изготавливать металлоконструкции с гарантированно высокими эксплуатационными характеристиками (от районов крайнего Севера до высокоагрессивных условий тропических широт).

Одним из дальнейших направлений кардинального повышения потребительских качеств материалов являются разрабатываемые в ИЭС им. Е. О. Патона нанотехнологии и наноматериалы, а также использование инжиниринга поверхности. Разработаны технологии испарительной конденсации (магнетронное, ионно-плазменное и атомно-ионное распыление) с управляемым потоком плазмы, сверхзвуковое «холодное» газодинамическое и микроплазменное напыление, электролитическое модифицирование наноструктурированной поверхности, лазерное прототипирование нанопозиционных порошков, контролируемая кристаллизация из аморфного состояния.

Дальнейшее развитие корпусных материалов будет происходить за счет синергетического эффекта на основе новых научных знаний физики прочности, пластичности, материаловедения, физико-химических процессов сварки и нанотехнологий. Это путь перспективного сотрудничества.

Поступила в редакцию 12.04.2013



TRENDS IN DEVELOPMENTS IN GAS-SHIELDED ARC WELDING EQUIPMENT IN JAPAN

Tomoyuki Ueyama

DAIHEN (OTC) Corporation, Japan. E-mail: ueyama@daihen.co.jp

In the welding field in Japan, new technologies and processes have been developed one after another in response to the improvement in materials and the changes in the market needs, which have remarkably been contributing to rationalization and cost reduction in various industries. Taking into account the abovementioned technological trends, this paper provides an overview of the present situation of technological developments in terms of gas shielded arc welding equipment. 16 Ref., 2 Tabs, 10 Figures.

Key words: trends, technology, welding equipment, MAG, MIG, TIG welding

1. Introduction

It has passed one century with the arc welding technology since 1904 when Oskar Kjellberg, a shipbuilding engineer in Sweden, developed and practiced the shielded metal arc welding process. The shielded metal arc welding process was introduced in shipyards in Japan about ten years later than that time, and in the 1920s, the first domestic DC arc-welding machine was born. Afterwards, the submerged arc welding process and the gas shielded arc welding processes such as TIG and MIG were developed and practiced one after another in Europe and the United States from the 1930s to 1940s. These welding processes were introduced in Japan, too, nearly ten years later after the employment in the Western countries.

In the early 1950s, the submerged arc welding machine was developed with the domestic technologies. Since then, the performance and quality of the domestic arc-welding equipment have earned a giant leap in tandem with the advancement of the heavy industries such mainly as shipbuilders and bridge fabricators. This became the trigger of shifting the main usage of the Western-made arc welding machines to the Japanese-made ones in fabrication sites. In the 1970s, the traditional major processes of submerged arc welding and shielded metal arc welding were superseded gradually by GMA welding, mainly CO₂ arc welding and MIG welding. This has urged the development of GMA welding equipment. The 1980s was special in that the articulated arc-welding robot became popular and the welding power source of the transistor-inverter controlled type was developed, and thereby the arc welding equipment was improved associated with the advancements in the power electronics; as a result, the technical development for higher efficiency and automatization in welding has been progressed until today.

This paper reports the performances and functions of the welding equipment developed in the last ten years aiming at the achievement of high-quality or high-efficiency in GMA welding.

2. The history of development of the GMA welding power source in Japan

2.1. The trend and growth of the output control method for the GMA welding power source

Figure 1 shows a summary of the trend and growth of the output control method for the welding power source for GMA welding in Japan for the last 30 years.

Though the step or slide-transform control type has decreased in the production quantity ratio, it is still used steadily at a ratio of about 5%, mainly in the sheet-metal welding workshop. The thyristor control type, which was dominant for the output control method till the 1970s, is still used mainly in the fabrication sites for medium/thick plate welding constructions in shipbuilders and building constructors, with a volume ratio of around 20%. Since the welding power source of the inverter control type with power transistor was developed in the early 1980s, the production volume ratio rapidly expanded by the early 1990s. In the latter half of the 1990s, developed was the digital inverter control type, which features the inverter for controlling the output and the software for controlling the welding current and voltage waveforms to govern the welding performance and func-

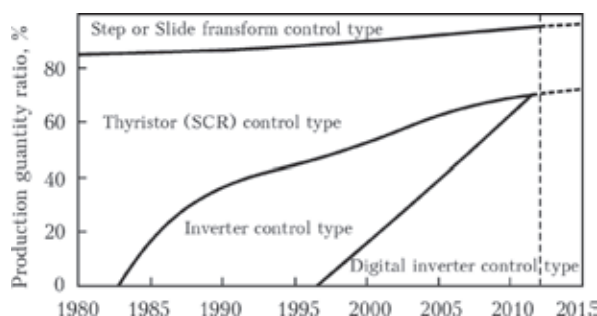


Figure 1. Change in spread of power source control type in Japan



tion. This control type has earned a rapid growth of use since the 2000s, reaching a quantity ratio of nearly 70% today.

2.2. Trends in the technology development for GMA-welding power source

Figure 2 shows a summary of the recent trends in the development of the major control technologies for the arc welding power source [1]. The thyristor-controlled power source was developed in 1969, which led the development of the welding sequential control and the unified control for improved performance. The low-frequency pulse control and the medium-frequency pulse control with a fixed pulse frequency were also practiced.

The pulse power source with the synergic pulse process on board was developed in 1980 and was marketed as the welding power source equipped with the world's first, general-purpose, low-priced transistor for the output control by the transistor chopper. This type of power source became the prototype of the present pulse MAG/MIG welding power source. However, in 1983 after three years, the practice of the inverter-controlled welding power source highly expanded, resulting in the development of the pulse MAG/MIG welding power source of the inverter control type that featured high-speed output control. This development caused the pulse MAG/MIG welding power source of the transistor-chopper control type to become disused shortly.

Afterwards, all the advancements in the welding power source were based on the inverter control type. In 1990, the high-function/performance welding power source that was combined with the microcomputer control was developed [2, 3]. In 1992, the intelli-

gent welding power source with the fuzzy control on board was developed [4, 5].

At the end of the 20th century, it was started to apply highly the digital control to the welding power source, with the background of advancement in the digital control technology; i.e., the majority of the control circuits were engineered to change the analog control to the digital control to improve the reproducibility of welding conditions [6]. Recently, it has actively been promoted to increase the output control speed by using the high-speed control element; as a result, the high-performance welding power source, that can control the welding and arc phenomena in almost the ideal modes, has also been marketed [7].

Table 1 shows a summary of the performances of the microprocessors applied to the welding power sources of the digital inverter-control type. In 1996, the digital control (with software) was employed for all the controls of the welding current and voltage waveforms to regulate the arc welding process [8]. At that time, 16-bit microprocessor was used to enable a single-chip microcomputer to execute multiple controls, including the optimizing control of pulse parameters and the fuzzy control for automatic adjustment of welding current and voltage, thereby eliminating the need of individual logic circuits. In 2000, 32-bit microprocessor, which features the two times or higher control frequency and 4-8 times capacity as compared to the conventional type, began to be applied. With respect to the control speed, the Digital Signal Processor (DSP) that enables the direct control with software has provided the fast-acting output control by inverter [9]. Lately, the Field Programmable Gate Array (FPGA) with a highly-integrated circuit

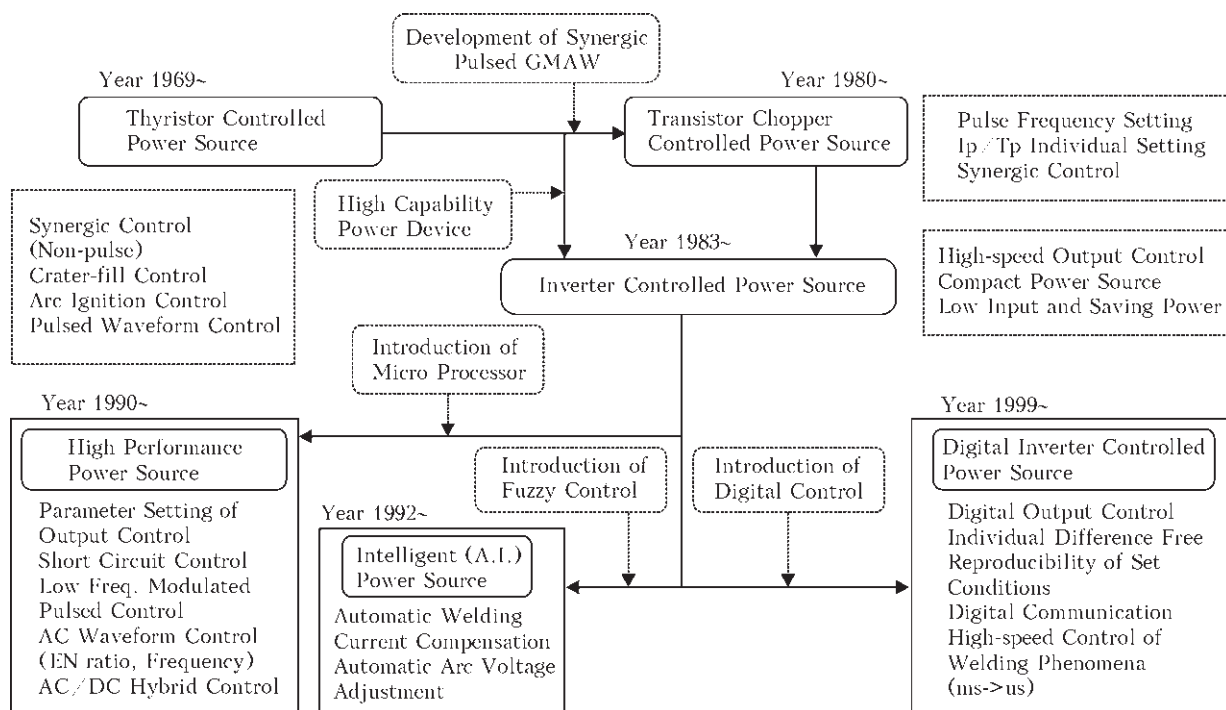


Figure 2. Trends in developments of main control technology for arc welding power source



Table 1. Change in micro processor and welding power source

	The First Generation 1996-2000	The Second Generation 2001~	The Third Generation 2008~	The Fourth Generation 2010~
Power source			FPGA   FPGA: All-purpose LSI, in which plural DSP and CPU are assembled in 1 chip.	ASIC   ASIC: LSI optimum for welding control, in which plural DSP, CPU and analog circuit are assembled in 1 chip.
Micro processor	16 bit	32 bit/DSP	FPGA	ASIC
Processing cycle	100 ms	25 ms	1ms	20 ns
Processing capability	1	4	16	64

DSP: Digital Signal Processor
FPGA: Field Programmable Gate Array
ASIC: Application Specific Integrated Circuit

that unifies 32-bit microcomputer and DSP has been employed in the welding power source, and thereby the control speed and program capacity have been improved by 1- or 2-digit magnitude as compared to those used in ten years ago.

These microprocessors used in the welding power source are commercial ones. In order to realize a high-dimensional welding control, the authors have developed the special welding-control microprocessor called “Welbee” (WELding Best Electronic Engine), the single-purpose LSI for the welding control, which is the unique fourth-generation engine dedicated to the welding and inverter controls [10]. By using the Welbee, the operation processing rate can be increased from a conventional micro-order level to a nano-order level, and thereby the control performance of the welding power source can be improved by 64 times higher than that of the first-generation welding power source.

This high performance has enabled to sample the welding current and voltage at a super-high speed and thus to monitor/control the complex arc phenomena that could not necessarily be controlled by conventional power sources due to insufficient operation-processing rates.

3. Digital control methods for the welding current waveform and their performances

3.1. Development of spatter reduction GMA welding process

The several methods for reducing spatter, typically the Controlled Bridge Transfer (CBT) method [11], that feature less spattering in the short-circuiting current range (up to around 150-180 A) in CO₂ arc welding have been suggested and realized for the low-spatter welding process. On the other hand, from the viewpoint of higher welding efficiency, the

low-spatter performance is required also in the globular-transfer current range where the metal transfer is prone to become irregular and unstable. However, the spatter performance of the conventional welding power sources was not enough in the globular-transfer current range (over 200 A).

As shown in Fig. 3, in the use of the welding power source equipped with the dedicated welding microprocessor of Welbee, the superimposed pulse current waveform, which consists of periodical changes, is applied immediately after the re-arcing from short-circuiting to regulate the metal transfer.

Additionally, the welding current is controlled to be nearly tens of amperes at the moment of shifting from short-circuiting to arcing by means of the high-speed operation processing of the algorithm for detecting the weld pool condition in the last stage of the short-circuiting. The development of this technology for controlling the welding current waveform has enabled to reduce spatter even in the current range over 200 A.

Figure 4 shows a comparison of the amounts of spatter in CO₂ arc welding with a Welbee-installed welding power source and a conventional welding power source. The right part of the figure shows typical spattering views and the relative amounts of spatter. In the condition where the amount of spatter is 0.5 g/min or less, only minute particles of spatter are observed. In the condition where the amount of spatter is 1.0 g/min or larger, a mixture of coarse and minute particles of spatter can be observed.

3.2. Control for stabilizing the metal transfer in pulsed GMA welding

Table 2 shows examples of the welding-current-waveform control in pulsed GMA welding that

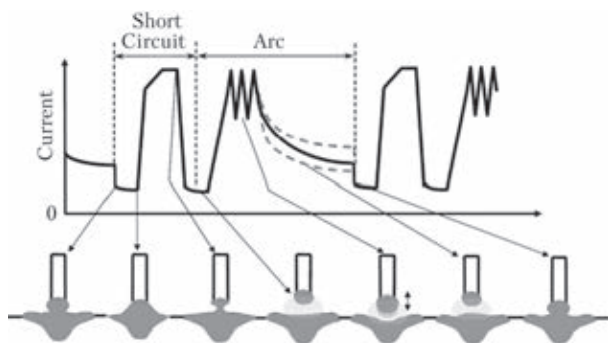


Figure 3. Controlled Bridge Transfer Expanded (CBT Expanded) process

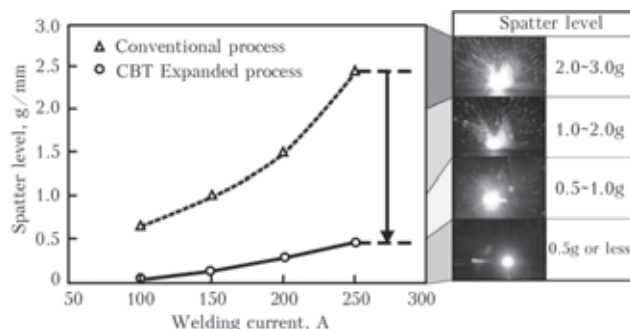


Figure 4. Comparison of spatter level

have recently been developed by applying the digital control technology [12].

In the pulsed GMA welding of mild steel, the common shielding gas used is an Ar-CO₂ mixture with 20%CO₂. On the other hand, the CO₂ ratio in the shielding gas mixture often changes depending on the mixing mechanism and the performance of the mixer in cases where the shielding gas is supplied to the welding process line via a concentrated piping system in the workshop. It is known that the metal transfer becomes unstable when the CO₂ ratio exceeds 20% in the shielding gas, and thereby the one-droplet per pulse transfer becomes impossible to achieve.

With the newly developed pulse-current waveform control, the initial value of a pulsed current is set to be higher than the proper value for 80%Ar+20%-CO₂, in order to enhance the constriction of a droplet for detaching from the wire tip even when the CO₂ mixing ratio becomes higher up to 30%. This control method also features the two-step pulse waveform, which reduces the pulse current to prevent the droplet from becoming larger excessively while maintaining the electromagnetic pinching force to detach the molten droplet formed at the initial stage of the process. In the process of lowering the pulse current to the base current, it is reduced exponentially, not linearly, in order to maintain the electromagnetic pinching force immediately before detaching the molten droplet. Consequently, this process assures a steady metal transfer while preventing the generation of minute particles of spatter that is caused by the residue of molten droplet flown apart from the wire tip as

the result of an excessive energy accompanied by the detachment of the droplet.

In the pulsed GMA welding, stainless steel requires the shielding gas with a higher ratio of Ar as compared with mild steel; in general, oxidized gas (O₂ or CO₂) is added at several percent to improve the arc stability. However, even if an Ar-rich shielding gas is used, a stable metal-transfer arc may not be obtained in the pulsed GMA welding of stainless steel because the high viscosity or surface tension of the molten droplet makes it difficult to detach the droplet from the wire tip. With the newly-developed current waveform control, the initial rising rate of a pulsed current is designed to be high so that the electromagnetic pinch force can firmly work on the molten droplet at the initial rise of pulsed current. Additionally, to cope with a lack of electromagnetic pinch force while a pulse current is applied, the pulse current is designed to increase gradually after reaching the pulse current, thereby ensuring the sufficient electromagnetic pinch force in accord with the timing of detaching the molten droplet. The process of reducing the pulse current to the base current is the same as the pulse waveform for the pulsed GMA welding of mild steel; i.e., the pulse current is decreased exponentially to prevent the generation of minute-particle spatter caused by the residue of molten droplet flown apart from the wire tip, thereby achieving a steady metal transfer.

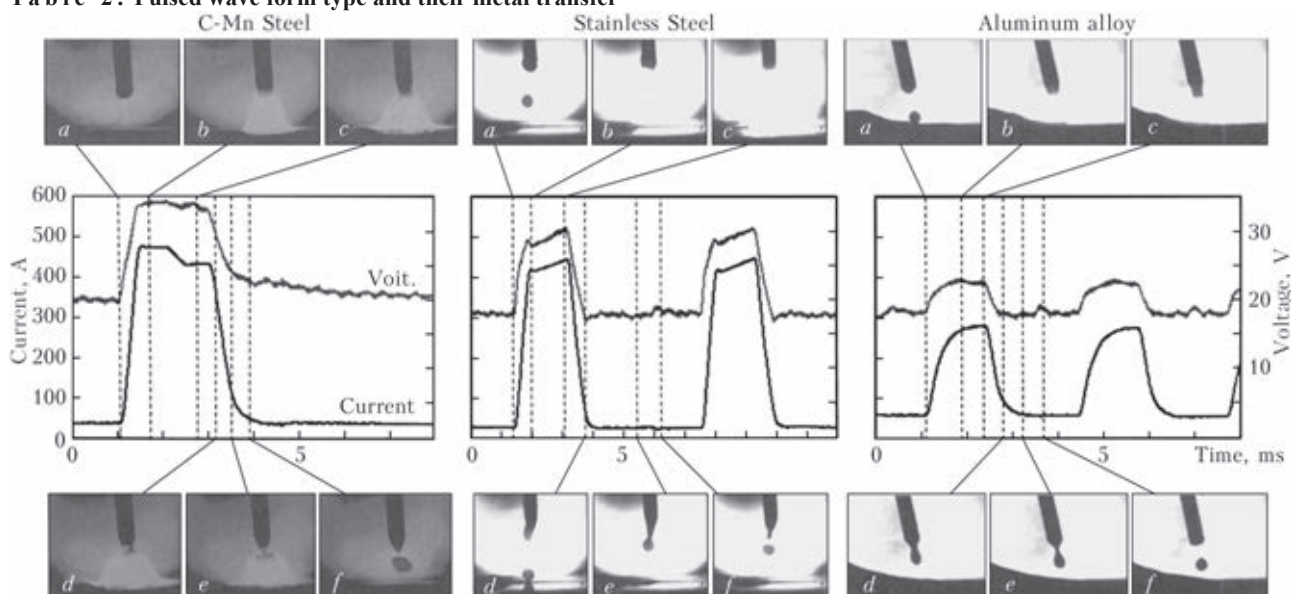
In the pulsed GMA welding of aluminum and its alloys, the pulsed-current waveform control must be executed in consideration of the properties that the melting point, viscosity and surface tension of the wire are lower than those of steel wire. Especially, if an excessive pulse peak current is energized to the wire, minute particles of spatter may be generated when the molten droplet detaches from the wire. To solve this problem, the lately-developed current waveform control features the exponentially ascending or descending curves for the rising or falling current waveform between the peak current and the base current. This technology prevents the generation of minute-particle spatter when the molten droplet detaches, thereby obtaining a stable one-pulse one-droplet transfer.

3.3. Pulsed GMA welding process with superimposed low-frequency pulse

In 1990, the pulsed GMA welding process with superimposed low-frequency pulse was developed for aluminum and its alloys [13]. In this process, the arc condition is changed cyclically by controlling the output current and voltage with the welding current waveform that features the low-frequency pulse superimposed, for reflecting the vibration of the weld pool, on the medium frequency pulse that controls the metal transfer under a constant wire feed rate. With



Table 2. Pulsed wave form type and their metal transfer



this advanced technology, the authors have made suggestions for realizing the GMA weld beads with the regular ripple pattern like TIG weld beads, and for using the weld pool vibration to refine crystal grains and to reduce the susceptibility to solidification cracking [14] as well as to prevent blowholes [15].

However, with mild steel and stainless steel whose melting points are higher, the change in the arc phenomena is not as cyclical as observed with aluminum alloys; thus, the above-mentioned effects could not be achieved.

To overcome this problem, the new pulsed MAG/MIG welding process with superimposed low-frequency pulse has been developed, with which the wire feed speed can be synchronized with the current waveform control, as shown in Fig. 5. With this advanced process, the output can dynamically be changed at a low frequency of 5 Hz max for mild steel and stainless steel, and thereby it has become possible to change significantly the arc pressure and wire melting rate.

With this advanced process, a molten pool can cyclically be vibrated.

This function enables to remove zinc vapor from the molten pool in the welding of galvanized steel plates, thereby reducing the occurrence of blowholes and pits in the weld metal.

3.4. Development of AC-pulsed GMA welding process

Depending on the type of welding structure, some of the welding joints, may be difficult to weld because the root gap is required to be filled with deposited metal even though the base metal's thermal capacity is small. In the automatic welding of such particular joints, the use of low welding current can prevent burn-through that is caused by excessive heat input; however, it will become difficult to

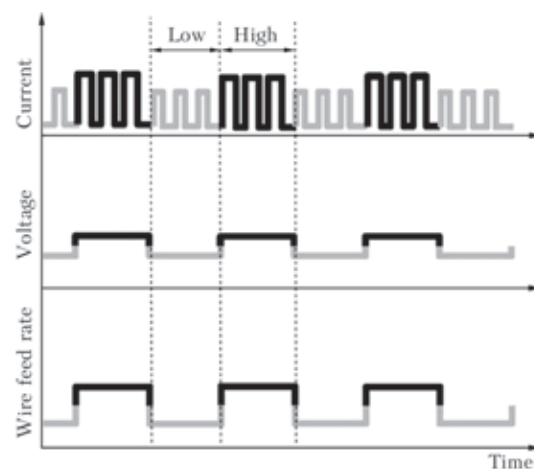


Figure 5. Low-frequency modulated pulsed GMA process

bridge the root gap with deposited metal. Conversely, if the welding current is increased to fill the root gap with deposited metal, excessive heat input may cause burn-through. This problem can be attributed to the nature of the common DC GMA welding process in which the welding current is related directly to the wire melting rate. Therefore, it is significantly difficult to set the proper welding condition in the welding by robots and automatic machines. Even if the proper condition could be set up, it would become difficult to maintain/control that condition due to less robustness.

The AC-pulsed GMA welding process is one of the processes that can solve such welding problems. Figure 6 shows a welding current waveform in AC-pulsed GMA welding.

In AC-pulsed GMA welding, the ratio of EN polarity current to the average welding current in one pulse cycle is called the EN ratio [16], which can be defined by the equation shown in the figure: EN ratio = $\frac{S_{en}}{S_{en} + S_{ep}}$.

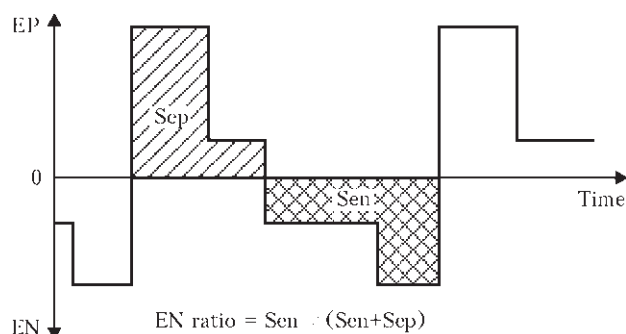


Figure 6. AC pulsed GMA waveform

Figure 7 shows the relation between welding current and wire feed speed as a function of the EN ratio in the use of Al-Mg alloy wire and mild steel wire with a wire diameter of 1.2 mm. As shown in these figures, setting an EN ratio can determine the melting characteristic curve for a particular wire in relation to the melting rate vs. welding current in AC-pulsed GMA welding. Specifically, when comparing the EN ratios at the same welding current, the wire melting rate becomes faster with a higher EN ratio, and slower with a lower EN ratio.

When the wire melting rate is kept constant, a change in the EN ratio affects the welding current;

i.e., the welding current decreases with a higher EN ratio, and increases with a lower EN ratio.

Due to these characteristics, changing the EN ratio affects the cross-sectional contour of a weld bead in AC-pulsed GMA welding as shown in Fig. 8; i.e., with an increase in the EN ratio, the bead width and penetration decrease, and weld reinforcement increases. This specific feature of the AC-pulsed GMA welding process is useful in the welding of a welding joint having an excessive gap.

3.5. Cold tandem GMA welding

Figure 9 shows the principles of the cold tandem GMA welding process. Specifically, a couple of wires are aligned in tandem along the welding line, and while the leading wire generates a pulse arc, the trailing wire that is not energized is fed into the molten metal produced by the leading arc. In the cold-filler tandem GMA welding process, the filler wire is fed at 5 mm away backwards from the leading arc in the molten pool, unlike the TIG filler welding process in which the filler wire is fed into the molten pool immediately beneath the arc. With this process, the solidification rate of the molten pool becomes faster and thus the prevention of undercut and humped bead can

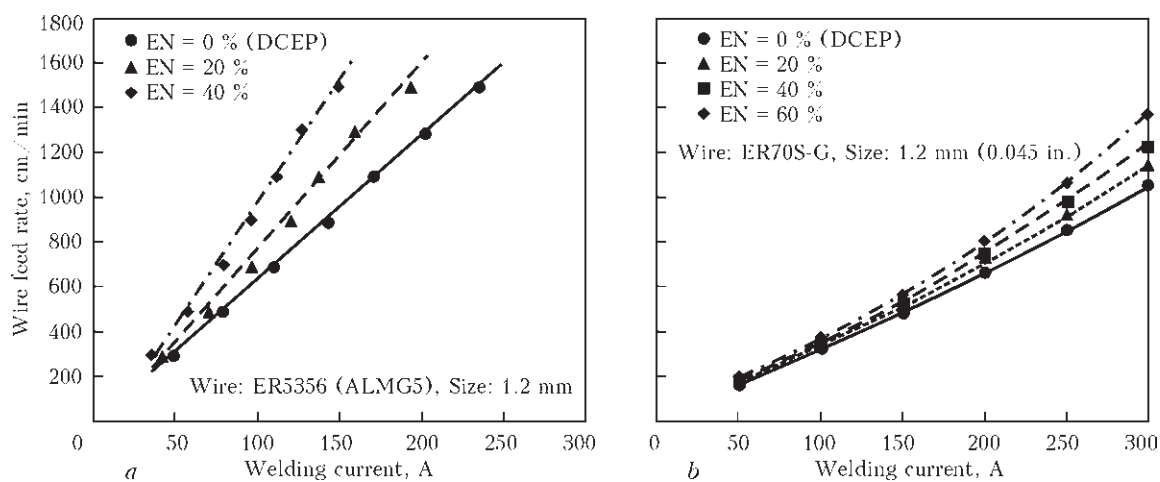


Figure 7. Wire melting characteristic

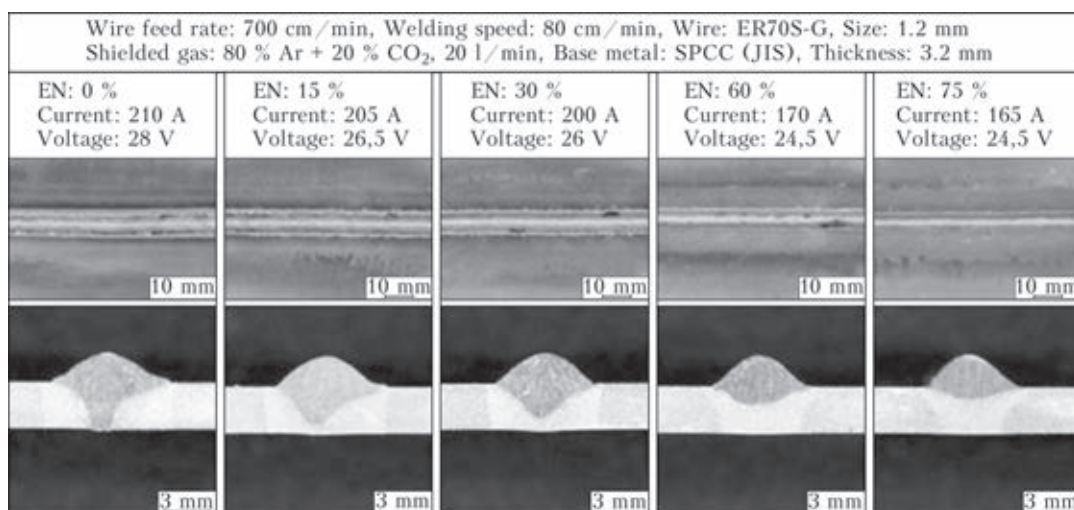


Figure 8. Effect of EN ratio on bead formation



be expected. Because the filler wire is fed into the rear part of the molten pool, the heat capacity of the arc is never drawn by melting the filler wire. This is why the penetration shape is almost not affected by the filler wire fed. In addition, since the preceding arc is kept in perfect spray without short-circuiting, similarly to the conventional pulsed MAG welding process, the generation of spatter is extremely low.

In recent years, thick-plate fabricators tend to use narrow groove joints to get higher welding efficiency. However, the use of a high-efficient welding process in a narrow groove joint may cause the occurrence of a hot crack in the penetrated weld center depending upon the penetration shape. The hot cracking can occur if molten metal does not fill the shrinkage cavity that is formed at the interface (the finally solidified zone) of the columnar structures near the center of a weld during the solidification and shrinkage process. With the cold-filler tandem GMA welding process, the cold filler wire is fed into the molten pool formed by a high-current arc, and hence it can be expected that the molten-metal filling action into the molten pool can be enhanced, thereby preventing the hot cracking.

Figure 10 shows the welding results of the pipe-flange joint of machinery structure steel. In this experiment, welding was started with the pulsed GMA welding process, which was followed in the mid-course by cold-filler tandem GMA welding with the trailing filler wire fed, in order to compare the effect of the filler wire. Consequently, solidification cracking occurred near the center of the bead from the weld start when only pulsed GMA welding was used; by contrast, right after switching to cold-filler tandem GMA welding, the crack propagation was arrested,

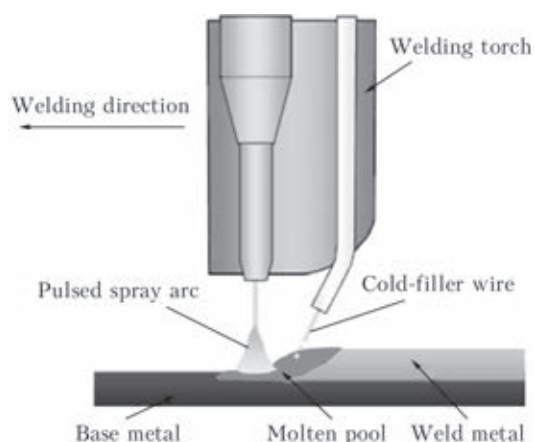


Figure 9. Principle of cold tandem pulsed GMA process

and thereby the expected effect of the cold filler wire has been confirmed.

4. Closings and outlooks

The authors have introduced the trends in the development of the GMA welding equipment observed in Japan for the last ten years. The GMA welding equipment has remarkably been improved in tandem with the developments in the power electronics controls and elements together with the advancements in various control methodologies. Today, the capacity of microprocessors is also advanced considerably; thus, particular output controls that were hard to realize are becoming possible to practice.

On the other hand, for the fusion welding process like the arc welding process, it is required to handle the phenomena in which solid, liquid and vapor phases can change for a short time. Therefore, in order to accomplish the further advancement/development of the welding equipment, better understanding the physical phenomena centered on the arc phenomena

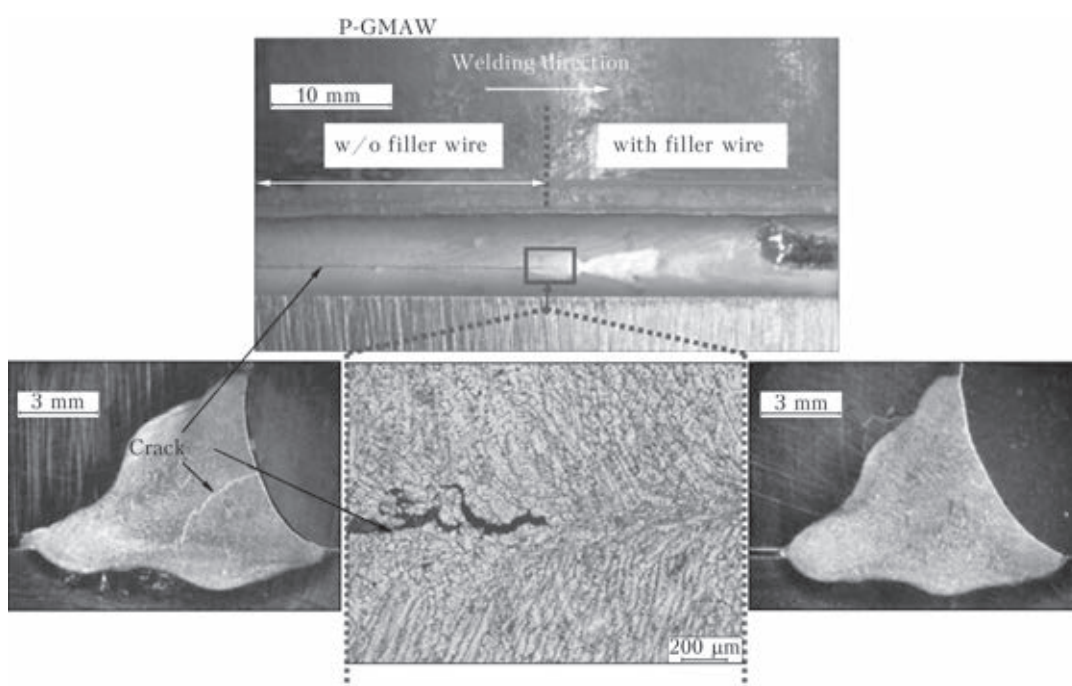


Figure 10. Inhibiting effect of solidification crack propagation by cold tandem pulsed GMAW



in the welding process will become more vital for the technological step-up in the future.

1. Mita, T. (2000) Progress of arc welding technologies. *J. of the JWS*, 69(3), 190–196.
2. Yamamoto, H., Harada, S., Ueyama, T. et al. (1992) Development of low frequency pulsed MIG welding for aluminium alloys. *Welding Int.*, 6(7), 580–583.
3. Mita, T. (1991) Spatter reduction power source considerations. *Ibid.*, 5(11), 847–850.
4. Harada, S., Nakamata, T., Ueyama, T. et al. (1992) Development of fuzzy controlled pulsed MIG welding power source. *Welding Technique*, 40(8), 63–68.
5. Innami, T., Wang, J., Hamamoto, K. (1992) Development of CO₂/MAG automatic welding equipment applied fuzzy. *Ibid.*, 40(8), 69–73.
6. Ohhashi, N., Hamamoto, K., Kitajima, A. (2000) Full-digital controlled welding machine. *Ibid.*, 48(8), 56–62.
7. Hirata, Y. (2005) Innovation of welding related manufacturing system by using fully digital-controlled arc welding machine. *J. of the JWS*, 74(7), 473–477.
8. Yamamoto, H. (1997) Arc welding phenomena and welding power sources. *Ibid.*, 66(8), 615–629.
9. Mita, T., Harada, S. (2004) Trend and perspective on welding power source in Japan. *IIW Doc. XII-1824-04*.
10. Era, T. (2012) Leading edge of control technology of arc welding equipment. *Welding Int.*, 26(3), 170–174.
11. Era, T., Ueyama, T. (2008) Welding steel sheet with a modified short circuiting process. *Welding J.*, 87(12), 28–33.
12. Ueyama, T., Era, T. (2010) Development of pulsed MAG/MIG welding power source for automatic instrument and robot. In: *Proc. of Sheet Metal Welding Conf. XIV* (May 2010, Livonia, USA).
13. Yamamoto, H., Harada, S., Ueyama, T. et al. (1993) Study of low-frequency pulsed MIG welding. *Welding Int.*, 7(1), 21–26.
14. Yamamoto, H., Harada, S., Ueyama, T. et al. (1993) Beneficial effects of low-frequency pulsed MIG welding on grain refinement of weld metal and improvement of solidification crack susceptibility of aluminium alloys. *Ibid.*, 7(6), 456–461.
15. Yamamoto, H., Harada, S., Ueyama, T. et al. (1994) Inhibiting effect of low-frequency pulsed MIG welding on blow-hole generation in Al and its alloys. *Ibid.*, 8(8), 606–611.
16. Ueyama, T., Tong, H., Harada, S. et al. (2005) AC pulsed GMAW improves sheet metal joining. *Welding J.*, 84(2), 40–45.

Recieved 01.03.2013



WELDING TODAY AND TOMORROW

J. PILARCZYK, W. ZEMAN

Instytut Spawalnictwa, Gliwice, Poland. E-mail: office@is.gliwice.pl

It has been presented the huge changes in the Polish welding engineering which occurred in the last 20 years: in ownership among producers of welding equipment and materials, in investments which have been carried out, in the influence of free market, in the importance of knowledge and in the emerging of the people's own potential. These factors enabled to decrease the distance between the Polish and world welding level. 8 Ref., 5 Tabs, 10 Figures.

Key words: survey, Polish welding engineering, world welding level, changes in the last years, new factors, eliminating of lag

Introduction

While talking about contemporary welding engineering and pondering over its future development, one must also evoke its rich history and refer to its considerable achievements in earlier days, in particular, in the interwar time (1918 – 1939) as well as during the forty years that followed (1945 – 1985).

The interwar period witnessed the construction of the world's first fully welded road bridge on the river Słudwia near Łowicz in Poland in 1929 (Fig. 1). The bridge has been in its place ever since in spite of wear and tear and destruction caused by the war.

In the interwar period the first buildings (tall buildings as well as exhibition and production halls) were constructed on the basis of welded steelwork. The production works manufacturing welded structure were set up in numerous existing steelworks, which produced considerable amounts of structural steel, in the region of Silesia. Although the production plants of welded steelwork were relatively small, the number of produced structures was imposing. Even today's design engineers and production engineers would not feel ashamed of some of the solutions applied then. It should be also emphasised that many constructions came into being within a very short time.

The post-war period in Poland was the time of rebuilding the country after the ravages of war and starting up numerous industrial plants. In that period the amount of produced structural steel was colossal. It was connected practically with all fields of regenerating civil life as well as rebuilding and developing industry. Steelworks, coal mines, power stations, shipyards, chemical plants are just examples of the biggest consumers of welded steelwork.

Remembering and appreciating 'yesterday's' achievements, one must nevertheless admit that it has been the last two decades of political, economic and commercial transformations in Poland, Europe and the world that have had the greatest impact on the 'today' of Polish welding engineering.

The factors which made it possible to decrease or even eliminate the gap between the Polish and world's welding engineering are the privatisation among manufacturers of welding materials and equipment as well as manufacturers of welded products and structures, all kinds of investments, free-market awareness, access to knowledge as well as the possibility to develop and improve one's own skills and abilities.

Today's Polish welding engineering has a potential which lays the strong foundations for the welding engineering of 'tomorrow'.

The image of Polish welding engineering is created by the following:

- manufacturers and distributors of welding materials and equipment
- applied welding technologies and level of their automation
- welding sector personnel



Figure 1. The world's first fully welded road bridge and commemorative plaque affixed by the American Welding Association



- users of welding technologies
- scientific and research establishments

Manufacturers of welding materials and equipment

Privatisation of domestic manufacturers of welding materials and equipment by such companies as ESAB and LINCOLN has opened the world's market (through their perfectly organised distribution networks).

The most fundamental issue now is the access to new manufacturing techniques and technologies. They usually require high financial outlays for research and industrial applications. Finding an investor in Poland is no easy task. Thanks to the investments made by foreign companies the market sector of welding materials and equipment has considerably strengthened its position. A recent decision of the ESAB company to move the production of welding equipment from Sweden to the city of Opole seems only to confirm this trend (Opole is going to have the biggest production plant of ESAB welding equipment in Europe). Also the investments made by the LINCOLN company and its subsidiaries in the scope of production of flux-cored wires or welding torches. The gas companies that have located their investments in Poland include LINDE, MESSER, AIR LIQUIDE and AIR PRODUCT.

It should be clearly emphasised, however, that apart from large international companies there are over a dozen Polish big and small companies manufacturing welding materials and equipment, such as ASPA, ZBUS, ECKERT, ZASO, ELKO, MULTIMET, METALWELD, TECHNIKA SPAWALNICZA and others. These manufacturers supplement the large companies' offer with specialist materials and equipment for welding engineering.

Over two thousand distributors and servicing points in Poland provide their services to the customers of welding engineering companies. Thanks to investments made, privatisation process and organizational changes, there has been a steady growth in the potential and competitiveness of Polish welding engineering on the global markets. This can be seen

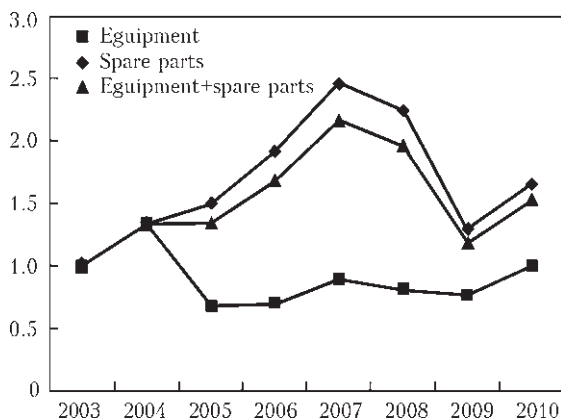


Figure 2. Dynamics of sales of domestic welding equipment in the years 2003 – 2010

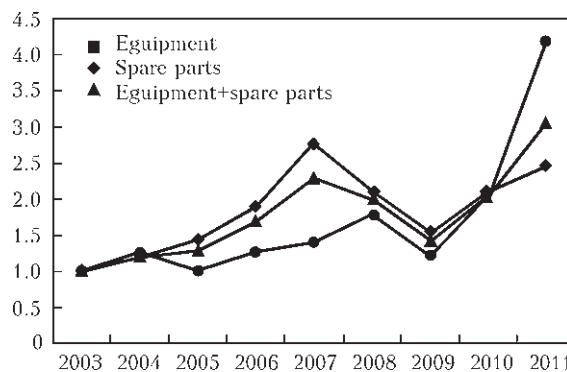


Figure 3. Dynamics of export of welding equipment and spare parts in the years 2003 – 2011

in the figures relating to the dynamics of the market of welding materials and equipment.

The year 2003 was adopted as the basis for the analysis of the market dynamics, of both welding materials and equipment. That was the year of the sale growth after the economic slump in the years 2000 – 2002.

After the period of a boom in the economy in the years 2003 – 2007 (Fig. 2 and Fig. 3) the impact of the world's crisis on the domestic market of welding equipment became visible. The total production of equipment and spare parts sold in 2007 was twice as much as in the year of 2003, whereas in 2009 it approached the level of the year 2003. The years 2010 – 2011 saw the recovery of the economy. The total value of the export of equipment and spare in 2011 exceeded the level of the year 2007, which was a very good year for the market of welding engineering.

Thanks to a perfectly developed distribution network, including networks of the ESAB and LINCOLN companies, the equipment manufactured in Poland is exported to over 100 countries all over the world. The biggest number of devices is exported to Belgium (16%), Russia (15.3%), USA (9.9%) and Germany (7%).

The dynamics of the market of electrodes and flux-cored wires shows that there has been a considerable export growth in both fields. The export of covered electrodes in the years 2003 – 2010 increased over



Figure 4. Dynamics of the market of covered electrodes in the years 2003 – 2010 acc. to mass



10 times, whereas that of flux-cored wires over 7 times (Fig. 4 and Fig. 5). Similarly as was the case with equipment, the world's crisis of 2009 caused a decrease in export of covered electrodes and of flux-cored wires. However, the domestic use of covered electrodes remained at the level of the year 2003. The use of flux-cored wires was gradually growing. In 2007 it was over 3 times greater, and in 2010 it was twice as high as in the year 2003 (Fig. 5).

The dynamics of import of welding equipment was either stable or of a declining character. In the years 2003 – 2010 the value of import did not exceed the level of the year 2003. The highest activity of the manufacturers of welded products and steelwork in the purchase of new welding equipment took place in the years 2007 – 2008. It resulted, among other things, from a long and arduous effort to build the financial stability of the companies.

The import of welding materials and equipment has taken place in the past and today, and what should be emphasized, from various countries. In 2011 Poland's most important partners in the scope of the purchase of welding equipment were Germany 28.8% as well as China and Italy with a respective share of 15.3% and 14.3% of the total purchase value.

The greatest import of electrodes as far as the mass is concerned has come from Portugal, Hungary and China, whereas electrodes of a relatively higher price and quality have been imported from Sweden, Germany and Holland.

The import of flux-cored wires from China in 2011 was comparable in terms of quantity with the import from Germany. However, the quality of German wires was 2.5 times higher, which indicates their better quality and specialist properties.

Analysing the structure of the total use of weld metals in Poland in 2010, it was possible to observe that the weld deposit coming from solid wires (MIG/MAG) constituted approximately 53%, from flux-cored wires (FCW) approximately 20%, whereas from covered electrodes (MMA) and from welding consumables for submerged arc welding (SAW) 18% and 9% respectively. Both the increase in the use of flux-cored wires and the declining tendency in the use of covered electrodes follow the tendency taking place in developed countries, where in the years 1976 – 2004 the participation of weld deposit obtained during manual welding with covered electrodes decreased from 51 to 12% in Western Europe, from 49% to 12% in the USA and from 70% to 13% in Japan.

Applied welding technologies and level of their automation

General trends in the scope of welding technologies applied in Poland do not diverge from those in the developed countries in Europe and in the world. In the general hierarchy of applied methods, manual

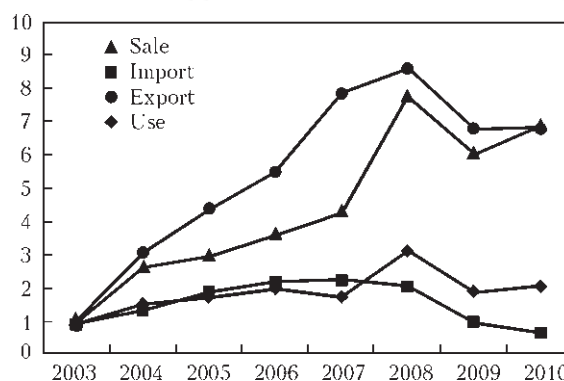


Figure 5. Dynamics of the market of flux-cored wires in the years 2003 – 2010 acc. to mass

welding with covered electrodes is relatively rarely applied, while the application of flux-cored wires and semi-automatic MIG/MAG welding is on the increase. However, nowadays the state-of-the-art methods and cutting-edge welding technologies are laser welding and cutting, hybrid welding, electron welding, welding with several wires, low-energy processes as well as automatic and robotised welding.

All of the above-mentioned processes are known and applied in Poland, however, the scope of their use is different from the one observed in the developed countries. The world's production of industrial lasers in 2008 amounted to 41700 units. About 36% of this number, i.e. over 15 000 items were installed in Europe. If one assumes that 22% of lasers were used for cutting and 12% for welding, then 5100 lasers were used in welding processes in Europe solely in the year 2008. According to estimates, around 2000 units were installed in Poland, including several dozen intended for welding. Hybrid welding is already a subject of research and experimental testing. There are some single industrial applications of hybrid welding but still a lot needs to be done in this area.

A similar situation is in the case of robotisation of welding. There is over a million of robots installed all over the world, with 30% of this number being made up by welding robots. Among welding robots a dominating position is taken by robots for welding and fusion welding, whereas robots for brazing and, in particular for laser welding, have prospects of development.

As the measure of robotisation level one uses the number of robots per 10 thousand people employed in all industries or in the automotive industry. It is estimated that in the world there are approximately 50 robots per 10 thousand employees in all industries. However, in such countries as Japan and Germany there are respectively 1436 and 1130 robots per 10 thousand workers employed in the automotive industry and 191 and 134 robots in all industries. In Poland in 2010 there were 5158 robots installed in all industries, with 2559 robots used in the automotive industry. Therefore, there are 19 robots per 10 thousand employees in all industries and approximately



Table 1. Welding robots installed in different countries in 2010

Country	Number of pcs.	Country	Number of pcs.
China	8 000	India	446
Germany	4 129	Slovakia	396
North America	3 883	Brazil	246
South Korea	3 800	Great Britain	197
Japan	3 609	Poland	171
Spain	563	Portugal	131
France	496	Russia	115

176 robots per 10 thousand employees in the automotive industry.

The number of welding robots installed annually in different countries is worth emphasising. The potentate is China where in the year 2010 eight thousand welding robots were installed. In Germany, North America, S. Korea and Japan this number fluctuates around four thousand, whereas Poland, with 171 robots, takes one of the last positions in terms of the number of installed welding robots (Table 1).

Welding sector personnel

The personnel employed in the welding sector is one of the greatest assets of Poland's welding engineering; this being due to the level and organisation of educational processes, practical training and experience in manufacturing critically important structures by domestic producers. The international system of educating welding personnel implemented by Instytut Spawalnictwa enables obtaining international certificates (Table 2) and European diplomas (Table 3). Instytut Spawalnictwa collaborates with the European Welding Federation as well as the International Institute of Welding and contributes significantly to their work.

Vocational training is run in Poland by approximately 400 centres supervised by Instytut Spawalnictwa. Several dozen thousand documents are issued every year (Table 4). It is estimated that approximately 130 – 150 thousand people are involved in work for the welding engineering sector, including 60 – 80 thousand of welders.

Users of welding technologies

Depending on the economic situation, in Poland, in over 100 industrial sectors there are between 6.5

Table 2. The total number of the international diplomas acquired by the welding personnel in the years 1999 – 2011 was 2,400

Number of diplomas	IWE	IWT	IWP	IWS	IW	IWIP
	1,418	200	150	362	31	239

Table 4. Documents issued every year

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Welders Qualification Test Certificates	20,566	22,487	34,576	42,423	43,789	46,199	44,454	42,499
Welder's Books	8,740	10,580	15,474	21,524	17,604	14,736	13,918	13,662

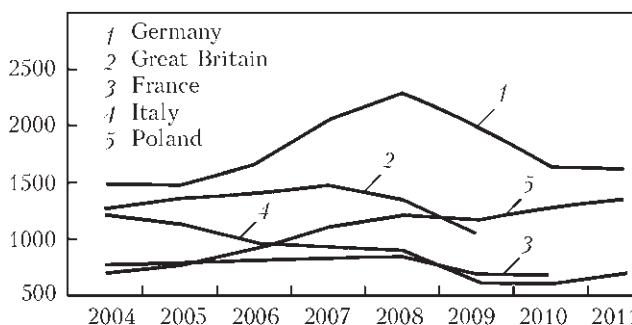


Figure 6. Production of steelwork in thousands of tons in the countries of the greatest production output in Europe

and 7 thousand companies using welding and related technologies in production processes. Such companies create about 50% of the added value. Poland comes second in Europe as far as the quantity of steelwork production is concerned (1.35 m tons). There is also a high share of export in the structure of production. In 2010 export amounted to 630 thousand tons, while import reached 195 thousand tons (Figure 6). All this is a clear indication of the strong position of companies connected with the welding engineering sector.

Domestic manufacturers make the most reliable and responsible welded steelwork for power engineering, aviation, building engineering, petrochemical sector, gas engineering, transport, automotive industry, ship building, etc. Their export and price relations show Poland as a country with a very competitive offer.

What is insufficient, however, is the outlays incurred by industrial companies for innovative activity. The companies allocate over 80% of their financial resources for purchasing equipment and just merely 10% for research and development.

Scientific and research potential

The expert institutions dealing with welding engineering in Poland are Instytut Spawalnictwa (the biggest establishment in Poland, with 165 employees), chairs or departments at 16 universities (employing from several to a dozen or so workers), the Polish Academy of Sciences, some research institutes as well as large industrial plants with their testing and research facilities. Industrial plants with a foreign capital usually carry out their research in their own scientific centres, sadly, outside Poland.

For the past 20 years the laboratories conducting research for the welding engineering sector have been

Table 3. The total number of European diplomas acquired by the welding personnel in the years 1997 – 2011 was 1,734

Number of diplomas	EWE	EWT	EWP	EWS	EW
	1,108	179	158	72	91



Table 5. Financial outlays for research projects in welding engineering

Description	Projects financed by MNiSW in the following years				NCBR Projects	Developmental Projects
	2002 – 2007		2008 – 2010		2010 r.	Years 2007 – 2008
	Own	Superv.	Own	Superv.	Initech	
Number of projects	28	10	21	9	3	4
Financial outlays in thousands PLN	6 567,9	414,7	6 325,3	463,1	10 877,0	2091,0
Average outlays in thousands PLN per 1 project	234,6	41,5	301,2	51,4	3 625,7	522,7
MNiSW – Ministry of Science and Higher Education NCBR – National Centre for Research and Development Superv. – Supervisory Initech – Innovative Technology.						

equipped with the state-of-the-art lasers, robotised welding equipment and modern testing machines.

Table 5 presents financial outlays for research projects in welding engineering financed from the budgetary resources.

The structure of research issues and financial outlays for research shows that despite limited outlays the scope of the research carried out in Poland has covered the majority of problems essential to modern welding engineering, such as laser welding (including hybrid welding), plasma welding, welding (including FSW), materials of poor weldability, nanomaterials, calculations and simulations of processes etc. (Fig. 7 and Fig. 8).

The assets of today's welding engineering:

- powerful and quickly developing production and distribution facilities of welding materials and equipment
- highly skilled welding personnel thanks to the international system of vocational education and training as well as owing to experience gained at production of reliable steelwork of critical importance
- welding technologies hierarchy applied in ac-

cordance with the world's trends

- great potential and production capacity of the manufacturers of welded products and steelwork
- powerful research and testing facilities and experienced researchers as well as the range of research-related issues taking into consideration the world's latest trends.

Welding of the future

Welding engineering of the future will depend on research conditioning the development of structural materials and technologies to join them, educational and vocational background of the welding personnel, the level of innovation at companies and a general economic situation.

Research in the area of structural materials

The research of materials processed by means of welding technologies will include:

- parent metals: steel, aluminium, magnesium and plastics
- new materials: titanium and its alloys, composite and ceramic materials, multi-materials
- materials of the future – nanometals.

As can be seen in Figure 9, the production of steel is four times higher than that of other structural materials. For this reason the use of steel is and, in the nearest future, will continue be a fundamental indicator of the condition and development of individual industrial sectors, including welding engineering.

The research related to the development of structural materials has been addressed in many publications and research programmes such as European Strategic Energy Technology Plan (referred to as the SET Plan) developed by the Polish Steel Technology Platform (Polska Platforma Technologiczna Stali) as well as the programme 'Horizon 2020' being prepared

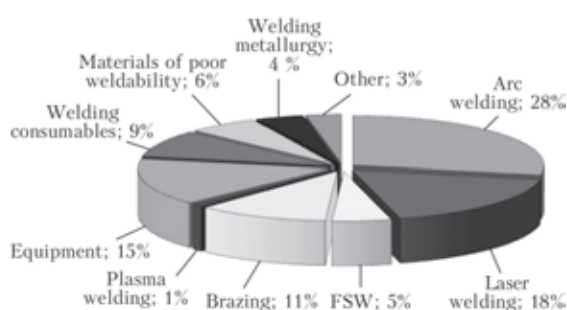


Figure 7. Structure of research projects financed from the budget in the field of welding engineering in Poland in the years 2000 – 2007

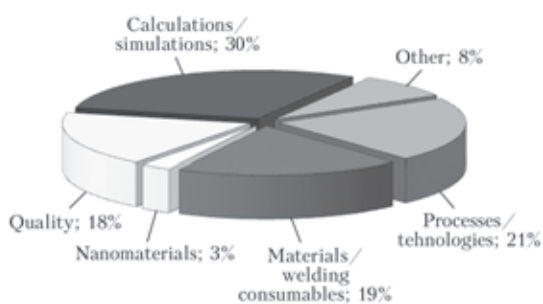


Figure 8. Structure of outlays for research projects financed from the budget in welding engineering in Poland in the years 2007 – 2011 (acc. to value)

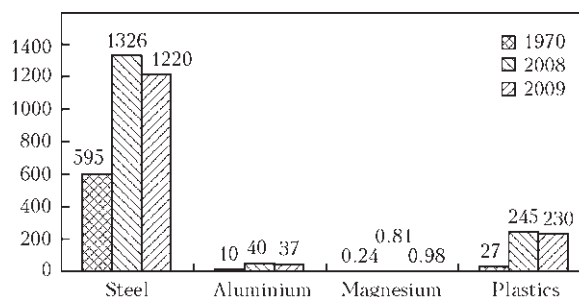


Figure 9. World's production of major structural materials



by the European Union. The latter programme is supposed to be in operation from 2014 to 2020 and provide approximately 80 bn PLN to finance European research and innovations.

Welding technology development

New structural materials of poor weldability pose a real challenge for welding engineers. These include:

- materials resistant to high temperature
- multi-materials in the form of sheets, shapes and casts

Technologies of the future are:

- high-strength steels + soft steels, aluminium steel + carbon fibre reinforced plastics (CFRP)
- laser, hybrid and electron beam welding
- remote controlled welding using concentrated energy

▪ always relevant electric arc welding: Cold Metal Transfer, STT (Surface Tension Transfer), Cold Arc, SCW (Synergic Cold Wire), two-arc MAG welding, submerged arc welding with multiple electrodes and thin wires as well as TIME methods

The growth in the productivity and quality of welded joints is conditioned by the automation and robotisation of high-efficiency welding processes as well as by computerised control of welding processes, first of all due to high current parameters and welding rate values.

Innovative solutions

‘Being innovative’ is the ability to create and use in practice new and **effective solutions** which have become feasible owing to research and experience gained during production.

Effective solutions bring the following advantages:

- increase in quality and efficiency
- reduction of costs
- reliability and competitiveness of manufactured welded products and structures.

Innovation is the most effective method to enjoy competitive and economic success. ‘**Innovation means knowledge turned into money**’. All too often one can see only expenditure related to the implementation of new solutions. In fact, costs are borne only once, whereas benefits keep coming in for years.

Innovation obviously does cost, and poses a great problem in countries like Poland. Welding engineering companies have been arduously building their financial stability, investing in fixed assets, building or renovating production halls, purchasing welding machinery and equipment. This phenomenon is very positive and important as these areas have been neglected for many years. However, the foregoing is insufficient to boost efficiency and competitiveness.

The future and competitiveness of Polish welding engineering will, to a much greater extent, depend on the companies’ activity in the field of innovation.

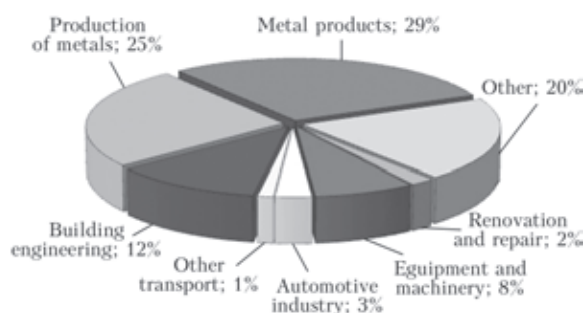


Figure 10. Structure of the use of rolled goods in Poland by sectors related to welding engineering in 2010

Influence of economic situation on Polish welding engineering

The globalising economy increases international competition. If the welding engineering industry is to play an important role in it, it will have to face up to this challenge. It is difficult, though, to predict what shape the economy will take in Poland and in the world.

Welding engineering needs a good economic situation in sectors being the main users of welding techniques i.e. metal products (for power engineering), building engineering, automotive and transport industries (including shipbuilding), equipment and machinery, renovation and repair (Fig. 10).

Examples of investments which may positively influence the economic situation of the welding industry in the domestic market

1. The construction of the north–south gas pipeline is due to begin in 2014. It will connect the terminal in the city of Świnoujście with gas distribution grids in the Czech Republic, Slovakia, Ukraine and other south-European countries. The pipeline is going to be 2000 km long and its construction is to be completed in 2020. Parallel to the above-mentioned investment, there are plans made for the Odessa–Brody–Gdańsk pipeline.

2. According the document ‘Power Engineering Policy for Poland until 2030’ approved by the Cabinet, the power engineering sector is going to be the driving force for the development of Polish economy (including welding engineering sector). One of the factors affecting the development of power engineering is the requirements issued by the European Union in relation to the reduction of CO₂ emissions, making it necessary to modernise the existing power units and transmission grids as well as to build new ones, diversify Poland’s power generation by building nuclear power plants and implementing renewable energy solutions connected with wind, water, solar or biofuels. All the investments connected with the excavation of shale gas will also be of importance to the welding engineering sector.

3. All the above-mentioned changes will not be possible without new technologies and solutions in welding engineering.



4. The prospects of the development of wind power engineering: at the premises of one of Polish shipyards ('Gryfia') a modern 'off-shore' unit is being built. It is a joint venture of three companies: German Bilfinger Berger, Gdynia's Shipyard's "Crist" and MARS Closed-end Investment Fund (belonging to ARP — Industrial Development Agency). The target production is to bring 80,000 ton of steelwork making up foundations for off-shore wind turbines, with the main customers being German and British companies.

5. Gdańsk Shipyard has started the production of wind turbines. The target production aims at 300 turbines annually making the shipyard the biggest manufacturer of offshore wind turbines in Europe.

6. In Goleniów Dutch Glasfiber has set up a plant manufacturing blades for wind power plants.

7. As many as 32 application forms have been submitted to Poland's authorities requesting permission to locate off-shore wind farms.

8. There is a slowdown in the building sector. However, taking into account the needs of the whole infrastructure and planned subsidies from the European Union funds, the building sector still has a chance to favour the development of the welding engineering industry.

9. Planned investments in renewable sources of energy, waste incineration plants, railway sector and further investment in road infrastructure bode well for the welding sector.

10. There has been 3 bn PLN allocated for the modernisation of railway lines so far but this amount will be probably increased to about 10 bn PLN.

11. The automotive and aviation sectors are the driving force for the progress in welding engineering. The share of the automotive sector in creating the added value constitutes 5% of the general added value of the industry. This is far less than in developed countries but there is some success in this area too.

12. Poland is a number-one manufacturer of buses in Europe.

13. The aviation industry in Poland has numerous relations with the world's aviation companies. The companies that have opened their branches in Poland include Meyer Tool — an American manufacturer of spare parts for aviation industry, Sandvik — a Swedish producer of cutting tools, acid-resistant steel, electroresistant materials and conveyor belts, Pratt&Whitney Canada — the world's leader in the production of engines, Vac Aero International Canada. At present, most of the companies in this sector belongs to foreign investors. The aviation industry in Poland is represented by the association 'Dolina Lotnicza' ('Aviation Valley') which encompasses 77 companies employing 22 thousand engineers and technicians.

Conclusions

Assets of contemporary welding engineering

- reliable production and distribution base of welding materials and equipment
- welding personnel's high qualifications and extensive experience in production
- structure/hierarchy of applied welding technologies consistent with the world's trends
- big potential and manufacturing capacity of the manufacturers of welded products and steelwork
- excellent research and testing facilities as well as experienced researchers
- broad scope of research taking into account the world's trends

Weaknesses of contemporary welding engineering

- inadequate level of automation and robotisation
- insufficient application scope of the latest technologies
- inadequate participation of companies in financing innovative solutions
- too low outlays for R&D and too low share of R&D in innovative activity

The future of welding engineering will depend on:

- research conditioning the development of structural materials and technologies of joining them
- level of welding personnel
- innovative approach of companies
- general economic situation

1. Pilarczyk, J. (2010) Tradycja spawalnictwa w Polsce i rola w niej Instytutu Spawalnictwa (The history of welding technology in Poland and the role of Instytut Spawalnictwa in its development). *Konstrukcje Stalowe*, **1**.
2. Pilarczyk, J., Zeman, W. (2011) Spawalnictwo na tle gospodarki krajowej pod koniec pierwszej dekady XXI wieku (Welding in the national economy at the end of the first decade of XXI century). *Przegląd Spawalnictwa*, **11**.
3. Herman, P. R. (2009) MIE University of Toronto, Laser Applications in Manufacturing, Industrial Laser Solutions, January 2009, -Keeping the Economy in Perspective.
4. Karabegovic, I., Karabegovic, E. Pasic, S. et al. (2012) Worldwide trend of the industrial robot applications in the welding processes. *Int. J. of Engineering*, **1**, 69-74.
5. Zeman, W. (2011) Analiza nakladów na projekty badawcze związane ze spawalnictwem w Polsce w latach 2008-2011 (Analysis of costs of research projects on welding technology, executed in Poland in 2008-2011). Instytut Spawalnictwa, grudzien.
6. Makowieckaja, O. K. (2011) Obecna sytuacja na rynku głównych materiałów konstrukcyjnych i techniki spawalniczej. Perspektywy rozwoju. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **4**.
7. Pilarczyk, J., Banasik, M., Stano, S. et al. (2011) Spajanie laserowe z materiałem dodatkowym i mechanicznym układem sledzenia zlacza (Laser joining with wire filler material and mechanical steam tracing system). *Przegląd Spawalnictwa*, **12**.
8. Pilarczyk, J., Banasik, M., Stano, S. et al. (2010) Centrum laserowe Instytutu Spawalnictwa E mozliwosci, badania i zastosowania przemyslowe (Laser Centre at the Instytut Spawalnictwa — abilities, research and industrial applications). *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **5**.

Recieved 07.03.2013



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРКИ

Н. П. АЛЕШИН

Федеральное Государственное автономное учреждение «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э.Баумана.
РФ. 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5. E-mail: aleshin@bmstu.ru

Рассмотрены современные отечественные и зарубежные высокоинформативные виды оборудования для акустического контроля сварных соединений трубопроводов. Отмечены их возможности и недостатки. Описаны преимущества разработанного МГ ФГАУ «Сварка и контроль» совместно с предприятием «Молния» комплексного сканера, в котором реализованы ультразвуковой, вихретоковый и визуальный методы контроля. Приведены примеры применения для контроля сварных соединений в атомной энергетике системы АВГУР, а также портативного прибора АСБАТ, прошедшего межведомственные испытания и внедренного на объектах ОАО «Газпром». Табл. 1, рис. 11.

Ключевые слова: акустический контроль, сварные соединения трубопроводов, сканер-дефектоскоп, характеристики систем контроля, портативный прибор, головная волна

В связи с большой изношенностью (более 65 %) технологического оборудования и необходимостью надежной диагностики сооружаемых объектов значение неразрушающих методов контроля весьма велико.

В США стоимость контрольных операций при производстве отдельных изделий ВПК достигает 25...35 % от общей стоимости изделий. В строительной индустрии эти затраты составляют 10...12 %. В России же затраты на контроль и диагностику ниже в 15...20 раз, вследствие чего число аварий на объектах различного назначения в порядок выше, чем на Западе.

Потребность в надежном высокоинформативном оборудовании особенно актуальна для топливно-энергетического комплекса, где аварии сопряжены не только с большими экономическими потерями, но и катастрофическими последствиями.

Из всего многообразия способов диагностики при изготовлении, строительстве и эксплуатации конструкций наибольшее применение нашли акустические. При оценке технического состояния магистральных трубопроводов, газгольдеров, резервуаров наиболее эффективными средствами контроля качества сварных швов являются автоматизированные ультразвуковые сканеры-дефектоскопы Автокон-АР-МГТУ.

Автономная роботизированная система представляет собой механизм передвижения, на котором расположены 32-канальный ультразвуковой дефектоскоп с управляющим процессором и акустическая система, состоящая из двух 16-элементных совмещенных преобразователей (ИП), реализующих технологию контроля с использованием

фазированных решеток с апертурой качания луча в диапазоне 40° при частоте 8 МГц (рис. 1).

Два других 16-элементных преобразователя, работающих в раздельном режиме, обеспечивают технологию контроля с использованием дифракционно-амплитудно-временного метода (ТОFD) (рис. 2, а).

При TOFD фиксируют и записывают сигналы, рассеянные на краях дефектов и отображают на экране В-скан (рис. 2, б).

Система устанавливается на контролируемом изделии и перемещается вдоль сварного стыка, автоматически отслеживая его без каких-либо дополнительных приспособлений. Механизм сканирования удерживается на поверхности трубы встроенными в колеса постоянными магнитами. Установка малогабаритна, проста в эксплуатации, обслуживается двумя операторами.

Сравнительные характеристики роботизированных систем приведены в таблице.

Отечественный прибор, наряду с отмеченными

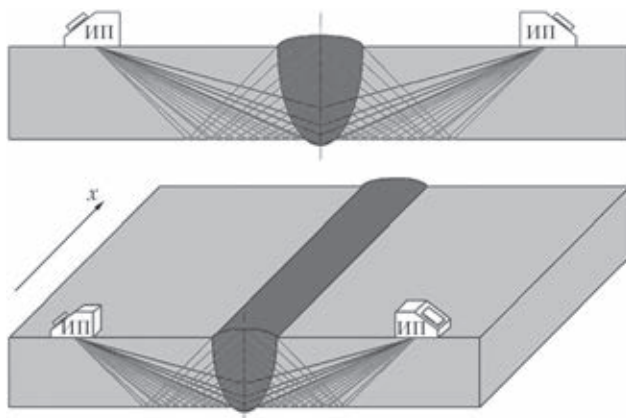


Рис. 1. Акустическая система сканера-дефектоскопа Автокон-АР-МГТУ с фазированными решетками

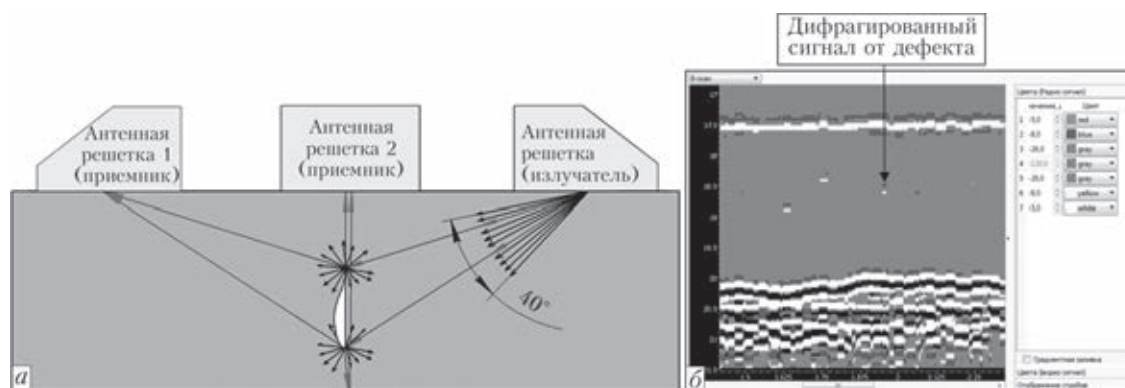


Рис. 2. Акустическая система сканера-дефектоскопа Автокон-АР-МГТУ с антенной решеткой типа «дуэт» (а) и дифрагированные сигналы (б)

выше преимуществами (таблица), позволяет контролировать изделия любой формы (плоские листы, резервуары, газгольдеры и т. д.). Пример дефектоскопии кольцевых стыков трубы приведен на рис. 3.

Следует отметить, что существующий лучший зарубежный аналог Pipe WIZARD-PA (фирма RTD) может контролировать только кольцевые стыки (рис. 4) магистральных трубопроводов.

Существующие ультразвуковые сканеры Автокон-АР-МГТУ, «Сонет», УСД-60 и др. не позволяют с высокой степенью вероятности обнаруживать стресскоррозионные повреждения в магистральных трубопроводах. С целью исклю-

чения указанного недостатка и увеличения выявляемости наружных и внутренних дефектов в МГ ФГАУ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана совместно с НПП «Молния» разработали комплексный сканер, в котором реализованы ультразвуковой, вихретоковый и визуальный методы контроля (рис. 5, а). Он предназначен для контроля трубопроводов диаметром 720...1420 мм с толщиной стенки до 35 мм при температуре от -40 до +40 °С. При движении по винтовой линии скорость до 3 м/мин, ширина зоны сканирования составляет 280 мм за один оборот. Результаты диагностирования представляют в виде сканограммы (рис. 5, б).

Сравнительные характеристики роботизированных систем контроля Pipe WIZARD-PA (RD TECH™) и Автокон-АР МГТУ

Параметр или характеристика	Pipe WIZARD-PA	Автокон-АР-МГТУ	Примечание
Автономность	В пределах длины кабеля связи перемещаемого блока и шланга для подачи контактной жидкости	Полная	При контроле трубопроводов основной блок Pipe WIZARD-PA размещают на автомобиле, длина кабеля и шланга ≥ 20 м
Способ сканирования	Автоматический, вдоль направляющей, устанавливаемой на сварной шов	Автоматический, без дополнительных приспособлений	АВТОКОН-АР-МГТУ снабжен датчиком слежения за валиком усиления шва или гибкой ленты
Масса, кг	Более 50 кг без учета массы внешнего компьютера, сосуда с контактной жидкостью, шлангов и кабелей	≤ 18	Pipe WIZARD-PA не может транспортироваться вручную
Диапазон контролируемых толщин основного металла трубопровода, мм	7...32	6...35 (при замене акустических блоков)	В основном толщина основного металла трубопроводов ≥ 8 ...30 мм
Диапазон рабочих температур, °С	-15...+30	-40...+50	Контролировать чаще всего приходится при отрицательных температурах
Основные результаты контроля	Обнаружение дефектов, определение их местоположения и измерение условных размеров	Обнаружение дефектов, определение их местоположения и измерение условных размеров	—
Функция слежения за акустическим контактом	Да (отдельный преобразователь по отражению от внутренней поверхности трубы)	Да (при каждом запуске любого канала без использования дополнительной аппаратуры)	—
Объем контроля	Кольцевые швы	Кольцевые и продольные швы, тело трубы	—

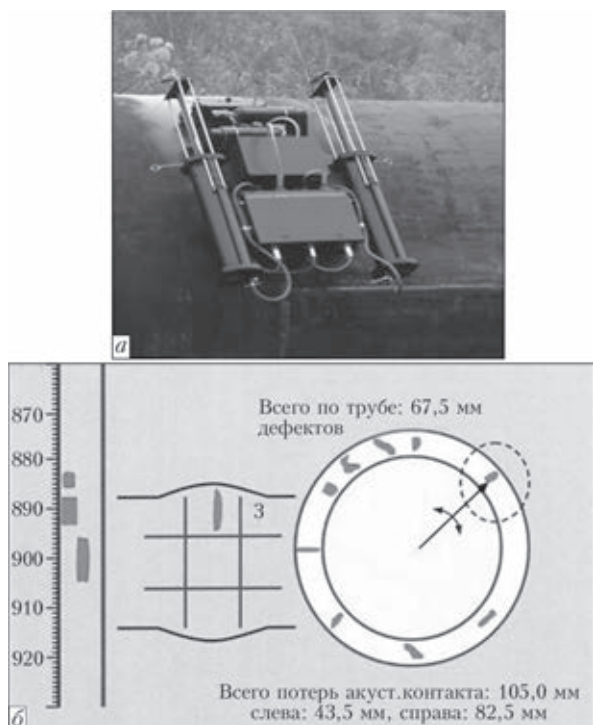


Рис. 3. Сканер-дефектоскоп Автокон-АР-МГТУ (а) и отображение результатов контроля на экране монитора (б)

При контроле качества сварных стыковых соединений трубопроводов первого контура реактора ВВР-1000 наиболее эффективными являются системы АВГУР 5.2 (рис. 6), разработанные в НПО «Эхо+».

Для этих соединений характерны большая толщина (72 мм) и наличие галтели, от которой чаще всего зарождаются трещины в процессе эксплуатации. Система Авгур 5.2 с высокой достоверностью выявляет встречающиеся дефекты и позволяет уверенно идентифицировать их размеры и конфигурацию (рис. 7).



Рис. 4. Сканер Pipe WIZARD-PA

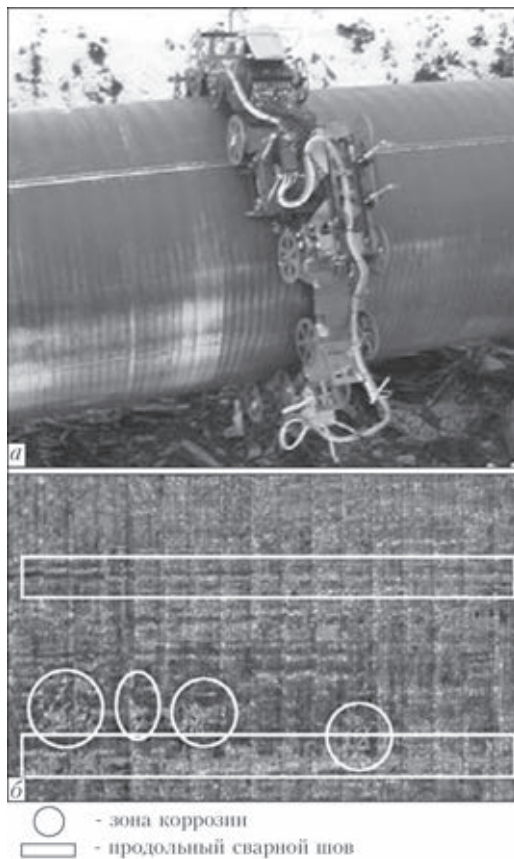


Рис. 5. Автоматизированная комплексная система для контроля магистральных трубопроводов (а) и сканограмма дефектов (б)

Система АВГУР 5.2 при незначительном перекомплектовании успешно используется для контроля гибов трубопроводов первого контура реактора ВВР-1000 (рис. 8).

Для оценки работоспособности объекта не всегда достаточно знать форму, размеры и координаты дефектов. Значительное влияние на уровень напряжен-

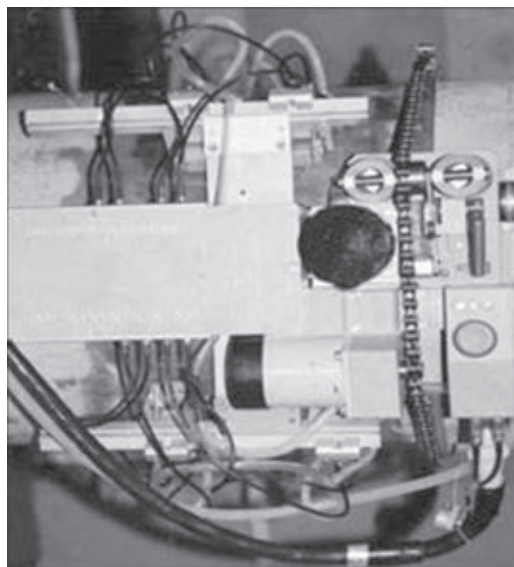


Рис. 6. Система АВГУР 5.2 для автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных стыковых соединений трубопроводов первого контура реактора ВВР-1000

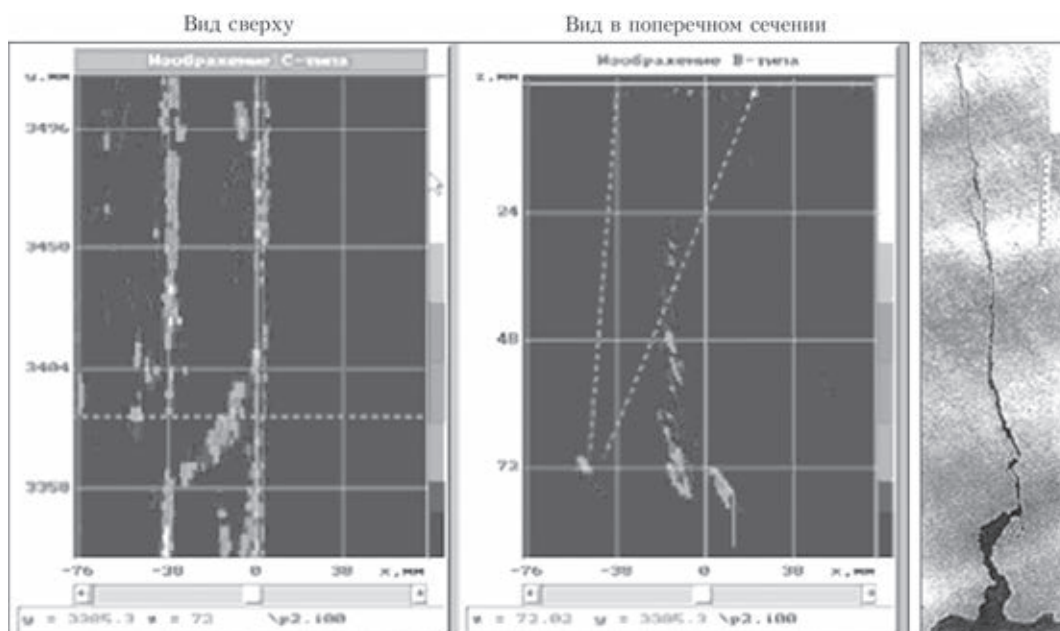


Рис. 7. Изображение дефекта в сварном соединении с углом ввода ПЭП 400



Рис. 8. Система АВГУР 5.2 для автоматизированного ультразвукового контроля гибов трубопроводов первого контура реактора ВВР-1000

но-деформированного состояния оказывает наличие остаточных напряжений в различных элементах конструкций, особенно в зоне дефектов.

Известно множество приборов для оценки остаточных напряжений, действие которых основано на измерении различных характеристик магнитных, электромагнитных или ультразвуковых полей. Общим их недостатком является низкая точность измерения (20...25 %). Из известных систем измерения внутренних напряжений наиболее совершенной является установка LZM-USJzfp (Институт неразрушающего контроля Германии), принцип действия которой основан на измерении поперечных скоростей УЗ-волн во взаимно перпендикулярном направлении. При этом возбуж-

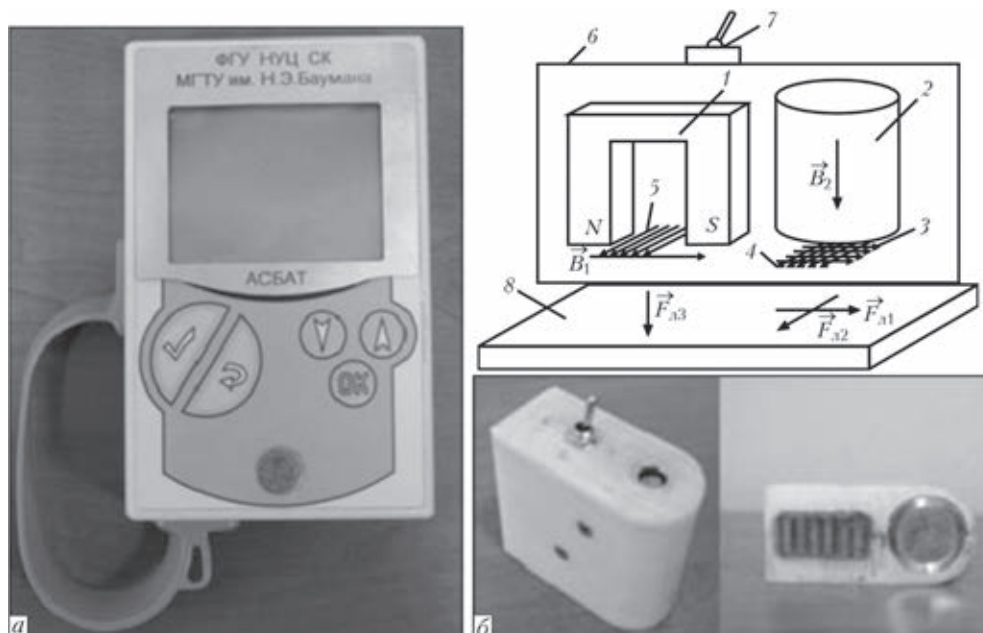


Рис. 9. Аппаратное средство бесконтактной акустической тензометрии (АСБАТ) (а) и комплексный датчик (б) (1–7 – см. в тексте)

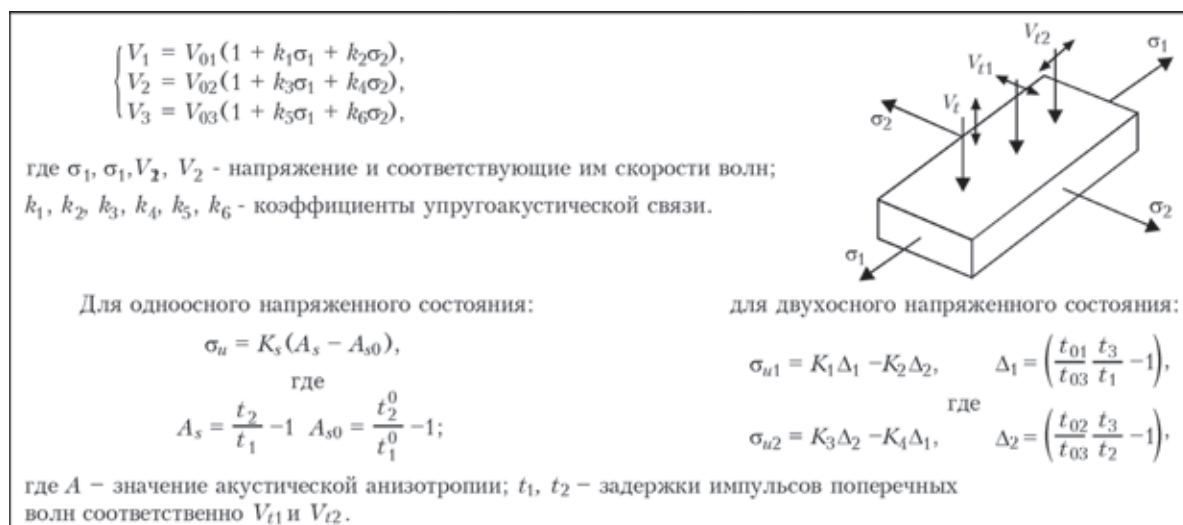


Рис. 10. Методика определения интегрального по толщине значения механических напряжений

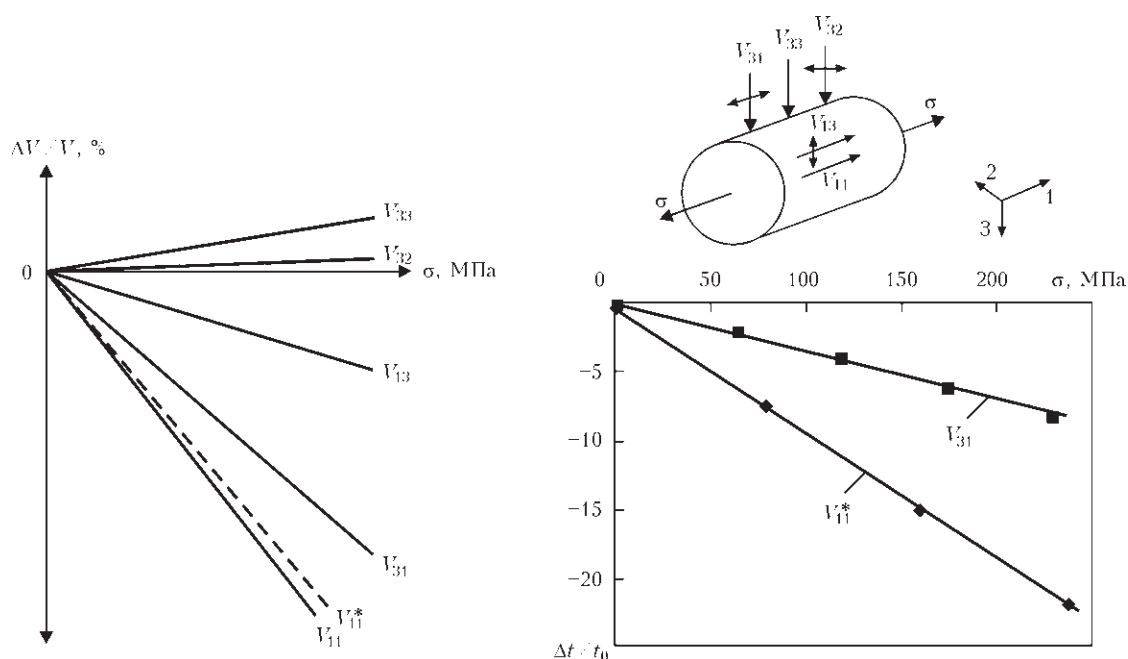
ление SH-волн осуществляется ЭМА-преобразователями. Данная система позволяет измерять только одноосно-напряженное состояние с точностью 5 м/с, что не всегда удовлетворяет заказчика.

В МГ ФГАУ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана разработан портативный прибор АСБАТ (рис. 9, а) для оценки значений механических напряжений при одно- и двухосном напряженно-деформированном состоянии по толщине объекта путем измерения скоростей трех типов волн: две поперечные волны с взаимно перпендикулярной поляризацией и продольная. Направление распространения этих волн перпендикулярно плоскости действия напряжений (рис. 10).

Метод основан на эффекте двулучепреломления, т. е. явлении разложения в анизотропных средах звуковой волны на две составляющие, где

колебания частиц в этих двух волнах взаимно перпендикулярны (рис. 10). Для реализации этого эффекта разработан комплексный ЭМА-преобразователь (рис. 9, б).

В едином корпусе 6 расположены две магнитные системы 2 и 1. Магнитная система 2 (с катушкой переменного тока 3) предназначена для возбуждения поперечной волны в объекте контроля 8 под действием силы Лоренца $F_{л2}$. Магнитная система 2 (с катушкой переменного тока 4) предназначена для возбуждения поперечной волны в объекте контроля 8 под действием силы Лоренца $F_{л1}$. Катушки 3 и 4 расположены друг под другом и ориентированы взаимно перпендикулярно для возбуждения поперечных волн со взаимной перпендикулярной поляризацией. Магнитная система 1 (с катушкой переменного тока 5) предназначена для возбуждения в объекте

Рис. 11. Зависимость чувствительности головной волны от механического напряжения: V_{11} — продольная; V_{11}^* — головная; V_{13} — Рэлея; $V_{31}-V_{33}$ — поперечные волны



контроля 8 продольной волны под действием силы Лоренца $F_{\text{лз}}$, направленной перпендикулярно объекту контроля. Для выбора режима предназначен переключатель 7.

Реализация многократных эхосигналов сдвиговых волн с радиальной поляризацией в анизотропных пластинах и сдвиговых волн с линейной поляризацией со смещением под углом 45° к направлению проката характерна тем, что в зависимости от степени анизотропии материала уже для второго-третьего эхо-сигнала четко наблюдается разделение импульсов. Это можно объяснить тем, что сдвиговые волны в процессе своего распространения расщепляются на две волны с колебательными смещениями вдоль и поперек направления проката, распространяющиеся с разными скоростями.

С увеличением степени анизотропии материала возрастает взаимное временное смещение импульсов обоих компонентов сдвиговых волн при неизменном пути их распространения в материале (толщина постоянна). При достаточно большом пути распространения сигнала относительное

время смещения импульсов волн с различной поляризацией достигает величины интервала двукратного прохождения каждой из волн по толщине слоя и превышает ее.

При приложении нагрузки к объекту контроля вдоль одной из осей анизотропии увеличивается степень анизотропии, тем самым возрастает взаимное временное смещение импульсов двух волн со взаимоперпендикулярной поляризацией. Изменение относительной разницы скоростей волн в начальном (ненагруженном) и конечном (нагруженном) состоянии пропорционально действующему напряжению.

Для обеспечения большей чувствительности к механическим напряжениям авторами предложено использовать в контактном варианте головную волну. Эксперименты и расчеты показали, что ее чувствительность по сравнению с поперечной волной для стали 30 выше в 2,7 раза (рис. 11).

АСБАТ прошел межведомственные испытания и после соответствующей сертификации внедрен на объектах ОАО «Газпром».

Поступила в редакцию 12.04.2013



ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ¹, В. А. КОВТУН²

¹ Гомельский филиал НАН Беларуси. Беларусь. 246000, г. Гомель, ул. Кирова, 32, а

² Гомельский инженерный ин-т Мин-ва по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.
Беларусь. 246023, г. Гомель, просп. Речицкий, 35, а. E-mail: vadimkov@vandex.ru

Представлены модельно-теоретические подходы к оптимизации структурно-технологических условий электроконтактного спекания металлополимерных покрытий. Показано, что применение методов компьютерного моделирования зон формирования порошковых композиционных материалов на принципах мезомеханического подхода с использованием структурных моделей, адаптированных к широкому диапазону значений технологических параметров и свойствам исходных компонентов порошковой системы, позволяет устанавливать закономерности влияния технологических факторов и структурных особенностей, а также характеристик исходных компонентов дисперсных порошковых систем на процессы структурообразования спеченных слоев. При этом определяющее значение имеет учет локального воздействия тепловых факторов и внутренних напряжений, возникающих в процессе формирования покрытий. Библиогр. 4, табл. 1, рис. 9.

К л ю ч е в ы е с л о в а : электроконтактное спекание, металлополимерные композиционные покрытия, медная матрица, компьютерное моделирование, параметры спекания, структурно-технологические факторы, формирование покрытий

Перспективным направлением повышения эксплуатационного ресурса и расширения нагрузочно-скоростных режимов работы машин и механизмов является использование в узлах трения наноструктурированных углеродными нанотрубками и нанолуковицами металлополимерных композиционных самосмазывающихся материалов и покрытий на основе порошковой медной матрицы [1]. Однако введение полимерных наполнителей и наноструктур углерода известными технологическими приемами непосредственно в порошковую шихту и получение качественных материалов на основе металлической матрицы классическими методами порошковой металлургии весьма затруднено вследствие низких температур плавления и термостойкости полимеров. Решить данный вопрос позволяет метод электроконтактного спекания [2, 3], относящийся к разряду высокоскоростных и высокоэнергетических способов получения материалов и покрытий из порошковых композитов. Таким образом, его основная особенность заключается в возможности получения покрытий из порошковых материалов с различными физико-химическими свойствами.

Следует отметить, что свойства композиционных материалов с металлической матрицей обусловлены влиянием ряда факторов: свойств, количества и типа матрицы и наполнителя; вида и

характера распределения наполнителя в матрице; конструкции композита и технологии его получения; внешних воздействий. Поэтому знание закономерностей, обуславливающих наличие в композите тех или иных свойств, возможность прогнозирования и управления характером развития процессов теплопередачи и структурирования в ходе контактного взаимодействия дисперсных компонентов металлополимерных систем, особенно при высокоскоростном тепловом воздействии электрическим током, позволит рационально использовать существующие и создавать новые композиционные материалы с высоким уровнем эксплуатационных характеристик [4].

В процессе формирования структуры и свойств нанонаполненных металлополимерных порошковых покрытий возникают серьезные проблемы, связанные с тем, что и порошковые металлические матрицы, и дисперсные включения при высокоскоростном воздействии электрическим током воспринимают различные типы термонапряжений в зависимости от уровня температурного воздействия и вида тепловыделений, определяемых технологическими и структурными факторами. Такие порошковые системы целесообразно рассматривать как структурную последовательность, включающую дисперсную матрицу, зону контактного взаимодействия и дисперсный



наполнитель. Поэтому с точки зрения термомеханики адаптивных материалов исследование термонапряженного состояния наноструктурированных металлополимерных дисперсных систем при высокоскоростном воздействии электрическим током и установление закономерностей структурных превращений в зонах контактного взаимодействия металл – полимер представляется весьма сложной и нетрадиционной задачей.

Модельно-теоретические подходы к оптимизации параметров электроконтактного спекания порошковых покрытий. Одним из важных технологических параметров электроконтактного спекания порошковых композиций является время спекания, которое в значительной степени влияет на характер протекания процессов структурообразования в порошковых слоях и предопределяет прочностные характеристики и качественные показатели материалов. Время электроконтактного спекания металлических порошков и композиционных покрытий на их основе также оказывает значительное влияние на характер проявления в порошковом слое сопутствующих электрофизических процессов. В частности, на уровень влияния порождаемых электрическим током и возникающих в материале скин-эффекта, который заключается в вытеснении линий протекания электрического тока на поверхность токопроводящего элемента и может приводить к преимущественному спеканию порошка на периферии порошкового слоя, а также пинч-эффекта, который может приводить к искажению формы поверхности порошкового слоя. При этом во время выделения энергии при прохождении электрического тока через порошковую систему возможно возникновение ударных волн и их диссипация. В связи с этим оптимизация и установление эффективного времени спекания порошковых композиций, обеспечивающего достижение температур спекания порошковой системы и заданных прочностных характеристик металлической матрицы, представляются весьма важными при разработке технологии формирования композиционных порошковых покрытий электроконтактным спеканием.

Для установления оптимального времени спекания порошковых тонкослойных покрытий, учитывающего характер влияния некоторых указанных выше факторов, проведено модельно-теоретическое исследование протекающих физи-

ческих процессов. Для этого была разработана методика моделирования стадий прохождения электрического тока через мезофрагмент насыпного порошкового слоя меди и разработаны компьютерные структурные модели зон контактного взаимодействия электроды – порошковый слой, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояния материалов при приложении внешних воздействий, а также позволяющие наблюдать в реальном масштабе времени развитие электродинамических и тепловых процессов в мезофрагментах порошкового слоя, формируемого электроконтактным спеканием.

Исследования проведены для случая формирования покрытия с толщиной насыпного слоя 300 мкм из медного порошка марки ПМС-1 с размером частиц 100 мкм на поверхность медной подложки при помощи электродов, изготовленных из меди марки М1, когда плотность электрического тока составляет 400 А/мм². Алгоритм решения поставленной задачи заключается в следующем: составление содержательного описания модели с обоснованием объекта исследования и уточнением связей компонентов системы; формализация модели; программирование модели с обоснованием выбора средств; испытания модели и получение достоверных результатов. В таблице приведены физические характеристики материалов, необходимые для моделирования. Температурный коэффициент сопротивления для меди соответствовал значению 0,0068 град⁻¹, а коэффициент теплоотдачи для нагретых поверхностей при скорости воздушного потока для закрытых помещений 0,2 м/с составлял 5,2 Вт/м² град.

В общем случае при пропускании электрического тока через порошковый слой можно весь процесс разложить на некоторое количество стадий и рассматривать спекание порошкового материала на каждой стадии как отдельный процесс, исходными расчетными параметрами которого являются конечные расчетные параметры предыдущего этапа.

Большое значение при электроконтактном спекании имеет его первая стадия, длительность которой составляет до 0,3 с. При приложении разности потенциалов к спекаемому порошковому слою происходит резкое нарастание тока. Время, в течение которого происходит нарастание тока, не зависит от формы и площади поперечного сечения

Свойства элементов расчетной модели мезофрагмента зоны электроконтактного спекания порошкового слоя

Элементы модели	Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(К·м)	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·К)	Удельное электросопротивление ρ , Ом·м	Плотность γ , кг/м ³
Электрод	Медь М1	390	$0,38 \cdot 10^3$	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$8,93 \cdot 10^3$
Порошок	Медь ПМС-1	365	$0,39 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^3$
Оксидный слой	Cu ₂ O	1,013	$0,429 \cdot 10^3$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^3$
Поры	Воздух	0,027	$1,009 \cdot 10^3$	–	1,293

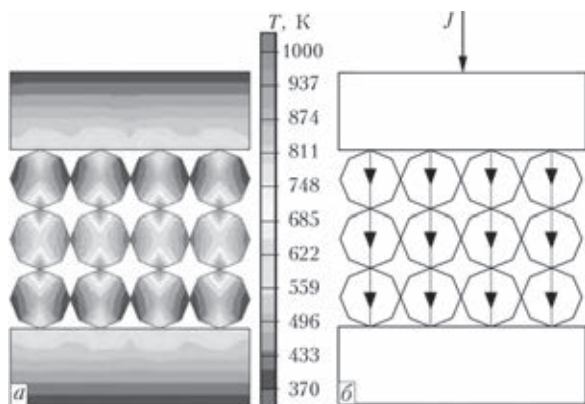


Рис. 1. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на первой стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,3 с

прессовки, но в то же время зависит от ее высоты: с увеличением высоты увеличивается время нарастания. Однако необходимо отметить, что время нарастания тока значительно уменьшается при увеличении прикладываемого усилия и подводимого напряжения.

Характерной особенностью первой стадии является преимущественное тепловыделение на межчастичных контактах, обусловленное прохождением тока через поверхностные слабо проводящие слои (рис. 1, а).

Следует отметить, что при этом возможно образование искрения. На первой стадии электрический ток протекает параллельно линиям напряженности электрического поля, образуя при этом отдельные цепочки (рис. 1, б). При этом ток в каждой цепочке имеет примерно одинаковое значение. Таким образом, необходимо отметить, что в начале процесса спекания отсутствует значительный нагрев самих частиц, а преимущественное тепловыделение происходит на контактом сопротивлении. Средняя температура порошкового слоя на первой стадии не превышает 573...623 К. В

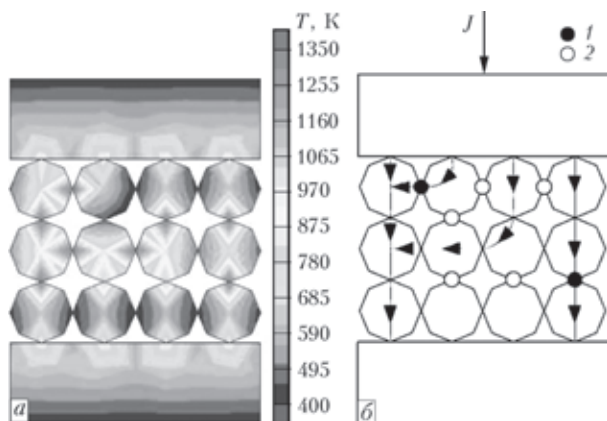


Рис. 2. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на первом этапе второй стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,4 с: 1, 2 – контакты, в которых металл находится соответственно в твердо-жидком и жидком состоянии

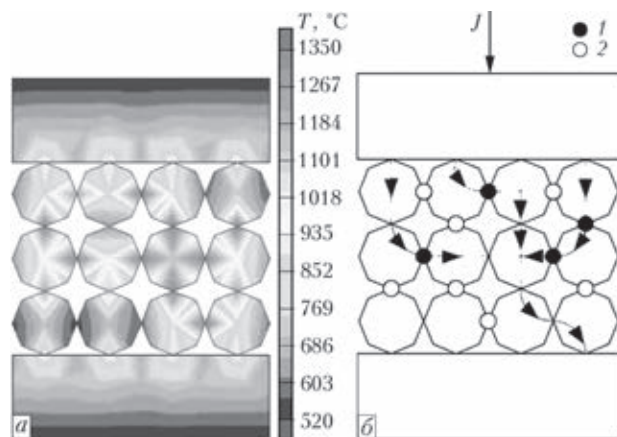


Рис. 3. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на втором этапе второй стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,5 с (обозначения 1, 2 — те же, что и на рис. 2)

случае, если интенсивность тепловыделения при прохождении тока через порошковый слой превышает количество тепла, затрачиваемого на нагрев металла в зоне контактного взаимодействия частиц в твердой фазе до температуры плавления, а также на конвективный теплообмен с окружающей средой и теплопередачу в электроды, то часть металла может переходить в жидкое состояние.

На второй стадии благодаря нагреву, происходящему при пропускании электрического тока, согласно закону Джоуля–Ленца, температура контактных поверхностей частиц порошкового материала значительно превышает температуру самих частиц и достаточна для плавления оксидной пленки и части металла. Быстрое выделение большого количества тепловой энергии вблизи межчастичного контакта может привести к отколу мельчайших частиц, находящихся в твердой фазе. Однако данное явление не оказывает большого влияния на процесс спекания. При плавлении оксидного слоя и незначительной части металла, находящегося в контактом взаимодействии, отталкивающие силы, возникшие в результате теплового расширения, уменьшаются более чем в 10 раз. В результате плавления части металла возникают жидкометаллические мостики. Необходимо отметить, что удельное электрическое сопротивление жидкой меди в несколько раз превышает удельное электрическое сопротивление твердой меди. В частности, при нагреве меди до 970 °C удельное электрическое сопротивление повышается до $9,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. При повышении температуры, снижении давления и, как следствие, повышении электрического сопротивления в контакте частиц происходит потеря устойчивости и деструкция жидкометаллических мостиков, что неизбежно ведет к изменению пути прохождения электрического тока по порошковому слою, а прохождение тока осуществляется через нерасплав-

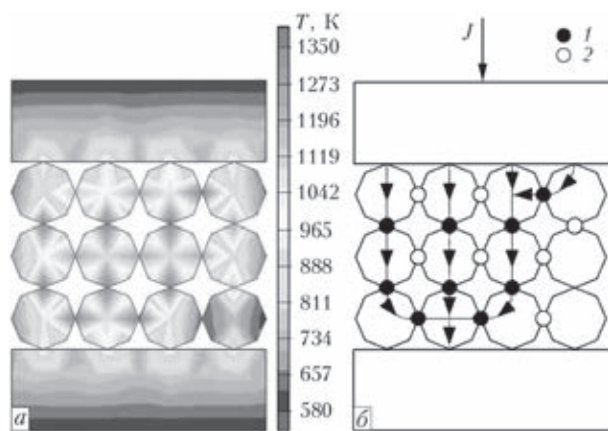


Рис. 4. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на третьем этапе второй стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,6 с (обозначения 1, 2 — те же, что и на рис. 2)

ленные контакты, которые имеют более низкое сопротивление. Таким образом, происходит возникновение подобных жидкометаллических мостиков на других контактах частиц порошка.

Длительность второй стадии длится, начиная с 0,3 с и заканчивается на 0,6 с. При этом результаты компьютерного моделирования показали, что средняя температура в порошковом слое на данной стадии превышает 623 К. Так как вторая стадия электроконтактного спекания порошкового материала характеризуется большим числом изменений путей прохождения электрического тока, то при моделировании ее необходимо разложить на несколько этапов.

Пути прохождения линий электрического тока и модель теплового состояния мезофрагмента зоны электроконтактного спекания порошкового слоя на первом этапе второй стадии спекания

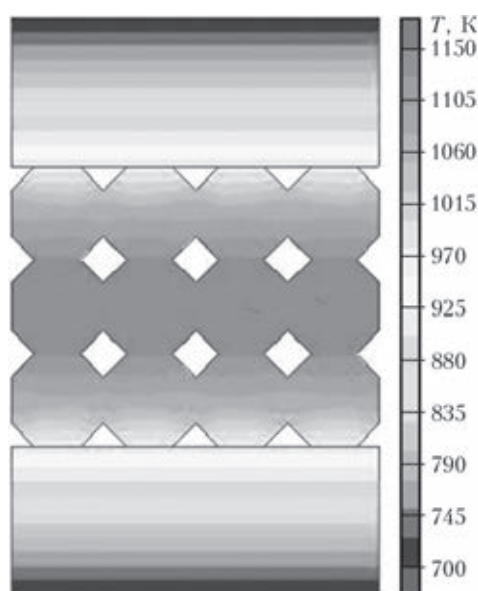


Рис. 5. Модель совмещенного теплового и деформированного состояния, сформированного электроконтактным спеканием порошкового медного слоя по истечении времени спекания 1,2 с при воздействии на мезофрагмент сжимающей нагрузки 150 Н

представлены на рис. 2, на втором этапе второй стадии спекания — на рис. 3, на третьем этапе второй стадии спекания — на рис. 4.

На представленных моделях видно, что пути прохождения электрического тока с увеличением времени спекания захватывают все контакты, подплавляют их, способствуя тем самым соединению частиц меди и спеканию порошковой системы. При этом результаты компьютерного моделирования теплового состояния медного порошкового слоя в процессе электроконтактного спекания показали удовлетворительную корреляцию с результатами экспериментальных исследований. После прохождения тока через межчастичные контакты их плавление сопровождается повышением электрического сопротивления и описанный выше процесс повторяется вновь до плавления всех частиц металла либо до прекращения подачи тока. Металл на контактных участках частиц переходит в расплавленное или сильно размягченное состояние. Частицы порошковой системы начинают незначительно смещаться друг относительно друга, что ведет к уплотнению композиционного материала.

В результате описанных выше процессов образуется незначительное количество жидкой фазы и интенсивное спекание порошковой системы. Необходимо отметить, что на заключительной третьей стадии, которая начинается на 0,6 с и заканчивается на временном диапазоне порядка 1,1...1,3 с происходит повышение средней температуры порошковой системы, которая достигает значений до 1073...1123 К, что соответствует уровню температур спекания медной матрицы. На данной стадии также происходит завершение процессов уплотнения порошкового слоя посредством пластической деформации (рис. 5). При повышении давления в порошковой системе путем подачи усилия на электрод происходит возрастание напряжения в частицах и их упругое деформирование. После достижения напряжений в частицах, превышающих предел текучести материала, происходит их пластическое деформирование. Материал частиц стремится заполнить исходное межчастичное поровое пространство. Как следствие повышается плотность материала. В то же время при увеличении контактной поверхности происходит снижение контактного сопротивления между частицами. При этом в порошковом слое происходит снижение эквивалентных напряжений по Мизесу, максимальные значения которых составляют порядка 112...156 МПа. В результате воздействия электрическим током и приложения давления формируется металлическая медная матрица, имеющая относительную плотность 80...90 %. Необходимо отметить, что



с уменьшением геометрических размеров частиц спекаемой порошковой системы сопротивление прессовки увеличивается. Данное явление можно объяснить тем, что с увеличением количества компонентов системы определенного объема увеличивается прямо пропорционально количество электрических контактов, вследствие чего снижается проводимость порошкового слоя.

На рис. 6 представлены зависимости температуры порошкового слоя, полученные в результате компьютерного моделирования теплового состояния зоны электроконтактного спекания порошкового медного слоя с применением разработанной структурной модели, учитывающей структурные особенности формируемого порошкового композита, а также в результате экспериментальных исследований. Определение температуры в порошковом слое проводили на специально разработанном рабочем макете установки при ее совместном использовании с машиной контактной шовной сварки МШ-3207 в режиме точечного спекания. Нагрузка на порошковый слой меди осуществлялась только под действием силы тяжести электрода. Регистрация температуры в зоне спекания осуществлялась с помощью хромель-алюмелевой термопары на электронном потенциометре Мемограф с автоматической обработкой сигналов, оснащенного интерфейсом RS485 для параметрирования и переноса данных в компьютер.

Как видно, разница между значениями температур, полученными в результате экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, во всем диапазоне изменения времени спекания не превышает 10...15 %, что можно считать достаточно приемлемым в случае формирования порошковых слоев данным высокоскоростным методом электроконтактного спекания.

Модельно-теоретическое описание влияния структурно-технологических факторов на тепловое состояние зоны формирования металлополимерных порошковых покрытий на основе меди в процессе электроконтактного спекания. В процессе электроконтактного спекания порошковых металлополимерных систем особую значимость приобретают вопросы теоретического описания и исследования процессов переноса и распространения тепла в зонах формирования покрытий. При этом необходимо учитывать, что быстрое выделение тепловой энергии вблизи межчастичного контакта вследствие прохождения электрического тока, и особенно, когда между смежными металлическими частицами имеются диэлектрические пространства (воздух, диэлектрический наполнитель, оксидная пленка и т.д.), может приводить к возникновению разнообразных явлений, определяемых электрическими,

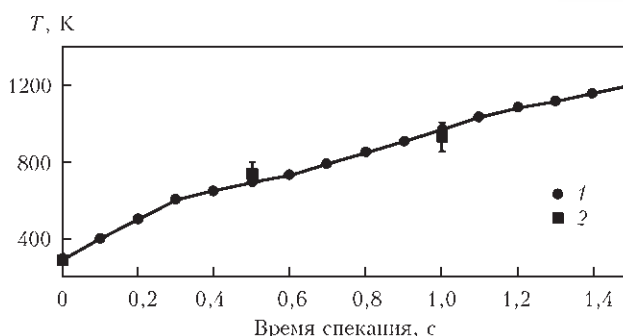


Рис. 6. Зависимости температуры в порошковом слое от времени спекания при воздействии электрическим током: 1 — результаты компьютерного моделирования; 2 — экспериментальные значения

теплофизическими и механическими характеристиками компонентов. Вызывает также научный интерес исследование теплового состояния электродов-пуансонов, поскольку на процессы распространения тепла в них значительно влияют размеры площади контакта со спекаемым материалом и природа порошковой композиционной системы. Необходимо также отметить, что теоретическое описание, исследование и анализ полей распределения температур, градиента температур и тепловых потоков, а также получение корректных результатов исследований позволяют оптимизировать и прогнозировать распределение температур, тепловых потоков и градиента температур внутри композиционного металлополимерного порошкового материала при изменении структурно-технологических условий.

В связи с указанным выше была решена компьютерная плоскопараллельная задача стационарной теплопередачи при электроконтактном спекании металлополимерных порошковых систем с медной матрицей, когда температура между двумя электродами и в зоне спекания достигает 1073 К, т.е. температуры спекания медного порошка.

Рассмотрим распределение температурных полей в зоне формирования порошкового слоя при схеме спекания, когда два электрода находятся в контакте со всей спекаемой поверхностью материала — композиции медного порошка и 10, 20 и 50 об. % ПТФЭ, равномерно распределенного в металлической матрице (рис. 7).

Результаты моделирования показали, что наибольший нагрев электродов наблюдается при спекании композиции, содержащей 10 об. % ПТФЭ (рис. 7, а), слабее при спекании композита, содержащего 20 (рис. 7, б) и 50 об. % (рис. 7, в). Видно также, что медные частицы, не контактирующие с полимером, полностью прогреваются до температур 1073 К, т.е. до технологической температуры спекания. Поверхностная область верхнего электрода, который не контактирует с частицами ПТФЭ, также прогрет сильнее, чем нижний электрод, где наблюдается разрыв изотерм. При этом

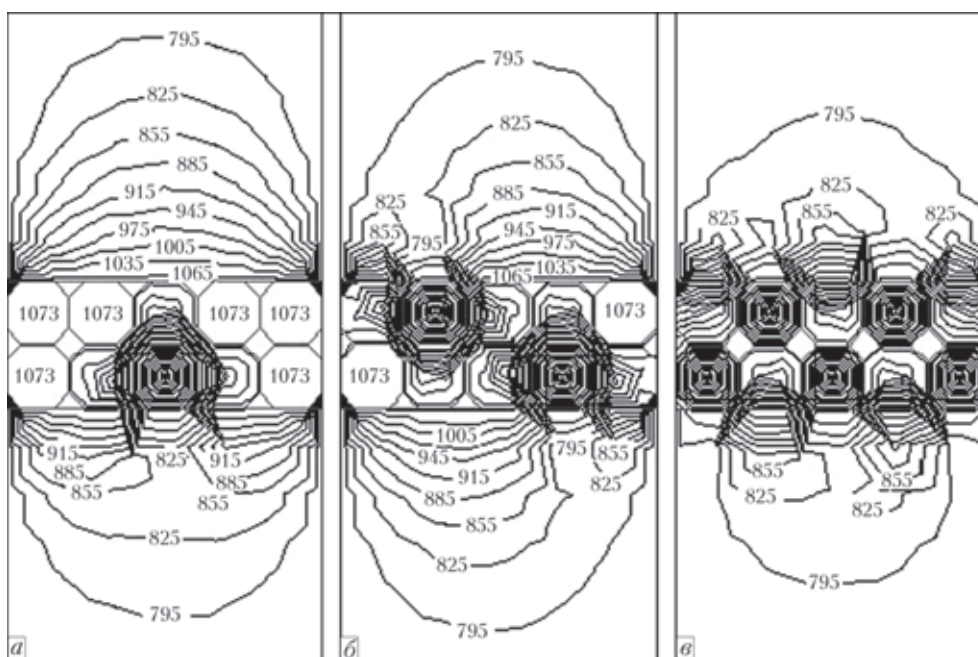


Рис. 7. Модели распределения температурных полей в мезофрагментах зон электроконтактного спекания металлополимерного порошкового слоя при различной степени наполнения медной матрицы частицами ПТФЭ: *а* — 10 об.%; *б* — 20; *в* — 50

уровень температурных полей в нижнем электроде в зоне контакта с полимерной частицей ПТФЭ меньше, чем в зоне контакта электрода с медными частицами на 10...15 %. Разрыв изотерм в электродах наблюдается и при наличии в зоне спекания 20 об. % полимерных частиц ПТФЭ (рис. 7, *б*). Медные частицы, контактирующие с полимерными частицами, также имеют меньшую температуру по сравнению с частицами, не контактирующими с частицами ПТФЭ. Как видно, при увеличении содержания полимерного наполнителя в металлической порошковой матрице снижается температурная нагруженность в центральной части зоны спекания металлополимерного материала с одновременным смещением участков температурного равновесия электродов к периферийным областям.

При нахождении в зоне спекания равного количества медных и полимерных частиц (рис. 7, *в*) наблюдается определенная температурная стабилизация в порошковом металлополимерном композиционном слое, значительное снижение прогрева обоих электродов, увеличение количества зон разрыва изотерм, но недостаточный нагрев медных частиц для качественного спекания металлической матрицы.

Механизмы тепловыделения и распространения тепла в объеме металлополимерной порошковой системы и особенно на границах дисперсный металл – дисперсный полимер оказывают существенное влияние на процессы структурообразования композиционных порошковых покрытий. Из-за кратковременности процесса электроконтактного спекания очень трудно оценить экспериментальными методами характер распростране-

ния тепловых потоков как в объеме порошковых металлополимерных систем, так и на границах раздела дисперсный металл – дисперсный полимер распределение температурных полей и температурных градиентов. Вместе с тем исследование и установление закономерностей процессов теплопередачи в таких порошковых системах является достаточно важным на стадии их разработки.

Для оценки свойств порошковых композиционных материалов данного класса, в частности, в зонах контактного взаимодействия полимер – металл, которые наиболее подвержены перепаду температур между токопроводящими медными частицами и токонепроводящими частицами полимера, были использованы подходы структурного моделирования с применением конечноэлементной дискретизации. На рис. 8 представлены модели распределения температурных полей в области исследования мезофрагмента зоны формирования металлополимерной порошковой системы при различном времени воздействия электрическим током в процессе электроконтактного спекания. Необходимо подчеркнуть, что особенностью данной задачи является учет времени нахождения композиционной порошковой системы в зоне спекания, т.е. решена задача нестационарной теплопередачи. В соответствии с полученными ранее данными принято, что время воздействия электрическим током на металлополимерную порошковую систему в зоне электроконтактного спекания составляет от 0,3 до 1,2 с. Сила тока, подводимая к источнику выделения тепла, составляет 12 кА.

Детальный анализ полученных результатов позволил установить следующее. Рассматривая случай нагрева, когда время спекания составляет

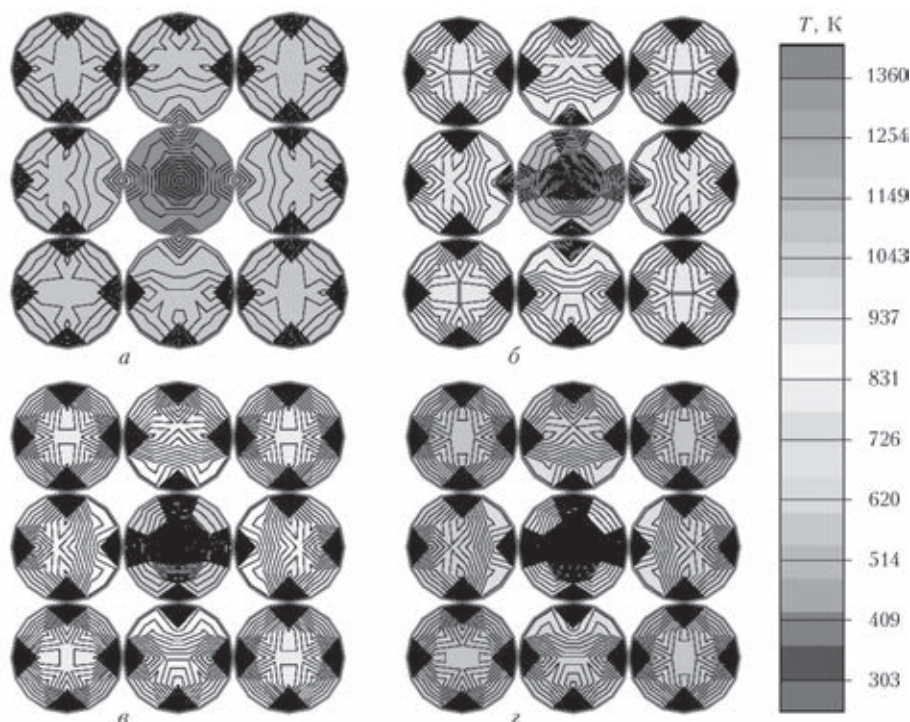


Рис. 8. Модели распределения температурных полей в зоне контактного взаимодействия медь — ПТФЭ при разном времени спекания: *а* — 0,3 с, *б* — 0,6, *в* — 0,9; *г* — 1,2

0,3 с, температура в контактных зонах между металлическими частицами металлополимерной порошковой системы достигает 623 К (рис. 8, *а*), а на остальной поверхности медных частиц в исследуемом мезофрагменте от 601 до 623 К.

По мере удаления от поверхности частиц меди к их центру происходит сглаживание изотерм. В областях контакта частиц меди наблюдается сгущение и локализация большого количества изолиний, что подтверждает наблюдаемое характерное снижение температуры в данной области до 530 К на расстоянии 25 мкм от поверхности медной частицы к её центру. В области контактного взаимодействия частица меди — частица ПТФЭ видно, что при удалении от поверхности контакта к центру полимерной частицы температура снижается с 440 до 390 К, в то время как температура в медной частице увеличивается от 440 до 495 К при рассмотрении зоны удаления от точки контакта на 25 мкм. При этом существенное воздействие на уровень теплового состояния периферийных участков дисперсных частиц оказывает наличие пор в рассматриваемом мезофрагменте.

При увеличении времени спекания до 0,6 с наблюдается повышение уровня омического нагрева металлополимерной порошковой системы. При этом температура в зонах контактного взаимодействия медь — медь составляет порядка 923 К (рис. 8, *б*), а на остальной поверхности медных частиц от 770 до 912 К. Изменение температурного состояния в медных частицах, не контактирующих с частицей ПТФЭ, происходит в направлении

от их поверхности к центру таким образом, что температура на расстоянии 25 мкм от её поверхности составляет около 695 К. В области контактного взаимодействия частица меди — частица полимера наблюдается снижение температуры с 584 до 495 К в направлении от контактной поверхности к центру полимерной частицы. В то же время в медной частице наблюдается противоположная картина, характеризующаяся повышением температуры от 589 до 695 К при рассмотрении зоны удаления от точки контакта на 25 мкм.

В случае нагрева металлополимерной порошковой системы в течение 0,9 с температура в зонах контактного взаимодействия металл — металл составляет 1223 К (рис. 8, *в*), а на поверхности медных частиц от 736 до 1111 К. При удалении от поверхности к центру медных частиц, не контактирующих с частицей полимера, температура снижается, достигая значения 934 К на радиальном расстоянии 25 мкм. В области контактного взаимодействия частица меди — частица полимера видно, что при удалении от контактной поверхности к центру полимерной частицы температура снижается до 553 К, в то время как в медной частице наоборот повышается до 896 К при рассмотрении зоны удаления от точки контакта на 25 мкм.

При достижении температуры омического нагрева порошковой системы до 1356 К, что обеспечивается временем спекания 1,2 с (рис. 8, *г*), медные частицы прогреваются практически равномерно по всей площади до температуры спекания, соответствующей 1073 К, а в точках кон-

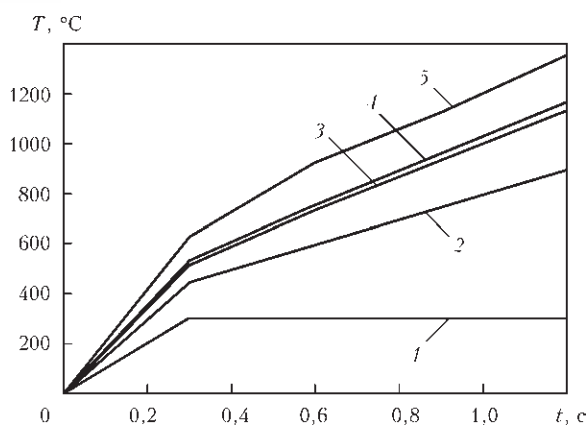


Рис. 9. Зависимости влияния времени электроконтактного спекания металлополимерной порошковой системы на изменение температуры в характерных точках композиции: 1 — центр частицы ПТФЭ; 2 — точка контакта медь — ПТФЭ; 3, 4 — центр медной частицы соответственно контактирующей с частицей ПТФЭ и не контактирующей; 5 — точка контакта медь — медь

тактного взаимодействия дисперсных частиц меди наблюдаются участки локального нагрева до температуры плавления. Также установлено, что превышение температуры термоокислительной деструкции полимера наблюдается в локальных областях их контактного взаимодействия с медными частицами на радиальном расстоянии, не превышающем 18...20 мкм от поверхности частицы ПТФЭ к их центру.

На основании полученных результатов модельно-теоретических исследований построены зависимости, характеризующие влияние времени электроконтактного спекания на изменение температуры в характерных точках мезофрагмента порошковой металлополимерной системы (рис. 9).

В заключение следует отметить, что предложенный модельно-теоретический подход позволяет разрабатывать компьютерные структурные модели зон контактного взаимодействия электродов — порошковый слой, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояния материалов при приложении внешних воздействий (плотность электрического тока и усилие сжатия электродов) в условиях нестационарной теплопередачи, отличающиеся от существующих возможностью учета влияния времени электроконтактного спекания, контактного взаимодействия поверхностей и особенности структуры частиц порошкового слоя (наличие оксидного слоя и порового пространства) на формирование температурных полей, деформации компонентов, распределение температуры, термо- и механические напряжения. На основе такого подхода и проведенного комплекса исследований оптимизировано с учетом экспериментальной корреляции время нахождения порошковой системы в зоне спека-

ния при электроконтактном воздействии для заданных технологических условий формирования порошковых металлополимерных наноструктурированных покрытий с толщиной насыпного слоя 300...500 мкм, составляющее 1,1...1,3 с, обеспечивающее достижение температуры спекания металлической медной матрицы 1073...1123 К, а при одновременном воздействии заданной нагрузкой — завершение процессов уплотнения насыпного порошкового слоя посредством пластической деформации и снижение эквивалентных напряжений по Мизесу в сформированном порошковом покрытии толщиной 90...100 мкм до уровня значений 112...156 МПа.

Впервые показано, что при формировании покрытий электроконтактным спеканием, когда температура достигает значений, обеспечивающих экстремальные условия теплового омического нагрева и теплопередачи в порошковой металлополимерной системе, температура в диаметральной сечении медных частиц снижается в 1,4...1,5 раза, в то время как температура в диаметральной сечении полимерных частиц снижается в 2,8...3,0 раза. Установленный эффект способствует «эстафетному» развитию процессов теплопередачи с возникновением локальных термонапряжений в зонах физического контакта металл — полимер и концентрированию тепловой энергии в поверхностном слое дисперсных полимерных частиц и благодаря низким по сравнению с частицами металлической матрицы значениям теплопроводности частиц полимерного наполнителя, а также высокой (800...900 °C/с) скорости нагрева порошковой композиционной системы и кратковременности процесса спекания (порядка 1,1...1,3 с) происходит перенаправление распространения тепловых потоков, что в совокупности снижает термонапряженность на границе раздела дисперсный полимер — дисперсный металл, вследствие чего процессы термоокислительной деструкции практически не развиваются по направлению к центру частиц полимеров.

1. Пасовец В. Н., Ковтун В. А., Плескачевский Ю. М. Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода. — Гомель: БелГУТ, 2011. — 200 с.
2. Yu. M. Pleskachevsky, V. A. Kovtun, Yu. E. Kirpichenko. Tribological coatings formed by electrocontact sintering of powder systems // Wear. — 1997. — **203–204**. — P. 679–684.
3. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. — М.: Металлургия, 1987. — 128 с.
4. V. A. Kovtun, T. V. Semenova, M. Mihovski. Research of influence of thermal state of metal-polymer powder coatings during electrocontact sintering on their tribological behavior and structure // J. Mater. Sci. and Technol. — 2006. — **14**, № 3. — P. 159–172.



NON-INVASIVE STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF STORAGE TANK FLOORS

V. DIMLAYE¹, P. MUDGE¹, P. JACKSON²,
TAT-HEAN GAN¹ and SLIM SOUA¹

¹ NDT and Asset Reliability Technology Group, TWI Ltd., Cambridge, CB21 6AL, Great Britain

² Plant Integrity Ltd., Cambridge, CB21 6GP, Great Britain. E-mail: tat-hean.gan@twi.co.uk

Large above ground storage tanks filled with hydrocarbon and hazardous liquids such as oil, oil-derived products, chemicals and process plant liquids are in widespread use in the UK, Europe and throughout the world. Tank farms are normally located in coastal areas close to large centres of population. Leakage from corroded storage tanks, especially from their floors, is a major environmental and economic hazard and poses a significant threat to those living in the vicinity of tank farms, as well as to the rest of the UK and Europe. The current, and growing, risk of tank failure together with the potential risk for fire and explosion at nearby petrochemical plants is wholly unacceptable. This paper illustrates the work carried out in the UK Technology Strategy Board (TSB) Tank Integrity Monitoring (TIM) project, for the structural health monitoring of large above ground bulk liquid storage tank floors without the need to access the inside of the tank or to empty its contents, using ultrasonic guided waves (UGW) as a non-destructive testing technique. A structural health monitoring system for acquiring ultrasonic guided wave data over long periods of time was developed. The performance of the permanent attached transducers and the structural health monitoring system was also investigated to demonstrate their reliability. The propagation of the guided wave signals has been validated experimentally on a 4 m diameter tank floor, and tomography imaging has been developed for detection and location of defects. 3 Ref., 6 Figures.

Key words: guided wave, ultrasonic, tank floor, tomography, storage tanks, structural health monitoring system

1. Introduction

Various NDT methods such as penetrant testing, magnetic particle, radiographic testing, eddy current, thermography and acoustic emission were used to inspect storage tank floors [1,2]. Current inspection methods require the tank to be drained in order to create a safe environment, suitable for personnel entry, in order to carry out inspections which can be time consuming and expensive. As such, there is a need to develop a faster, lower cost and safer method to assess the structural integrity of tank floors. The objective of this study was to develop a structural health monitoring method for the tank floors using low frequency UGW. The low frequency UGW have the ability to propagate long distances in planar and tubular structures and is already used for the inspection of pipes [3].

2. Experimental Set-Up

2.1. Tank Monitoring System

A 4 m diameter tank floor was used to carry out the structural health monitoring experiments for damage locality and detection. The wall thickness of the tank floor was 7 mm with a seam weld running along the diameter of the tank floor. The tank is shown in Figure 1.

A multitude of transducers were permanently attached around the perimeter of the tank floor. The commercially available 24 channel Teletest system and an additional 80 channel multiplexer were used to collect a broadband frequency range of data. The botany of the tank floor structural health monitoring system is illustrated in Figure 2.



Figure 1. Tank floor of 4 m diameter

2.2. Ultrasonic Guided Waves

The ultrasonic guided waves propagating within the plate structure contain various wave modes; depending on the frequency of excitation, the fundamental wave modes generated are the symmetric S0 and asymmetric A0 wave modes. In this study, the characteristics of the S0 wave mode are used. The presence of the S0 and A0 in the acquired time domain signals is illustrated in Figure 3.. Time domain signals acquired.

3. Result

3.1. Reliability

The structural health monitoring system was used to collect data continuously over three months. One very important factor for a robust structural health monitoring system is the reliability of the transducers

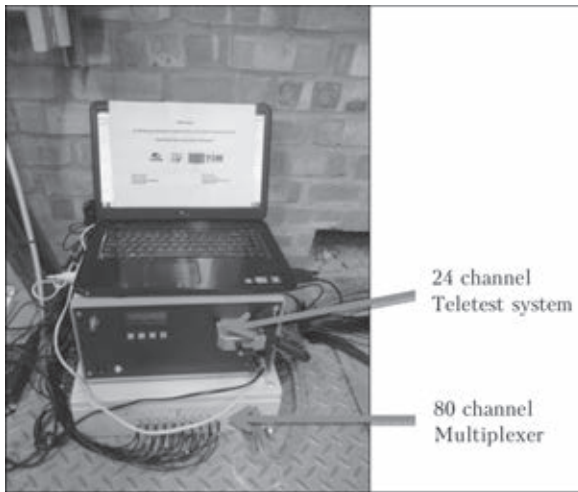


Figure 2. Tank floor structural health monitoring system and electronics. The stability of the aforementioned transducers, which were studied over the three month time period, are illustrated in Figure 4. Tomography representation for the stability of transducers Figure 4, the results of which can be displayed using tomograms that were intermittently generated. It can be seen that the distribution of the energy over the circu-

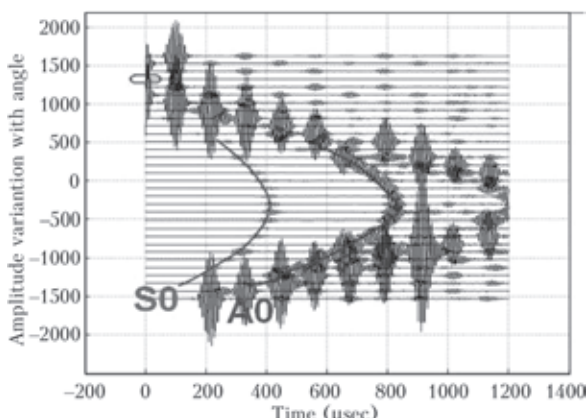


Figure 3. Time domain signals acquired

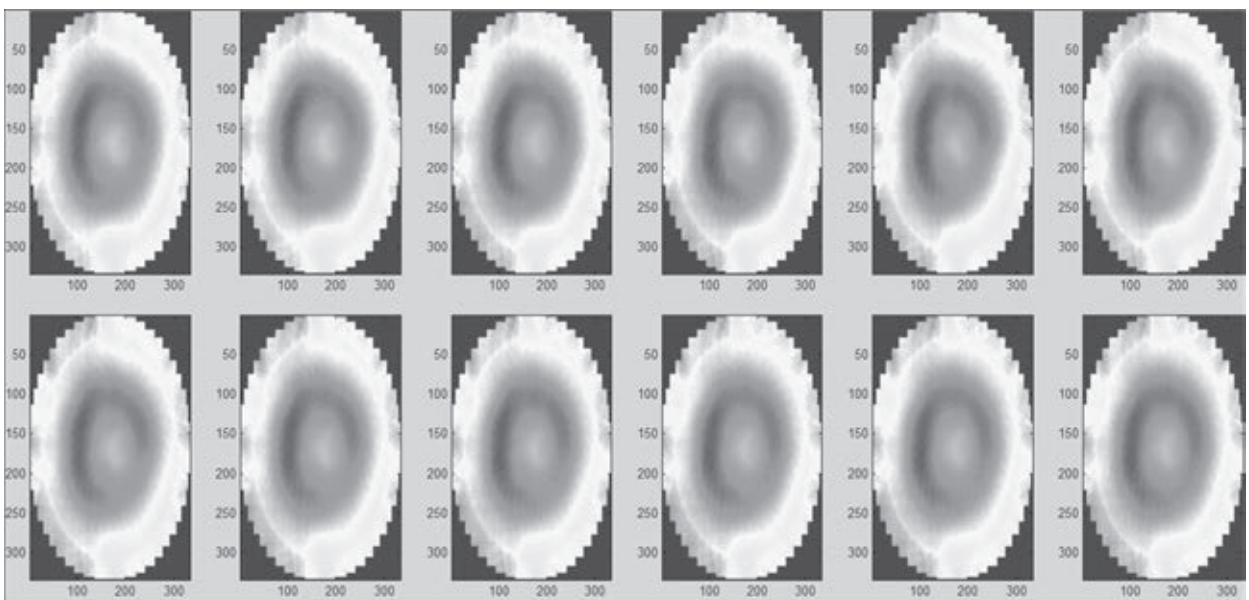


Figure 4. Tomography representation for the stability of transducers

lar structure is fairly constant over a prolonged period of time suggesting no failure or degradation in the performance of the transducers and electronics.

4. Defect Detection and Location

The capability of defect detection in terms of size and location was studied. A large set of baseline data were acquired which covers wide environmental condition changes.

A single defect of diameter 70 mm and through thickness were introduced initially, then a second and third defect of 70 mm and 20 mm, respectively, were then added to the tank floor. A set of data was then collected after each defect addition. The positions of the defects are shown in Figure 5. Defect size and location: 70 mm defect (left) and 70 mm, 70 mm, 20 mm defect (right) Figure 5.

The tomograms were generated using characteristics of the S0 wave mode acquired at the opposite receiving transducers. The detection and location of the added defects have been made possible by the tomography technique used. The tomograms are shown in Figure 6. Tomograms for 70 mm defect (left) and for 70 mm, 70 mm, 20 mm defects (right) Figure 6.

5. Conclusion

The use of ultrasonic guided waves for the structural health monitoring of storage tanks has been investigated on a 4m diameter tank floor. For the purpose of

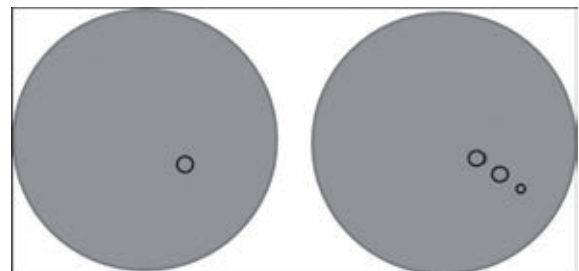


Figure 5. Defect size and location: 70 mm defect (left) and 70 mm, 70 mm, 20 mm defect (right)

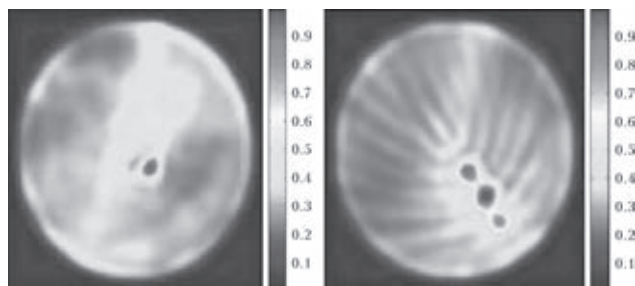


Figure 6. Tomograms for 70 mm defect (left) and for 70 mm, 70 mm, 20 mm defects (right)

structural health monitoring, it is of paramount importance to have a reliable system in terms of transducer performance and a stable pulser-receiver system.

The experiments carried out, based on the data acquired, demonstrate the stable performance of the permanently attached transducer and of the pulser-receiver used. The S0 wave mode from the receiving transducers has been used to generate the tomograms.

The tomography technique has been successful-

ly implemented alongside the developed structural health monitoring system for the detection and location of defects of 20 mm to 70 mm in size.

6. Acknowledgements

The work was sponsored by the Technology Strategy Board (TSB) under the Tank Integrity Monitoring (TIM; www.timproject.co.uk) project. The project was managed by TWI Ltd (UK). The author would like to express thanks for the support from the TIM project partners namely Shell, Vopak and NuStar Energy.

1. Cawley, P., Lowe, M.J.S. et al. (2003) Practical long range guided wave testing application to pipe and rail. *Material Evaluation.*, 61(1), 66–74.
2. Pei, J., Yousuf, M.I., Degertekin, F.L. et al. (1996) Lamb wave tomography and its application in pipe erosion/corrosion monitoring. *Research in Nondestructive Evaluation.* 8(4), 189–197
3. Sicard, R., Goyette, J., Zellouf, D. (2002) A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures. *Ultrasonics*, Vol. 39, 487–494.

Received 06.06.2013



NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF REMELTING PROCESSES

A. JARDY

Institut Jean Lamour (UMR CNRS – Université de Lorraine 7198) Parc de Saurupt, CS 50840, F-54011 Nancy Cedex, France Laboratoire d'Excellence DAMAS, France. E-mail: alain.jardy@univ-lorraine.fr

The numerical simulation of remelting processes enables us to link the local solidification conditions to the operating parameters. Here, we discuss some recent studies aiming to develop specific aspects, e.g. the alternating current distribution during ESR of steels and superalloys, the ensemble arc motion in a VAR furnace and the influence of electromagnetic stirring on the macrosegregation in remelted ingots. 27 Ref., 1 Tabl., 5 Figures.

Key words: vacuum arc remelting, numerical simulation, electromagnetic stirring, current distribution, macrosegregation

I. Introduction

Consumable electrode remelting processes have been developed to produce high-performance alloys dedicated to critical applications, for which high metallurgical quality ingots are necessary. Consequently, primary melting is not sufficient and remelting provides valuable advantages such as a fine grain structure, limited occurrence of solidification defects, low level of micro- and macrosegregation and good soundness of ingots.

The principle of the VAR (Vacuum Arc Remelting) process, as illustrated in figure 1-a, consists in melting a consumable metallic electrode of the required grade under a high vacuum, in order to obtain a sound ingot of good structural quality [1]. During remelting, an electric arc is maintained between the tip of the electrode (which acts as the cathode) and the top of the secondary ingot, in order to ensure melting of the electrode. Liquid metal falls through the arc plasma and progressively builds up the ingot, which solidifies in contact with a water-cooled

copper crucible. In order to stabilize the arc, it can be confined with the aid of an axial magnetic field created by an external induction coil. The interaction with the melting current stirs the liquid metal, the rotation induced being in the orthoradial direction. By reversing periodically the coil current, stirring can be alternated.

In the case of Electro Slag Remelting (ESR), an alternating current is passed from the electrode to the water-cooled baseplate through a high-resistive calcium fluoride-based slag, thus generating Joule heating [2]. The energy is both transferred to the electrode for the melting and to the secondary ingot. Molten metal is produced in the form of droplets which fall and build up the secondary ingot, as shown in figure 1-b. Insulation from air and chemical refining, due to the presence of slag, improve the inclusion quality.

Remelted materials are special steels and nickel-based superalloys. Vacuum Arc Remelting also represents the final stage in the melting cycle of reactive metals, such as zirconium and titanium. The stra-

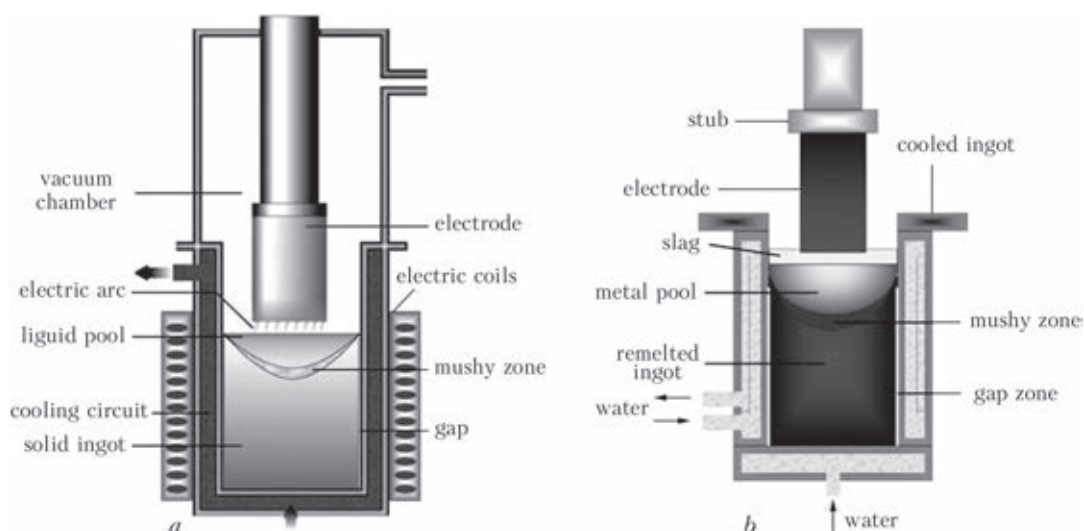


Figure 1. Schematic representation of (a) the VAR process, (b) the ESR process



tegic importance of these products and their very high added value make it essential to acquire a detailed understanding of the melting processes. Mathematical modelling is a valuable tool to enhance fundamental understanding, since it allows us to link operating parameters, such as the melting rate, ingot diameter or cooling conditions, to local solidification conditions, and thus to the ingot final quality. The work presented here is part of a program initiated some twenty years ago in Institut Jean Lamour to develop numerical software for simulating the remelting operations, and subsequently to help optimizing the processes. The first version of the numerical model SOLAR (which stands for SOLidification during Arc Remelting) was applied to the simulation of VAR for reactive metals [3]. Since then, the model has been constantly improved. In the beginning of the century, it was adapted for nickel-base superalloys and special steels.[4,5] More recently, a similar model has been developed for the ESR process [6]. The development started in 2004 with a basic hydrodynamic model of the slag, whose complexity was increased step by step. The last model has several common bases with the SOLAR code, since ESR and VAR are quite similar in terms of ingot growth and solidification.

A general description of both models (i.e. SOLAR and SOLECS, which stands for SOLar-type ESR Complete Simulation) and their validation was part of a communication at the International Conference on Welding and Related Technologies into the Third Millenium, which was held in Kiev in 2008 [7]. Here, we will focus our attention on 3 recent studies aiming to develop some specific aspects of the behavior of actual remelting processes.

II. Current distribution during electrosag remelting

During the last years, several researches have been presented, aiming to simulate the whole process in a transient way, or discuss in more detail the electromagnetic fields in ESR [8–13]. Among these models, the simulation software SOLECS was developed at IJL, as stated in the Introduction. During the growth of the ESR ingot, the slag is in contact with the water-cooled mould, which is responsible for the formation of a layer of solidified slag at the interface. As the secondary ingot rises, this layer is partially remelted and crushed between the metal and crucible, resulting in a slag skin which acts as a thermal insulator and provides ESR ingots with a smooth lateral surface [2].

In the paper by Weber et al. [6], it was written that *“we assume that the solidified slag skin insulates electrically the slag and ingot from the mold. This assumption is particularly questionable and needs to be confirmed. Indeed, in some cases, the model predicts a discontinuous solid skin surrounding the slag*

cap, implying a possible electrical contact between liquid slag and mold”. While this strong assumption is made classically in the literature devoted to ESR simulation [14,15], it was sometimes claimed [16,17] that a certain amount of current is able to flow into the Cu crucible. This phenomenon could modify the thermohydrodynamic behaviour of the slag and liquid pool, hence influencing the solidification process. Therefore, the goal of our study is to quantify this phenomenon, and determine the impact of the solid layer thickness and electric conductivity of the solidified slag on the current distribution during electrosag remelting.

To reach the water cooled crucible and baseplate, the melting current supplied to the electrode and liquid slag can either flow in the ingot pool or directly through the solidified slag skin. The resulting current distribution depends on the electrical resistance of that phase, hence the solid slag conductivity and skin thickness. In this section, we present the computation of electromagnetic phenomena with a simplified geometry. The thickness of the solidified slag skin is assumed to be uniform and the assigned electrical conductivities are estimated values. The main input data are gathered in Table I.

The effects of the variations of two parameters (electrical conductivity and thickness of the solid slag layer, written with italic characters in Table I) on the current distribution and resulting Joule heating were studied. The electrical conductivity was allowed to vary in the range $10^{-3} — 400 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ($10^{-3} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ corresponds to a full insulation while $400 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ is the conductivity of the liquid slag). The thickness of the solidified slag skin was set to 4 or 6 mm. In the literature, the computed current distribution is most often represented by visualizing the magnitude of the current density phasor (i.e. the maximum value for each component of the current density), which classically leads to the observation of an important skin effect in the electrode and ingot [6,11,14,18]. Indeed, it is well known that the current distribution is related

Table I. Parameters used in the simulations

Melting current (maximum value)	10 kA
AC frequency	50 Hz
Electrode radius	26 cm
Mould external radius	30 cm
Mould thickness	2.5 cm
Electrode immersion depth	1 cm
Electrical conductivity of the metal	$106 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
Electrical conductivity of the liquid slag	$400 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
<i>Electrical conductivity of the solid slag</i>	$10^{-3} — 400 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
<i>Thickness of the solidified slag skin</i>	4/6 mm



to the value of the skin depth into the different materials: if the latter is larger than the actual dimension of the domain, the current distribution is homogeneous, e.g. into the liquid slag. However, within this study, we chose to represent the instantaneous current distribution at a precise moment in the alternating period $t = 0$. In addition to the visualization of the skin effect, such a representation also highlights the local variation in the phase angle caused by the variation in the induced magnetic field into the metallic conductors, as it was shown by Li et al. [13].

The first step of the study consists in confirming that part of the melting current is likely to flow through the solidified slag layer and directly enter the mould. Figure 2 presents the computed results obtained either when the solid layer behaves as a perfect insulator (such behaviour is reached as soon as the electrical conductivity is lower or equal to $10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) or when the electrical conductivity is set to $15 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. The solidified slag skin is supposed to be 4 mm thick. Clearly, when the electrical conductivity of the solid slag is set to $15 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, part of the current actually flows through the skin to reach the mould. The solidified slag layer does not act as a perfect electrical insulator and this modifies the current distribution in the system. Our result confirms some previous claims in the literature [16,17] and raises new questions regarding the consequences of such a loss of current on the process efficiency.

Figure 3 summarizes the effects of a variation in the electrical conductivity of the solid slag and in the thickness of the solidified slag layer: it represents the evolution of the total Joule heat generated according to both parameters. The electrical conductivity of the solid slag appears to be a crucial parameter of the process. This observation emphasizes the necessity to have access to actual measurements. The thickness of the solidified slag layer also influences the current distribution in the system. However, in the range of

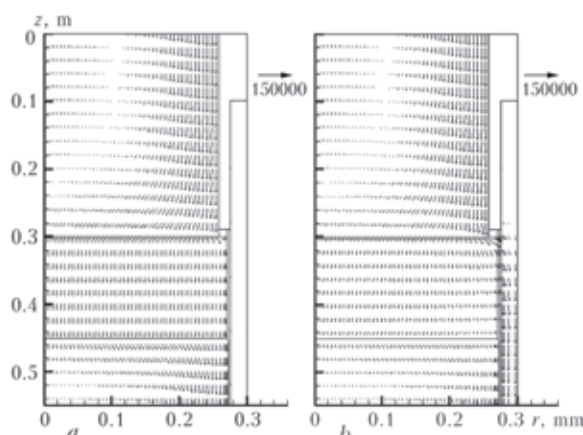


Figure 2. Current density distribution ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$) computed with two values for the electrical conductivity of the solidified slag skin: $10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (a) and $15 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (b)

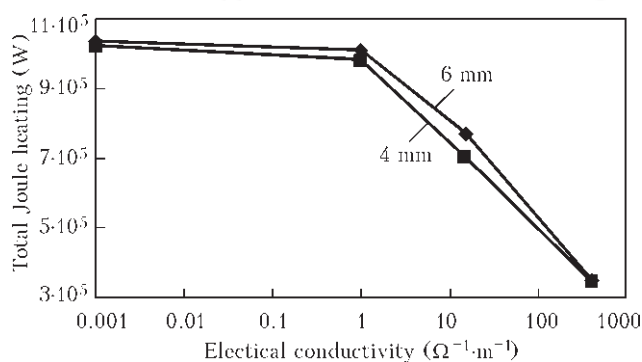


Figure 3. Evolution of the total resistive heating in the slag, according to the electrical conductivity and the thickness of the solidified slag skin

tested values, the impact of this factor remains of secondary importance.

In its present state, this model considered a uniform layer thickness along the slag/crucible interface. However, this parameter is liable to vary from a negligible value to few millimetres during a real remelting. To take into account this variation, as well as to assess the influence of the electrical current distribution on the ingot solidification, the next step of our study will consist in a full coupling of the model with a numerical simulation of the whole ESR process. Results obtained will be compared to actual experimental observation.

III. Ensemble arc motion during vacuum arc remelting

Knowledge of the electric arc behaviour in the VAR process is based on visualization studies performed first at Sandia National Laboratories [19] during the remelting of steel or Ni-based superalloy electrodes. Similar experiments have then been carried out by Chapelle et al. on Zr electrodes [20]. A conclusion from these observations is that the behaviour of the arc is similar to the diffuse mode of a vacuum arc created between cold solid electrodes. The arc consists of several dispersed clusters of cathode spots moving over the whole surface of the cathode. Such behaviour seems to imply that the total energy transferred from the arc to the cathode tip is distributed uniformly; in particular, no azimuthal direction is privileged, so an axisymmetric behaviour is expected at the macroscopic scale, consistent with the flatness of the cathode tip during full-scale melting.

However, it has been recently reported that the arc often does not behave axisymmetrically at the macroscopic scale. Based on measurements of the luminosity and magnetic field created by the arc [21, 22], Ward et al. suggested that most of the time, the electrical centre of the arc was rotating in a time-averaged sense around the ingot centreline with a constant speed (period equals typically 20 to 40 s when a superalloy electrode melts under nominally diffuse conditions). Then it was assumed that the distribution of current flow and heat input followed the distribution



of this location and a part of the arc was assimilated to a loosely focused rotating spot, radially located away from the ingot centreline. A 3D model of the ingot pool, using this representation as a boundary condition, [23] enabled the authors to conclude that the hydrodynamic behaviour of the melt pool and ingot solidification process can be greatly influenced by such an ensemble arc macroscopic motion.

In order to confirm the previous statements, the dynamic behaviour of the arc in an industrial VAR furnace has been investigated. Two synchronized video cameras positioned in front of diametrically opposite viewing glasses on top of the furnace chamber were used to film the annulus gap between the electrode and crucible wall. Video images were recorded during the melt of a Zy2 ingot with various stirring conditions.

To help interpreting the recorded films, an image processing procedure similar to that proposed by Ward et al. [21] was developed. First, each film was split into a series of images. Then a 2 s moving average was applied to suppress high frequency fluctuations related to individual cathode spot behaviour and the sampling frequency was reduced to 5 frames/s. A given region of interest was extracted from each image and all the results were put side by side to build a temporal sequence (figure 4-a). Finally, the luminosity in the extracted region was quantified and a Fourier analysis was performed to determine the frequencies of fluctuations along the sequence.

An example of two sequences corresponding to diametrically opposite regions is illustrated in figure 4-b. A plot of the evolution of the luminosity for both sequences is also shown on the figure. The luminosity fluctuates quite regularly, with an alternation between very bright time periods and other time periods during which it is notably reduced. The fluctuations of luminosity in the two diametrically opposed regions

are essentially in phase opposition. A frequency analysis indicates that these fluctuations involve several periods, with a dominating period of the order of 30 s, identical for the two cameras.

These fluctuations may be related to the arc behaviour. Indeed, it can reasonably be considered that the luminosity fluctuates as a consequence of the evolution of the spatial distribution of the arc, whose centre of gravity moves across the electrode surface with a period of about 30 s. This phenomenon was observed for all the melt conditions tested. The dominant period of the fluctuations was of the same order of magnitude for all melt conditions (including the conditions without any stirring). It seems in particular to be unconnected to the reversal period of the magnetic field. Thus, an ensemble motion of the arc seems to exist for all operating conditions and it appears to be relatively independent of the presence of an external axial magnetic field.

This work enables us to confirm the conclusions reached by Ward et al. [22] who reported a value of the time constant of the arc motion very similar to the one determined here. As discussed previously, the existence of a slow motion of the arc centre (with a time period of around 30 s) could have important implications for the modelling of the VAR process.

IV. Electromagnetic stirring and macrosegregation in var zirconium ingots

Despite the use of electromagnetic stirring, chemical heterogeneities develop in the mushy zone during the solidification stage. One of the main challenges for Zr and Ti producers is to master the VAR process in order to control the macrosegregation in remelted ingots. Macrosegregation results from the association of microsegregation and transport phenomena. The latter are primarily due to the flow in the liquid and mushy parts. It is now well established [24,25] that the hydrodynamics of the melt pool depends on

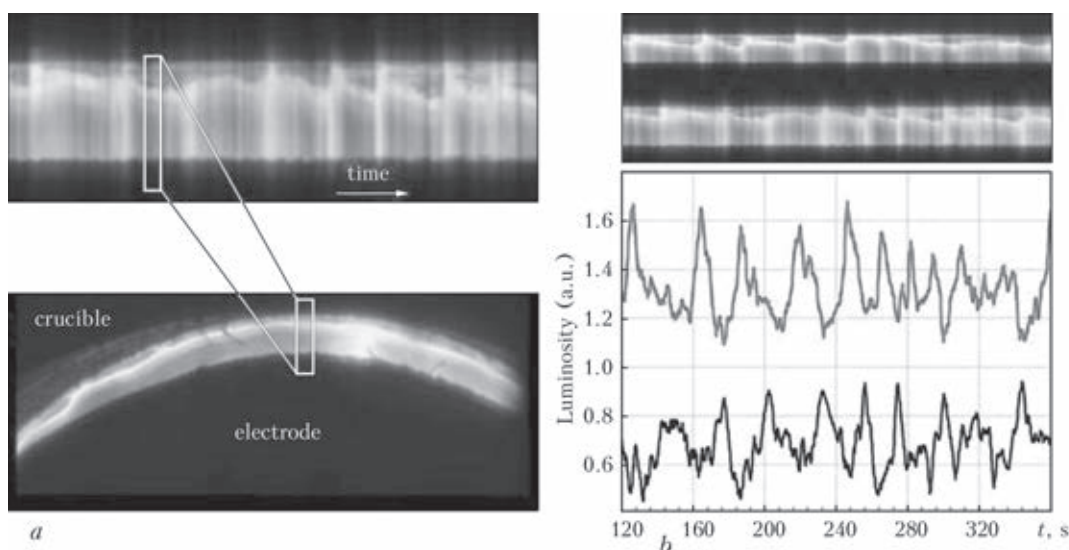


Figure 4-a. Temporal sequence used to study the fluctuations of luminosity above the ingot

Figure 4-b. Typical temporal sequences obtained for two diametrically opposite regions



the combined action of the followings: thermal and solutal buoyancy, self-induced electromagnetic force and the periodic centrifugal force caused by the angular movement generated by the stirring. The aim of this section is to investigate numerically the action of these forces on the macrosegregation of Zircaloy 4 VAR ingots.

In order to improve the description of the solidification and related macrosegregation, a multiscale model has been recently incorporated into SOLAR to simulate the solidification of multicomponent alloy VAR ingots. It is based on a volume-averaged Euler-Euler two phases formulation [26, 27]. At the macroscopic level, the permeability of the mushy zone is given by the Carman-Kozeny law, depending on a microstructure dimension typically of the order of the secondary dendrite arm spacing (SDAS). A macroscopic k - ϵ model that takes into account the actions of both the thermosolutal buoyancy and the influence of the solid phase in the mushy zone is used to simulate the turbulent nature of the flow. The phase change is treated locally at the microscopic level, either by assuming the lever rule or accounting for grain growth controlled by finite diffusion of alloy elements in both liquid and solid phases.

A Zy4 electrode was remelted in a production furnace. Two stirring sequences were successively applied: a strong alternated stirring followed by a weak continuous one. In addition, a continuous and strong stirring was temporarily used in order to mark several melt pools in the ingot. The recording of the actual operating process parameters provided input data for the model.

Thermosolutal buoyancy effects are simulated thanks to the Boussinesq approximation. Thermal and solutal expansion coefficients for Zr alloys are not available in the literature. Nevertheless, the thermal expansion coefficient β_T was estimated from data on pure liquid Zr. To investigate the influence of solutal convection caused by Sn concentration gradients (Sn is the major alloying element in Zy4), we have simulated 4 cases:

- (a) $\beta_T = 0$, $\beta_S^{Sn} = 0$;
- (b) $\beta_T > 0$, $\beta_S^{Sn} = 0$;
- (c) $\beta_T > 0$, $\beta_S^{Sn} < 0$ and (d) $\beta_T > 0$, $\beta_S^{Sn} > 0$.

The positive value of the solutal expansion coefficient β_S^{Sn} (case d), was calculated from the volume additivity assumption. The other value (case c) was intentionally negative. Case a corresponds to the absence of all thermosolutal buoyancy, which means that the flow is only caused by the electromagnetic stirring.

For the four cases, the final maps of Fe segregation computed by the model are shown in figure 5. Because of the application of two successive stirring sequences, two main segregation patterns can be observed along the ingot height. In addition, we can

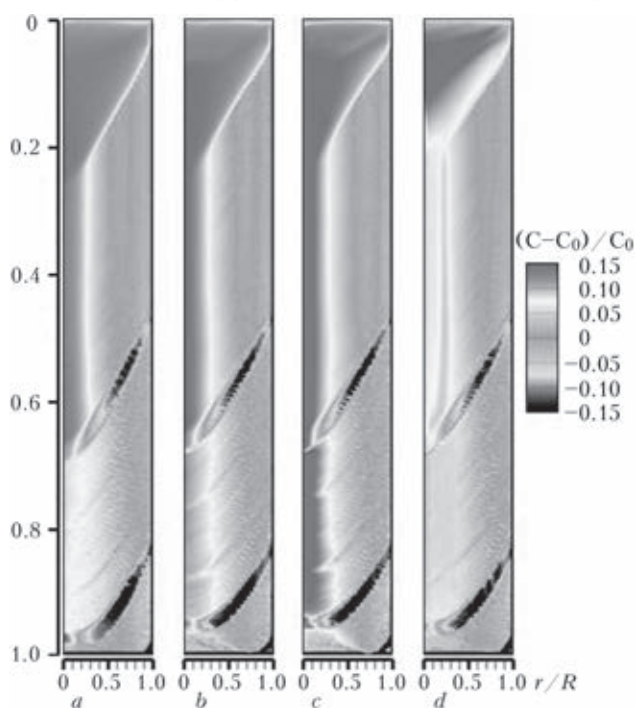


Figure 5. Maps of Fe segregation in the Zircaloy-4 VAR ingot for the 4 cases studied

see two inclined depleted bands caused by the pool markings. The enriched zone at the top of the ingot was caused by the solidification of the last melt pool. The average concentration of Fe in the liquid pool increases as the ingot grows because its partition coefficient is less than unity.

When thermosolutal buoyancy is not accounted for (case a), the model predicts an iron enrichment in the ingot central zone whatever the stirring employed. Actually, the centrifugal force due to the angular flow is predominant and generates a clockwise flow cell. Consequently, iron-enriched liquid accumulates at the bottom of the melt pool and in the mushy zone, causing a positive segregation near the axis. Alternated stirring causes a weaker radial macrosegregation than unidirectional stirring. For both stirring practices, accounting for thermal convection (case b) increases slightly the radial macrosegregation of the ingot central part, as thermal buoyancy strengthens the centrifugal force. In the mushy zone, the consequence is a more intensive circulation resulting into more transport of enriched liquid towards the centerline.

The effect of solutal convection on the centerline macrosegregation is visible on figures 5-c and 5-d. In case (c), radial segregation close to the centerline is notably amplified because all the volumetric forces cooperate. On the opposite, in case (d), the solutal buoyancy is counteracting and reverses the flow in the mushy zone at the bottom of the pool. The counterclockwise upward flow in the mushy zone reduces the segregation in the central region. When stirring is alternated (bottom half of the ingot), iron concentration is roughly uniform while a continuous stirring



(ingot top half) results in a positive segregation band located at $r/R \sim 0.25$ (R is the total radius of the ingot). This band forms due to the small counterclockwise flow loop induced by the solutal convection, which carries iron-rich liquid from the center to the outward radial direction.

The Fe segregation profiles predicted by the model clearly show that thermosolutal convection affects the macrosegregation only in the central region. In the upper part, chemical analyses show the Fe content rises continuously in the inner half of the ingot. Comparison with the model predictions reveals that such a behaviour is characteristic of case (d) where thermosolutal buoyancy is considered and $\beta_S^{Sn} > 0$. This shows that the upward flow driven by solutal buoyancy effects is partially responsible of the macrosegregation in Zy4 VAR ingots. In the outer part, where the centrifugal force is predominant, model and experimental results are in good agreement.

1. Choudhury, A. (1990) *Vacuum Metallurgy*. A.S.M. Int.
2. Hoyle, G. (1983) *Electroslag Processes — Principles and Practice*. Applied Science Publishers Ltd.
3. Jardy, A., Hans, S., Ablitzer, D. (1995) In: *Proc. MCWASP-VII*, TMS, 1995, 205.
4. Quatravaux, T. et al. (2004) *J. of Materials Sci.*, 39(39), 7183.
5. Jardy, A., Hans, S. (2006) In: *Proc. MCWASP-XI*, TMS, 2006, 953.
6. Weber, W. et al. (2009) *Metall. Transact. B*, 40B, 271.
7. Jardy, A., Ablitzer, D. (2008) *The Paton Welding J.*, 11, 153.
8. Kelkar, K.M., Patankar, S.V., Mitchell, A. (2005) In: *Proc. LMPC*, 2005, ASM Int., 137.
9. Kharicha, A. et al. (2009) In: *Proc. LMPC*, 2009, TMS, 235.
10. Patel, A.D. (2011) In: *Proc. LMPC*, 2011, SF2M, 49.
11. Krane, M.J.M. et al. (2011) In: *Proc. LMPC*, 2011, SF2M, 65.
12. Kharicha, A. et al. (2012) *CFD Modeling and Simulation of Materials Processing*, Wiley/TMS, 139.
13. Li, B., Wang, F., Tsukihashi, F. (2012) *ISIJ Int.*, 52, 1289.
14. Jardy, A., Ablitzer, D., Wadier, J.F. (1991) *Metall. Transact. B*, 22B, 111.
15. Hernandez-Morales, B., Mitchell, A. (1999) *Ironmaking and Steelmaking*, 26, 423.
16. Mitchell, A. (2005) *Materials Sci. and Engineering A*, 413/414, 10.
17. Kharicha, A. et al. (2007) In: *Proc. LMPC*, 2007, SF2M, 113.
18. Dilawari, A.H., Szekely, J. (1977) *Metall. Transact. B*, 8B, 227.
19. Zanner, F.J. (1979) *Ibid*, 10B, 133.
20. Chapelle, P. et al. (2000) *High Temperature Materials Processing*, 4, 493.
21. Ward, R.M., Jacobs, M.H. (2004) *J. of Materials Sci.*, 39, 7135.
22. Ward, R.M., Daniel, B., Siddall, R.J. (2005) In: *Proc. LMPC*, 2005, ASM Int., 49.
23. Yuan, L. et al. (2009) *Int. J. of Modern Physics B*, 23B, 1584.
24. Jardy, A., Ablitzer, D. (2006) *Rare Met. Mat. Eng.*, 35, 119.
25. Venkatesh, V. et al. (2009) *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, 61, 45.
26. Wang, C.Y., Beckermann, C. (1996) *Metall. Transact. A*, 27A, 2754.
27. Zaloznik, M., Combeau, H. (2010) *Comput. Mater. Sci.*, 48, 1.

Received 09.04.2013



RESEARCH IN JOINING TECHNOLOGIES IN AUSTRIA

N. ENZINGER ^a, C. SOMMITSCH ^b

Institute for Materials Science and Welding, Graz University of Technology, Kopernikusgasse 24, 8010 Graz, Austria

^a Norbert.Enzinger@TUGraz.at, ^b Christof.Sommitsch@TUGraz.at

Within the Austrian network of excellence COMET K-project JOIN4+ companies and research institutes cooperate in funded research projects. JOIN4+ exhibits a total budget of 6.6 Mio. Euros, which is covered by all research partners, the Austrian government as well as the involved provinces. Currently eight different projects in two areas are treated. In this contribution the funding situation as well as selected results are presented. 11 Ref., 7 Figures.

Key words: research funding, welding, friction welding, FSSW, modelling, AHSS

1. Introduction

Innovative and competitive products require sound basic research with according budgets. As one positive example the Austrian Network of Excellence for Joining Technologies JOIN4+ is presented in this contribution. International partners from industry and academia in the field of welding technology cover relevant tasks enabling the company partners to introduce innovative products on the global market.

2. Funding concept

The Austrian Research Promotion Agency (FFG) offers different concepts for co-financing of application-oriented research. The current COMET-program (Competence Centres for Excellent Technologies) contains three different routes (K2, K1 and K-projects) which covers different aims, budgets and contract periods. [1].

K-projects are focused on the application, which is very attractive for companies. Nevertheless compared to K1 and K2, K-projects show the smallest overall budget.

2.1. Basic guidelines

Within K-projects company partner have to finance 50% of the project volume by means of in-kind or cash contribution.

5% of the overall budget has to be covered by the research partners by means of in-kind contributions. Two third of the residual is funded by the as fore mentioned FFG and one third is covered by the involved provinces of Austria. The maximum possible funding is limited for each K-project.

2.2. Projects and partners

Within the K-project JOIN4+ 15 company partners are actively involved in eight different projects. Two partners are from Germany, one is from Switzerland, the remaining are from Austria:

Company partners:

- ✧ Air Liquid Austria GmbH
- ✧ Audi AG
- ✧ Berndorf Band GmbH

- ✧ Bombardier Transportation Austria GmbH
- ✧ Benteler SGL Composite Technology GmbH
- ✧ Fronius International GmbH
- ✧ InfraTec GmbH
- ✧ Jansen AG
- ✧ MCE – Maschinen und Apparatebau GmbH & Co
- ✧ pewag austria GmbH
- ✧ PLASMO Industrietechnik GmbH
- ✧ Wilhelm Schmidt KG
- ✧ voestalpine Draht GmbH
- ✧ voestalpine Stahl GmbH
- ✧ Welser Profile AG

Five scientific partners from Austria and one from Germany are completing the project team:

Research partners:

- ✧ Johannes Kepler University Linz, Institute for Communications Engineering and RF-Systems
- ✧ Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials
- ✧ Graz University of Technology, Institute for Materials Science and Welding
- ✧ Vienna University of Technology, Institute of Materials Science and Technology
- ✧ Light Metals Technologies Ranshofen
- ✧ Schweißtechnische Zentralanstalt Wien

In each subproject at minimum two companies and one research partner have to be involved. One requirement of this research funding approach is the strong link between different subprojects leading to a significant added value compared to single projects.

As shown in Figure 1: Coupling of different sub-projects covering different topics1 different sub-projects within JOIN4+ are coupled to each other. Additionally to informal information exchange, seminars and other activities are organised by the JOIN4+ management.

Due to different focus of the diverse projects tow clusters were formed. These areas are called *Advanced Materials Joining* focusing on the behaviour of the material to be joined and *Advanced Joining Processes & in-situ Process Control* concentrating on advanced joining processes. Additionally, modelling and simu-

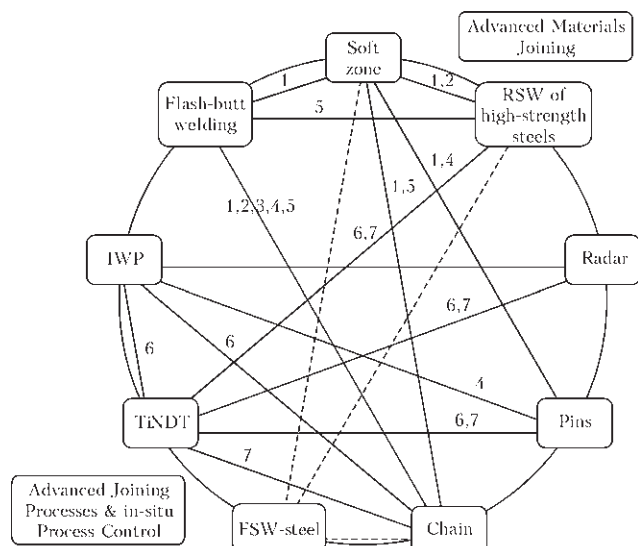


Figure 1. Coupling of different sub-projects covering different topics

lation is applied to all projects and a strategic project is run within JOIN4+.

2.3. Organisation

The Institute for Materials Science and Welding at Graz University of Technology in Austria is the responsible consortium manager. Different persons in charge cover scientific, financial and operative tasks. To consider and protect different interests of scientific and company partners, the core partners are joined in the legal consortium *ARGE JOIN4+*, supporting the consortium management.

2.4. Boundary conditions

Additionally to the funding contract each individual sub-project is defined by a project contract determining tasks, responsibilities and intellectual property rights between the partners. Funding is paid annually based on the given cost report.

For documentation, annual reports have to be forwarded to the funding organisation. These reports also include success stories. Additionally the K-project is evaluated after two years and after the end of the funding period. As a result of these evaluations changes and advancements can be requested by the funding organisation.

Depending on the requirements of the involved provinces additional efforts are necessary such as the formulation of a marketing concept or the setup of a homepage.

3. Selected results

3.1. Soft zone

The soft zone due to welding of advanced high strength steels often is a limiting factor in the application of these materials (Figure 2: Soft zone due to welding of high-strength steel. [2]).

In this sub-project it is systematically investigated, which welding parameters are essential in the development of this weak zone and how they change the local material properties. Furthermore it is explored,

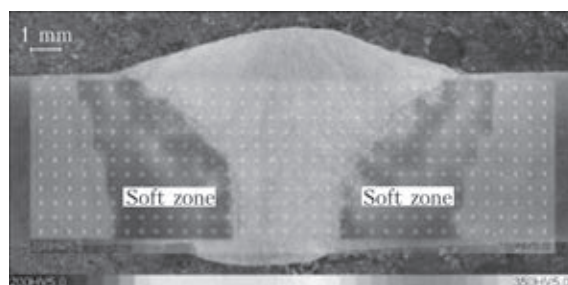


Figure 2. Soft zone due to welding of high-strength steel [2]

which variables, describing the soft zone, significantly influence the strength of a real joint. Basically the static strength is investigated but also the fatigue strength is considered.

Therefore extensive experimental thermo-mechanical investigations are performed to evaluate the numerical finite element simulation using Abaqus solver. [3] The systematic variation of different variables describing the soft zone shows that especially the quotient of width of the soft zone and sheet thickness as well as the level of the soft zone compared to the strength of the base materials are the most influencing factors. However preparation of the seam, especially of the bevel angel, was found to be less important.

Additionally microstructure development due to welding is modelled by means of SYSWELD. In house developed routines are implemented to consider effects like grain growth. [4] Variables necessary in these routines are based on microstructural characterisation of different treated microstructures by means of metallography. The results are then verified and extrapolated by use of MatCalc simulations. With this coupling of different methods it is possible to calculate the grain size and therefore to estimate material's strength due to an applied welding process.

3.2. Chain

In a predecessor project a prototype for a totally new approach in chain production was designed. Two half links are welded by means of linear friction welding. [5] In the current sub-project the influence of different welding parameters such as amplitude, frequency, friction force and forging force on the quality of the joint is investigated systematically. It is found that the geometry of the flash is a reasonable indicator for the quality. This correlation enables very fast in-line quality estimation during the start-up phase of the process. Furthermore it is found that with decreasing welding cycle time the quality of the joint improves. Based on this it is concluded could that this new production process is highly economic (Figure 3: With decreasing friction time the joint quality improves. Quality is estimated by means of flash geometry from not acceptable (A) to very good (D).3).

Additionally to comprehensive experimental investigations of the friction welding process of chains, a simulation program of the process is de-

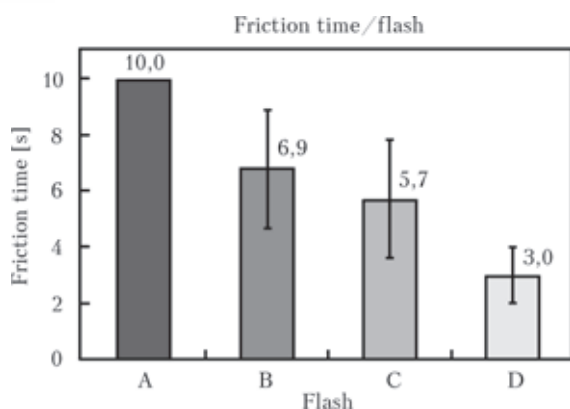


Figure 3. With decreasing friction time the joint quality improves. Quality is estimated by means of flash geometry from not acceptable (A) to very good (D)

veloped. A sever difficulty is the proper description of the heat input, which is based on friction and significantly changes during the process. By means of an inverse approach both heat input and temperature dependant friction coefficient is estimated. Therefore the local temperature of the chain, as an input parameter for this calculation, has to be measured as a function of time.

$T, ^\circ\text{C}$

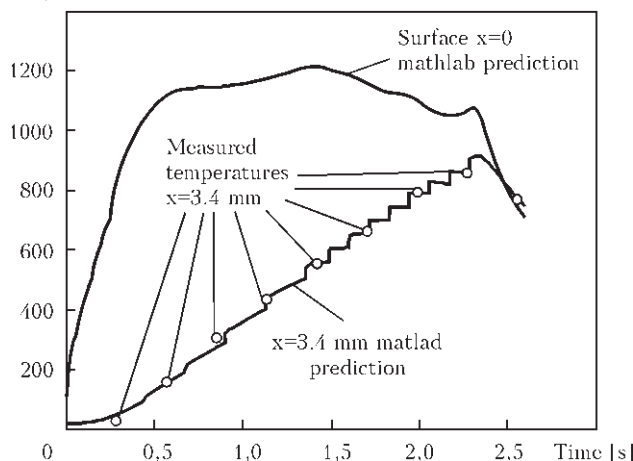


Figure 4. Comparison of measured and calculated temperature during friction welding

With the estimated heat input as a boundary condition the transient temperature field and subsequently deformation as well as flash formation can be calculated by means of an FE code, see Figure 4: Comparison of measured and calculated temperature during friction welding. [6]

3.3. Pin structures

Applying the CMT process (Cold Metal Transfer) developed by Fronius it is possible to produce different geometries of so called pins, as shown in Figure 5.

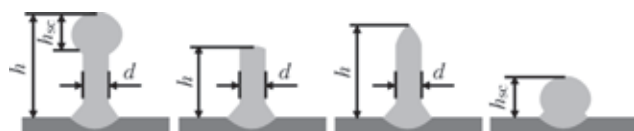


Figure 5. Different geometries of pins with characteristic dimensions

By proper application of voltage and mechanical movement of the filler wire the height and shape of the pin can be determined.

Using such pins enables to strengthen the joints between dissimilar materials such as steel and aluminium or even metal and fibre reinforced polymers by form-fit. [7]

In this project two different goals are defined. In a first step the production process of the pin itself is modelled. Especially heat input distribution during welding and shaping of the pin is modelled in a coupled FE calculation for different materials such as steel, titanium aluminides, etc. Secondly, the properties of the pins in combination with the materials to be joined are estimated. These properties depend on a high degree on the process of welding and shaping which is performed prior to the mechanical loading.

Aluminium pins face a special challenge for a successful application. Based on the thermo-physical properties they cannot be produced shorter than approximately 2 mm. Since one possible application is automotive industry where thin sheets are of interest, even 2 mm pins seem to be too long. Therefore one current focus in research is to produce much shorter pins for aluminium.

Based on the Surfisculpt® process, which was developed by TWI for steel, electron beam process is applied to structure the surface of aluminium thin sheets

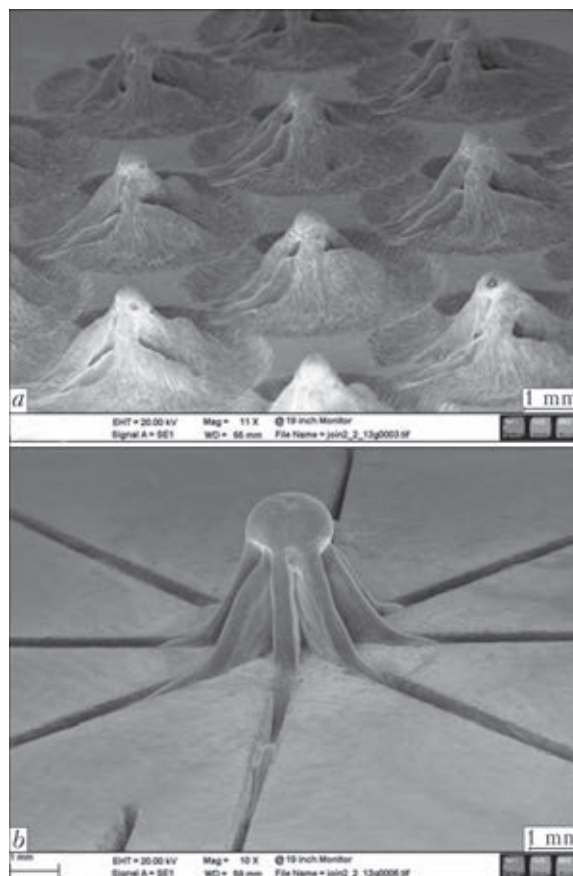


Figure 6. Surface structuring by pins (a) is produced from base material by electron beam introduced material flow (b)



Figure 7. Comparison of experimentally and numerically determined thermo mechanical affected zone after FSSW of AA6082-T6 [11]

(Figure 6: Surface structuring by pins (a) is produced from base material by electron beam introduced material flow (b).6). This approach has not been reported for aluminium alloys so far.

Friction stir spot welding (FSSW) of AA6082-T6

Additionally to the sub-projects that have been submitted, proved and funded by the COMET program, there is a further possibility to finance basic research projects in the so-called non-k area, where the company partners directly finance strategic projects. One topic under consideration deals with the modelling of microstructure evolution of aluminium alloys during the friction stir spot welding process.

Based on previous projects [9,10] a physically based model developed to describe the microstructural evolution due to FSSW [11]. To generate proper material input parameters for the simulation, Gleeble experiments are conducted with a torsion unit. The grain size representing the thermo mechanical heat affected zone is measured from specially defined welding experiments. These results are then used to evaluate the simulated thermo mechanical heat affected zone by means of the calculated grain size distribution, see Figure 7: Comparison of experimentally and numerically determined thermo mechanical affected zone after FSSW of AA6082-T6. [11]7.

4. Summary

The Austrian K-project JOIN4+ is a very successful cooperation between companies and academia. In two working areas eight different projects with significant interconnections are treated. Following key issues can be summarized:

- ✧ Basic mechanisms of friction welding
- ✧ Prediction of properties of welded joints in advanced high strength steels
- ✧ Improved reliability for detection and characterisation of weld defects

✧ Improved process reliability by control of significant welding parameters

✧ Development of modern sensors for welding processes

✧ Joining of dissimilar materials

Sound communication between the project partners stimulates to find surprising solutions leading to innovative and advanced results. A further advantage of this approach is the possible starting point of a long-term cooperation between acting partners.

5. Acknowledgement

The K-project Network of Excellence for Joining Technologies JOIN4+ is funded in the frame of COMET — Competence Centers for Excellent Technologies by BMVIT, BMWFJ, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, SFG and ZIT. The program COMET is managed by the Austrian Research Promotion Agency in Vienna. <http://www.ffg.at/comet>.

1. <http://www.ffg.at/comet>
2. Hochhauser, F., Ernst, W., Rauch, R. et al. (2012) Influence of the soft zone on the strength of welded modern HSLA steels. *Welding in the World*, **56**, 0506, 77-85.
3. Maurer, W., Ernst, W., Rauch, R. et al. (2012) Numerical simulation on the effect of HAZ softening on static tensile strength of HSLA steel welds. In: *Proc. of 10th Int. Seminar on Weldability* (Seggau, Austria, Sept. 2012).
4. Rahman, M., Albu, M., Enzinger, N. (2012) On the modeling of austenite grain growth in micro-alloyed HS steel S700MC. In: *Ibid.*
5. Fuchs, F., Tasic, P., Enzinger, N. (2009) Innovatives Schweißverfahren fuer hochfeste Hebe- und Foerderketten. *Schweiss- & Prueftechnik Sonderband*, 15-17.
6. Mucic, K., Fuchs, F., Enzinger, N. (2012) Linear friction welding of high strength chains. In: *Proc. of 9th Int. Conf. Trends in Welding Res. Conf.*
7. Ucsnik, S., Scheerer, M., Zaremba, S. et al. (2010) Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. *Composites Pt A. Applied Science and Manufacturing*, **41**, 369-374.
8. <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/an-introduction-to-surfi-sculpt-technology-new-opportunities-new-challenges-april-2007/>
9. Khosa, S., Weinberger, T., Enzinger, N. (2010) Thermo-mechanical investigations during friction stir spot welding (FSSW) of AA6082-T6. *Welding in the World*, **54**, 134-146.
10. Pavel, S., Melzer, C., Sommitsch, C. (2012) Prediction of precipitation kinetics during homogenization and microstructure evolution during and after hot rolling of AA5083. *Int. J. Mechan. Sc.*, **54**, 12-19.
11. Gao, Z., Niu, J., Krumphals, F. et al. FE modeling of microstructure evolution during friction stir spot welding in AA6082-T6. *IIW Annual Assembly IX-NF*. Denver, USA, 8.7.2012.

Received 22.02.2013



ONGOING ACTIVITIES AND PROSPECTS RELATED TO WELDING TECHNOLOGY AT LAPROSOLDA-BRAZIL

Louriel O. VILARINHO¹ and Laura O. VILARINHO²

¹ Laprosolda – Center for Research and Development of Welding Processes, Federal University of Uberlandia, Brazil, vilarinho@mecanica.ufu.br

² CTBC/Algar Telecom, Uberlandia, MG, Brazil

An overview of Laprosolda's activities in research, development and innovation of welding processes is presented within three main areas: fundamentals, instrumentation and application. Since the group philosophy aims to develop different welding processes, in this work three cases are presented to illustrate these areas. The first one deals with the measurement of heat input for derivative arc-welding processes. The second case shows embedded systems developed for arc-welding monitoring and control. The last one presents the evaluation of conventional and controlled short-circuit GMAW processes for pipe welding. The objective is to present the ongoing activities and prospects related to welding technology within Laprosolda group. 16 Ref., 3 Tabs, 10 Figures.

Key words: heat input measurement, monitoring and control, pipe welding, ongoing activities, prospects

1. Introduction

Welding technology demands continuous research, development and innovation through the years. It is defined by ISO 3834 (2005) as a special manufacturing process, since quality assurance cannot be realized by final inspection only. The joining is totally dependent on personnel, equipment and facilities. Therefore, development and improvement of equipment and methods are needed for constant development.

In this context, the Brazilian group named Laprosolda (Center for Research and Development of Welding Processes) started its activities in research, development and innovation of welding processes in 1992. The group philosophy aims to develop different welding processes in three main areas (or work line) named: the Fundamentals of Welding (arc physics, metal transfer during derivative processes, corrosion in welded joints, derivative arc-welding processes and numerical simulation of heat transfer, residual stress and distortion correlated to welding processes), Instrumentation for Arc-welding Processes (remote monitoring and controlling for arc welding, embedded wireless monitoring system, low-cost vision system, calorimeters, sound monitoring system, waveform synchronized weaving, development of dedicated experimental rigs and luminescence sensors for AVC and joint tracking) and Application (pipe welding of API steels and CRA, overlaying for wear and corrosion purposes, RSW for AHSS in MFDC and AC machines, stainless steel weldability and health and safety — fumes, radiation and electromagnetic fields).

The objective of this work is to summarize the activities that have been done and what is intend to do in the future in Laprosolda group within the scope of these three areas. In order to illustrate these activi-

ties, three following cases are presented. The first one deals with the measurement of heat input for derivative arc-welding processes. The second case shows embedded systems developed for arc-welding monitoring and control. The last one presents pipe welding with conventional and derivative GMAW processes.

2. Heat input measurement for derivative processes

One of the most influent parameter on the welding process is the heat delivered to the workpiece (heat input) due to its direct connection with changes in metallurgical characteristics and mechanical properties of the weld joint. In order to quantify the heat input, different methods have been developed, both theoretical (analytical and numerical ones) and experimental (calorimetry), with large dispersion of results.

Calorimeters used for thermal studies in welding include different methodologies and physics basis for their construction and with, technological advances, calorimeters increase in sophistication. The last trend is the use of liquid-nitrogen calorimeter (Pepe, 2010), which is based on the measurement of evaporated mass from a recipient with liquid nitrogen and this mass is correlated to the heat input. Although liquid-nitrogen (N₂L) calorimeter is a powerful tool for heat input measurement, it was not found in literature any attempt in automatize or take external effects into account.

Therefore, a fully automatic N₂L calorimeter (Figure 1) was developed at Laprosolda basing on pneumatic automation for measuring heat input during different arc-welding processes, with improvement from previous literature work, minimizing the influence of operator, environment, welding time and transfer time (from rig to N₂L recipient). Very good repeatability was found with maximum data scattering of 3.0 %.

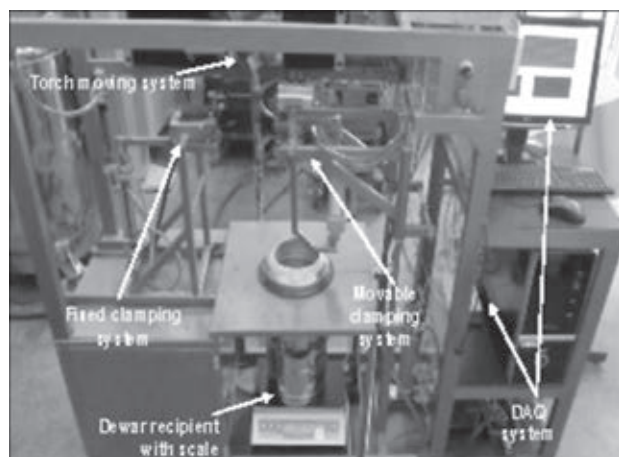


Figure 1. Experimental rig for N_2L calorimeter

Fixed clamping system Dewar recipient with scale
Movable clamping system Torch moving system
DAQ system Due to the increase importance of derivative GMAW processes, their thermal efficiencies were measured. These processes are STT (Surface Tension Transfer), RMD (Regulated Metal Deposition), CMT (Cold Metal Transfer), GMAW-P (Pulsed) and GMAW-VP (Variable Polarity). It must be pointed out that the correct nomenclature to designate such variants is “GMAW process with controlled short-circuit metal transfer by using commercial RMD/STT/CMT power sources manufactured by Miller/Lincoln/Fronius”. This nomenclature is usually summarized in the form of “RMD/STT/CMT Process” in order to simplify both oral and written communication.

Table 1. Measurements by using the N_2L calorimeter for derivative processes

STT	I [A]	WFS [cm/min]	V_s [cm/min]	L_c [cm]	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]
	115	2.3	12.3	15	18.4	119	2147	1055	774	73.4
	115	2.3	12.3	15	18.4	119	2134	1045	780	74.7
	155	3.3	17.6	15	16.6	154	2606	851	681	79.9
	155	3.3	17.6	15	16.6	154	2629	892	692	77.5
RMD										76.4
	I [A]	WFS [cm/min]	V_s [cm/min]	L_c [cm]	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]
	115	2.3	12.3	15	17.5	118	1906	903	741	82.0
	115	2.3	12.3	15	17.5	118	1917	902	722	80.1
	155	3.3	17.6	15	17.5	156	2651	957	730	76.3
CMT	155	3.3	17.6	15	17.6	154	2645	944	720	76.2
										78.6
	I [A]	WFS [cm/min]	V_s [cm/min]	L_c [cm]	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]
	115	2.2	11.2	15	10.7	114	1646	861	649	75.4
	115	2.2	11.2	15	10.9	113	1658	863	652	75.6
GMAW-P	155	3.3	17.0	15	12.0	156	2464	816	622	76.3
	155	3.3	17.0	15	11.9	157	2465	851	657	77.2
										76.1
	I [A]	WFS [cm/min]	V_s [cm/min]	L_c [cm]	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]
	115	3.0	15.8	15	21.2	113	2773	1049	744	70.9
GMAW-VP	115	3.0	15.8	15	21.5	113	2816	1031	725	70.3
	155	4.0	21.3	15	25.7	154	4368	1184	813	68.7
	155	4.0	21.3	15	25.3	155	4360	1180	812	68.9
										69.7
	I [A]	WFS [cm/min]	V_s [cm/min]	L_c [cm]	U_m [V]	I_m [A]	P_{inst} [W]	E_{sold} [J/mm]	E_{imp} [J/mm]	Rend [%]
	115	3.0	15.8	15	21.9	115	2775	1462	860	58.9
	115	3.0	15.8	15	22.1	115	2793	1512	867	57.3
										58.0

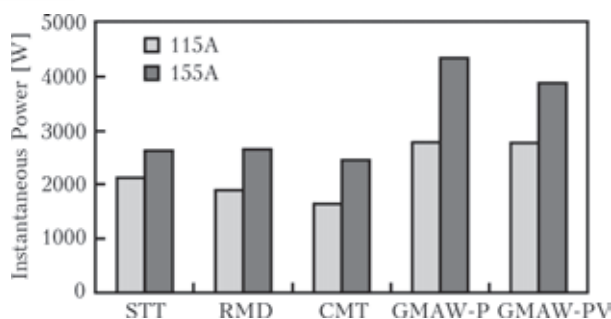


Figure 2. Instantaneous electric power for different GMAW processes

Welding parameters were adopted from previous Laprosolda researches (Vilarinho et al., 2009 and Costa, 2011) and preliminaries runs were carried out to select proper parameters at two current levels of 115 and 155 A. ASTM A36 plates were used with 1.2-mm AWS ER70S-6 wire and Ar+25 % CO₂ (short-circuit) and Ar+5 % O₂ (spray) as shielding gases. Data acquisition was carried out for monitoring voltage, current, wire feed speed and mass (scale read out) at 2.0 kS/s. Welding energy calculation was performed by Equation 1. The heat input is calculated by latent heat of N₂L and thermal efficiency is calculated by dividing heat input by welding energy.

$$P_{\text{inst}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot I_i}{n} \quad (1)$$

where P_{inst} is instantaneous power [W]; U_i is voltage for each i sample acquired by DAQ system [V]; I_i is current for each i sample acquired by DAQ system [A]; and n is the number of samples. This power must be also divided by the travel speed.

The results are shown in Table 1. It must be pointed out that this table shows one replica for each condition to show repeatability. It is possible to observe the higher values of electric power (and therefore welding energy) for GMAW-P and GMAW-PV (Figure 3). This is due to the fact that these processes demands free-flight transfer mode, i.e., they demand high arc lengths and therefore higher voltages when compared to the other processes (STT, RMD and CMT), which uses controlled short-circuit transfer.

For STT process the measured values for thermal efficiency range from 74.0 % to 78.7 %, when current arises from 115 A to 155 A. This shows an increase in heat losses by convection and radiation. The average thermal efficiency for STT is 76.4 %, which is low when compared to 85 % presented by other authors (Hsu and Soltis, 2003 and Pepe, 2010). For CMT process, Pepe (2010) presents average value of 86 %, which is also higher than the ones found in this work: 75.4 % for 115 A and 76.8 % for 155 A. The reason for this discrepancy is the range of parameters used here and other authors, and the fact that welding time for these authors are considerably lower (25 seconds for literature and 42 seconds in this work).

During RMD process, thermal efficiencies of 91.0 and 76.3 % were measured for 115 A and 15 A, respectively, i.e., a similar behavior was found when compared to other processes. Measurements from other authors were not found in literature and since these results are close to the ones measured for STT and CMT, they are considered to be adequate. The main reason for such close measured values for thermal efficiency is due to the fact that the welding parameters were previously investigated (Costa, 2011) and represent an optimized condition for these three processes (STT, RMD and CMT) for a given situation (welding of carbon-steel pipes in single pass).

GMAW-P process presented a decrease in thermal efficiency from 70.6 % to 68.8 % when current decrease from 115 A to 155 A, which again indicates a higher heat loss for higher currents and a demand for higher arc voltage. The latter contributes to a higher heat input. The average value of thermal efficiency for GMAW-P found in literature (Joseph et al., 2003) varies from 62 % to 73 %, against 69.7 % in this work and in Bosworth (1991), which reports values from 75 % to 80 %.

Among the GMAW processes, GMAW-PV is the one that presented the lowest thermal efficiency with an average of 58.0 %, with no statistical variance between current levels (115 A and 155 A). Harwig (2003) reports that the heat input by GMAW-PV is at least 25% lower when compared to GMAW-P and almost half when compared to conventional spray transfer for a given wire feed speed.

2.1. Embedded systems for monitoring and control

Different devices from different manufacturers provide monitoring for welding process, with focus on specific parameters. Ongoing trend follows the creation of equipment for practical and simple use, with the elimination of adaptive circuits and greater flexibility. This is highlighted by the fact that the monitoring equipment must be adapted to the manufacturing environment and not otherwise. The demand for flexibility is accomplished by replacing traditional cabling system by wireless communication one, which is not readily available/applicable for welding monitoring.

The initial idea of an embedded device (complete and independent system prepared to perform a unique and determined task — Cunha, 2007) with wireless communication is originated in the dissemination of computer networks for manufacturing and technological development of communication products and portable data (notebooks and smartphones). This scenario indicates the integration of welding monitoring with wireless communication, which is an achievable reality and promising technology. Therefore, it is presented a series of independent embedded (“autonomous”) systems with specific features (proprietary technology, scalability, portability, autonomy, flexi-

**Table 2. Comparison of resolution for different resolutions of A/D converters**

Parameter	Range	Required resolution	A/D 10 bits	A/D 12 bits	A/D 14 bits
Voltage (V)	±100	0,1	±0,196	±0,048	±0,012
Current (A)	±500	1	±0,978	±0,244	±0,061

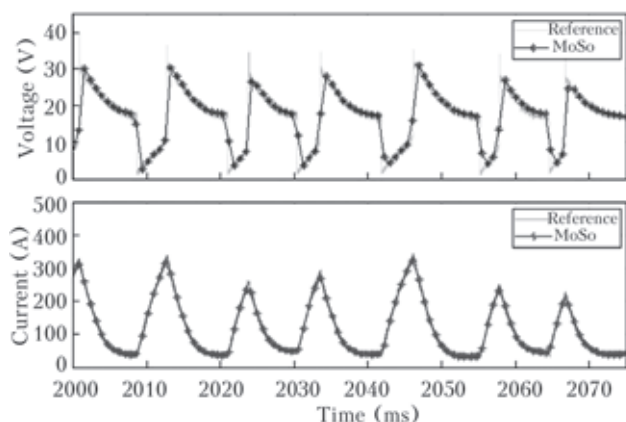


Figure 3. Current and voltage signal obtained by using MoSo and reference system: 19.0 V; 4 m/min, Ar+25 % CO₂ and 1.0 mm-ER70S-6 electrode

bility and low cost / simplicity of operation), namely:

- Wireless signal monitoring;
- Vision-based joint tracking;
- Waveform synchronized weaving;
- Sound monitoring for regularity index determination.

The first one is a system for wireless arc-welding signals monitoring (so-called MoSo — Welding Monitor in Portuguese, Machado, 2011), which consists of an independent embedded system, capable of monitoring arc-welding processes and communicating in a robust and flexible way to different devices, with a user-friendly system, using the state-of-the-art in communication technology. It employs an A/D converter resolution of 12-bit (Table 2) with the Microchip ZéroG ZG2100M for Wi-Fi communication module and the dsPIC33FJ256GP710 as the device to be used.

The human interface of MoSo system is based on web server technology and it is accessible by any equipment with a built-in web browser. The main page of the system has a configuration section, where the user selects among fixed acquisition time (0.5 to 4 s), finite and continuous acquisition, and the possibility for data saving.

Once initiated, MoSo receives the data from the embedded system and shows waveforms for voltage, current and wire feed speed. It also shows the rectified mean and RMS (root mean square) values of each parameter. The whole system was tested with GMAW short-circuit and spray, GMAW-Pulsed, GTAW-AC (alternating current) and GTAW-Pulsed. Using the statistical parameter known as Pearson coefficient (r), the waveforms saved by MoSo were compared to a reference system (from a worldwide manufacturer of DAQ systems), and shows results above 0.7, indicating a strong correlation between the waveforms. The rectified mean and RMS values obtained show relative errors below 2.5 %, which is required by BS7570 (2000). As an example, Figure 3 presents a comparison between the results (waveforms) from MoSo system and reference one for GMAW with short-circuit transfer. The resemblance between the obtained signals from both developed and reference systems is evident. Therefore, the developed system met its objective and it is capable of performing the required tasks.

The second system is a low-cost vision system, which is based on the use of high-power (70 W) laser diodes with low cost. It can be used for man-assisted supervision, for joint tracking and for process parameter control, such as arc length and weaving

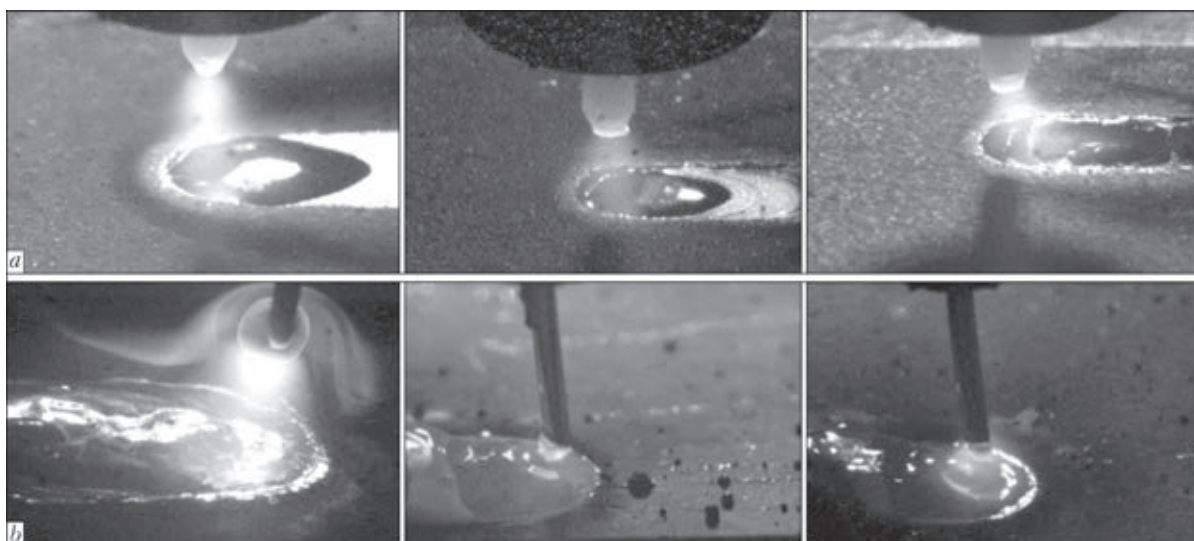


Figure 4. ViaSolda system images from left to right: a — GTAW at 250 A, 150 A (shorter exposure) and 150 A (longer exposure), b — GMAW at 150 A for globular transfer (30 V), short-circuit transfer during short-circuit (18 V) and short-circuit transfer during open arc (18 V)



amplitude. The developed vision system is so-called ViaSolda and consists of an analogic low-cost camera (CCD Costar SI-M331) with low exposure time ($1.25 \mu\text{s}$) and resolution of 768×494 pixels. Also ViaSolda system uses a developed near-infrared (905 nm) illumination set that consists of 19 high-power laser diodes (Osram SPL PL90_3). It also has a high power circuit and a programmable MCU (microcontroller) capable of generating enough power to the diodes and an electronic trigger to turn the camera on (shuttering) and the illumination system at the same time. In this case a frequency of 30 Hz (frames per second) was selected (Mota, 2011).

The images obtained by ViaSolda are shown in Figure 4. It is possible to assert that the developed low-cost vision system is fully capable of viewing the weld pool and its surrounds and, therefore can be used as a vision-based joint tracking system.

The third proposed system is an embedded and dedicated system capable of monitoring the torch angles (attack and working angles) during torch movements (travel speed and weaving). By using the measurement of the torch angle, the system can control the power source and lead to different set of parameters (in the present version, three different sets are possible). This is underlined by the requirements of field joining, which involve variability in geometry, consumables, equipment, personnel skills, land site and weather. Among those, the tolerance of the groove itself is a major concerned when mechanized welding is performed. Therefore, it is important to develop strategies that can cope with poor geometric tolerances, which are estimated from 1.6 to 3.0 mm for

both root opening and alignment of the groove. One possible strategy for overcoming this limitation is the use of synchronous waveforms with torch positioning during its weaving. The idea is to vary welding parameters, such as positive to negative polarities or high to low currents, dependently to the waving setup, as shown in Figure 5. Also different waveforms can use, since they are synchronized with weaving.

Therefore, it was developed and assessed a system Conparte (Parameter Control System by Weaving, in Portuguese), which is capable of monitoring the torch angles (attack and working angles) during torch movement (travel speed and weaving). During the weaving three regions are considered (as shown in Figure 5) and numbered 1, 2 and 3. Once each of these regions is identified, the Conparte system commands a welding power source (IMC DIGIplus A7) to select a specific welding program. The identification of each spatial region can be done by different sensors. In this case, a three-axis accelerometer (MMA7361L), a magnetic-contact sensor (9028PA) and an optic infrared receiver (TCST1103) were used (Figure 6). As mentioned, it identifies three mentioned regions and set three different programs in the power source, accordingly to Table 3 for GMAW with ER70S-6 1.2 mm wire and Ar+25 % CO_2 .

The final acquired signals for the three sensors are shown in Figures 7a, 7b and 7c, respectively for optic infrared receiver, magnetic-contact sensor and three-axis accelerometer sensors. These images show the synchronization between the program selection (P2 or P4) according to Table 3, with immediate response shown in current curves. Therefore, it is pos-

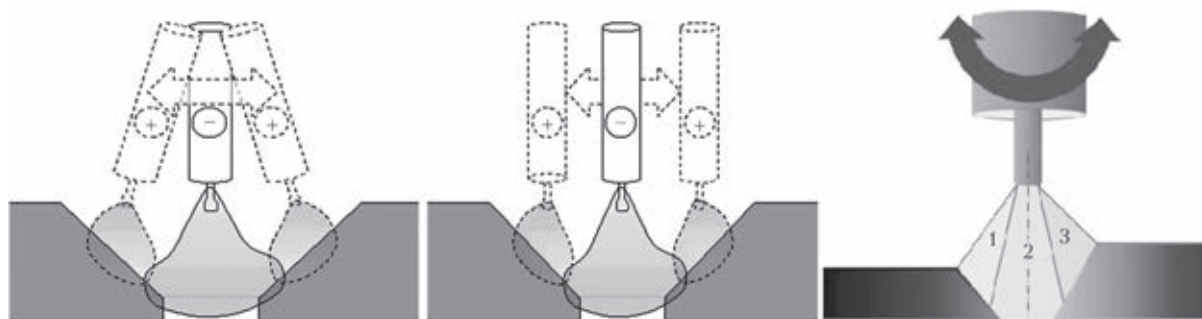


Figure 5. Different conceptions of synchronous weaving

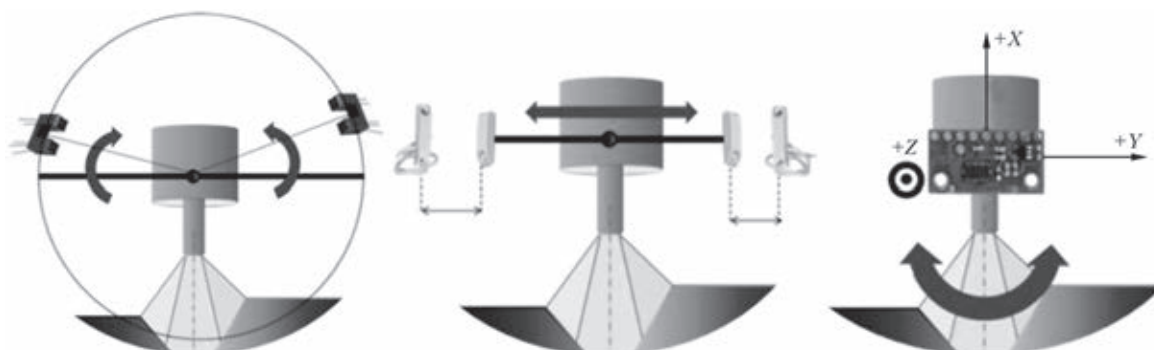


Figure 6. Sensors used in Conparte system: magnetic 9028PA (left), optic infrared receiver TCST1103 (center) and accelerometer MMA7361L (right)



Table 3. Programs used for validating Conparte system

Sensor	Program	Current (A)	Wire feed speed (m/min)
Optic infrared receiver	P2	150	3.0
	P4	200	3.5
Magnetic-contact sensor	P2	300	6.0
	P4	260	8.0
Three-axis accelerometer	P1	220	6.0
	P2	260	8.0

Note: In all cases, the pulse period was set as 18 ms for each program.

sible to state that Conparte system was capable for performing waveform synchronized weaving.

The fourth system is a sound monitoring system. The sound monitoring has been always treated as a possibility for welding control but with little application, justified by its low robustness by external noises interference. Sound monitoring is not new (Arata et al., 1979), but successful application has been possible by using modern instrumentation and processing (Cudina et al., 2008 and Cayo and Alfaro, 2009). Differently from these authors, instead of using the signal to identify a trend on its own, here it is propose to use the sound to calculate a regularity index, already established during the monitoring of electrical signals (voltage and current).

The study of metal transfer regularity in short-circuit welding processes has already been done by electrical signals monitoring. Different indexes for establishing suitable conditions, such as regularity in this transfer, have been proposed. One of them is so called Vilarinho's Regularity Index (IVcc), which is a methodology created by the group Laprosolda/UFU based on Equation 2

$$IVcc = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad (2)$$

where, $\sigma_{t_{cc}}$ is the standard deviation of short-circuit period (time), $\sigma_{t_{ab}}$ is the standard deviation of open-arc period (time), t_{cc} is the average of the short-circuit

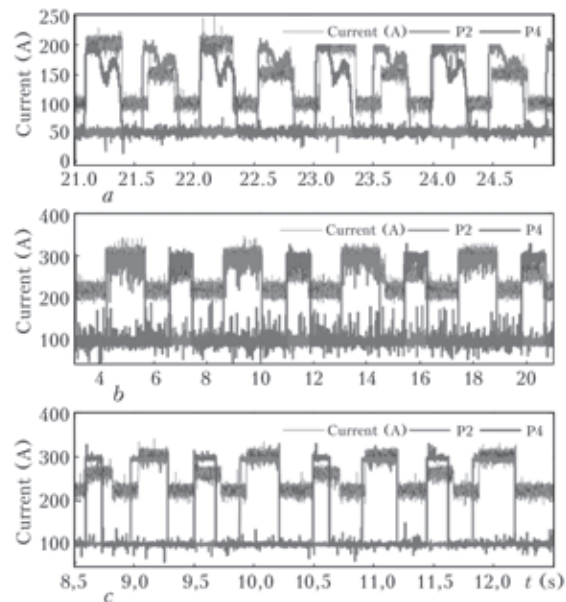


Figure 7. Signals obtained from Conparte system for different sensors: (a) optic infrared receiver, (b) magnetic-contact sensor and (c) three-axis accelerometer

period (time); t_{ab} is the average of open-arc period (time).

Therefore, it is presented the use of sound signal from conventional short-circuit GMAW process for IVcc determination and compare it with the one obtained by electrical signals. The use of conventional short-circuit is justified by the fact that besides it has been widely used, it is expected to its use in opposition to derivative processes, which demand high-cost equipment. The final goal is to verify the feasibility of sound monitoring to measure metal transfer regularity without electrical instrumentation or where sound monitoring is simpler and straightforward. Weldments were carried out and comparisons between the results provided by electrical and sound analysis have been carried out. Two types of microphones (electret and commercial ones) and three distances (200, 400 and 800 mm) from the process were employed.

Figure 8 illustrates the obtained results when com-

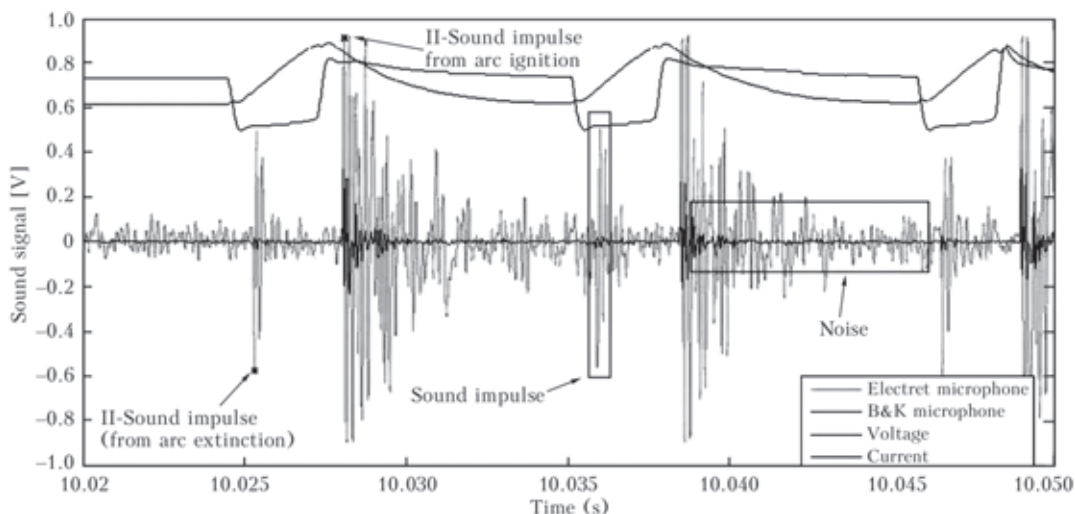


Figure 8. Relationship among current, voltage and sound signals

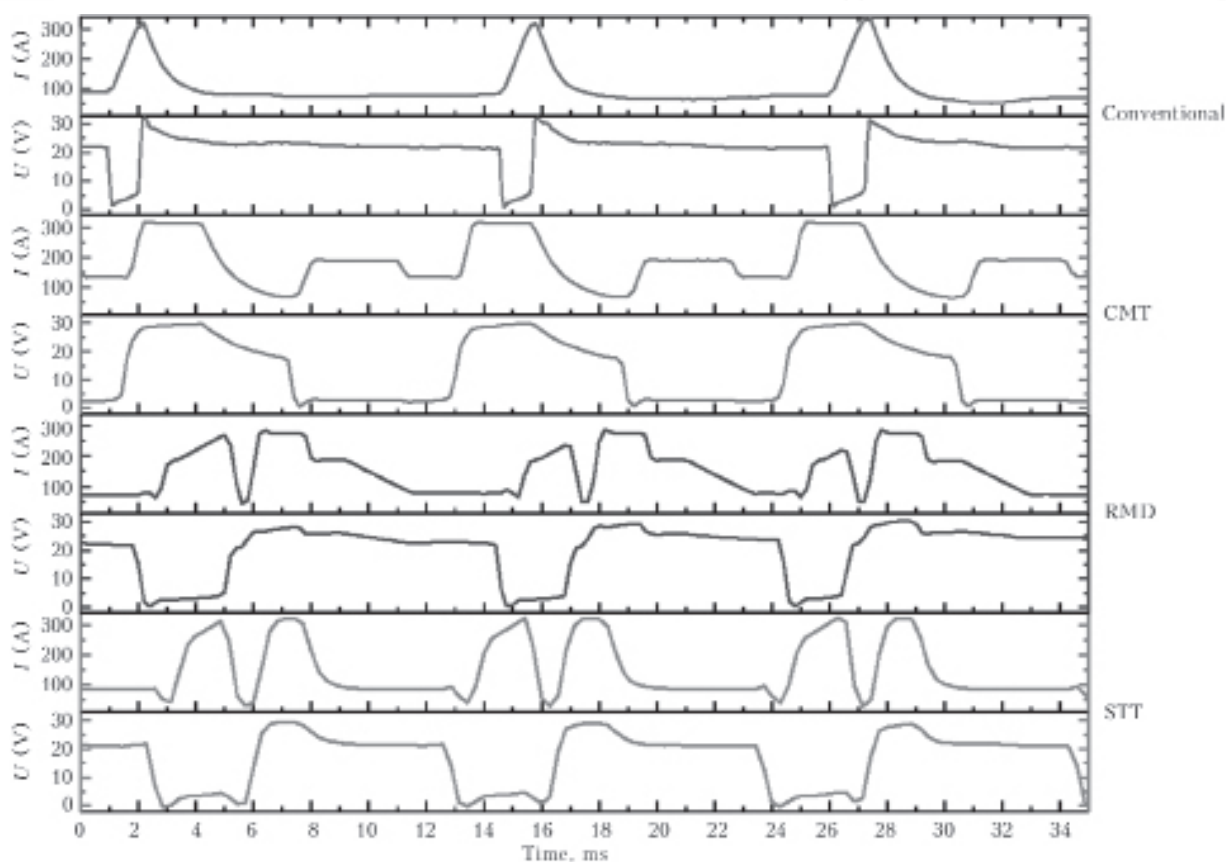


Figure 9. Example of obtained electrical signals

paring electrical and sound signals, which after processing calculate the mentioned index with difference lower than 0.5%. It is possible to conclude that the developed sound monitoring methodology is capable of measuring the regularity index similarly to the one calculated from electrical signals and the suitable distances between the microphones and the welding is from 200 to 400 mm, with a delay time of 0.7 and 1.1 ms, respectively. For 800 mm (2.1-ms delay) the signal-to-noise relationship is so low that calculation was not possible.

3. Pipe welding with conventional and derivative gmaw

Brazil's continental size and the increasing demand for oil and gas in new industrial areas outside Brazilian south-southeast axis have established a great challenge for fast and reliable expansion of pipelines. Such need requires the continuum development of joining technologies, which main trend has been the development of power sources capable of waveform control. This feature introduced the concept of GMAW derivative process and its version for short-circuit metal transfer (also known as controlled short-circuit) has become a trend in the search for high productivity and high quality weld beads, especially for pipe welding.

It is believed that the waveform control, achieved in such GMAW derivative processes, improves the metal transfer and reaches stability on both process and weld pool. Also the waveform control aggre-

gates value to the power source, i.e., the conventional short-circuit GMAW process requires power sources with lower cost in comparison to the derivative ones. Therefore, it is presented the use of GMAW processes with conventional short-circuit transfer and derivatives (STT, RMD and CMT) for pipe welding, especially for the root pass in pipe welding, which is critical for the cadency of field welding. The root pass was investigated using downhill progression, 1.2-mm ER70S-6 wire and both Ar+25 % CO₂ and pure CO₂ as shielding gases. A V-butt joint was used with 15. bevel angle, 1-mm root face and 3 to 4-mm root opening preparation in 8-mm thickness on API 5L X-65 with 8" pipe. Contact tip to work distance was 15 mm. Conventional short-circuit GMAW and RMD processes were carried out by using PipePro 450 RFC power source. PowerWave 450 power source were used for the STT process, whereas TPS 5000 were employed for CMT. The parameter set for each process was varied together with weaving technique and wire-feed speed, keeping the same amount of deposited material. Analyses of the weld beads were carried out by visual inspection and metallographic analysis based on of API 1104 (2010).

Figure 9 presents an example of electrical signals (voltage and current) obtained during welding. The waveforms for the derivative process comprise two stages. The first one refers to the moment when the droplet and the electrode touch the weld pool and

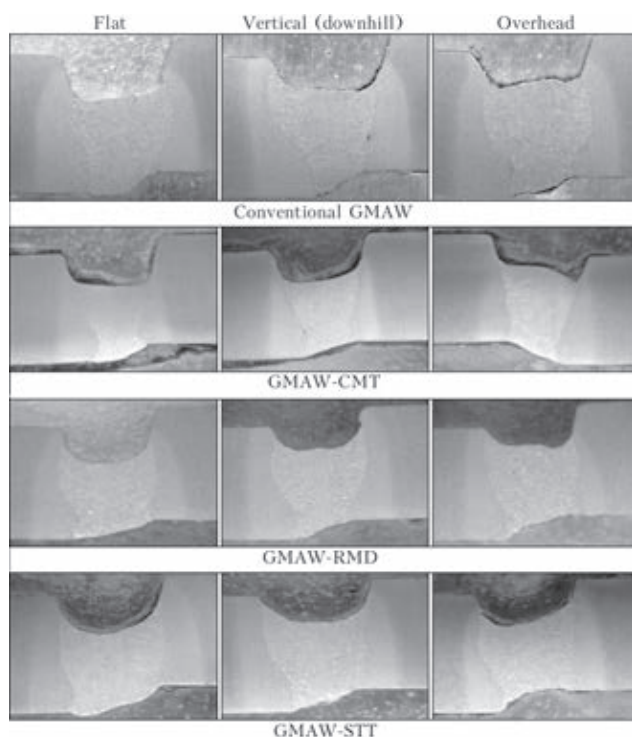


Figure 10. Examples of suitable weld beads (macrographs) obtained with up to 1.5 mm of Hi/Low (thickness: 8 mm)

there is a control for reducing the increase in welding current. And a second one, when the current increase promoting the droplet detachment, followed by a maintenance of constant value for both voltage and current, which characterizes the open arc phase.

Concerning the bead quality, Figure 10 presents the macrographs with misalignments (Hi/Low) for each process at three positions: flat, vertical (downhill) and overhead.

These results show that derivative and conventional short-circuit GMAW processes are capable of achieving sound welds even if misalignments are present. In this case, the correct setup of welding parameter is capable of handling up to 1.5 mm of misalignment in the root (Hi/Low). It indicates that derivative and conventional short-circuit GMAW processes present suitable operational envelopes for all investigated processes, even when misalignment (Hi/Low) up to 1.5 mm is presented in the root.

4. Final considerations

Different ongoing activities and prospects related to welding technology within Laprosolda group were presented. They indicate the group philosophy, which is aimed to develop different welding processes in three main areas (or work line): the Fundamentals of Welding, Instrumentation for Arc-welding Processes and Application. It is possible to conclude that the results and the techniques presented here are powerful tools for R&D&I in welding technology.

5. Acknowledgements

Authors would like to thank Fapemig, CNPq, Laprosolda/UFU and CTBC/Algar Telecom.

1. *API 1104:2010*: Welding of pipelines and related facilities.
2. Arata, Y. et al. (1979) Investigation on welding arc sound. *Transact. of Joining and Welding Research Institute*, 8(1), 25–31.
3. Bosworth, M. (1991) Effective heat input in pulsed current gas metal arc welding with solid wire electrodes. *Welding J.*, 70, 111–117.
4. (2000) *BS7570*: Code of practice for the validation of arc welding equipment.
5. Cayo, E.H., Alfaro, S.C.A. (2009) A non-intrusive GMA welding process quality monitoring system using acoustic sensing. *Sensors*, 9, 7150–7166.
6. Costa, T.F. (2011) *Application of MAG processes with short-circuit transfer in conventional and controlled modes for carbon-steel pipe welding*: MSc. Thesis, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil.
7. Cudina, M., Prezelj, J., Polajnar, I. (2008) Use of audible sound for on-line monitoring of gas metal arc welding process. *Metallurgija*, 47, 81–85.
8. Cunha, A.F. (2007) What are embedded systems? *Saber Eletronica*, 43, July, 414.
9. Harwig, D.D. (2003) *Arc behavior and metal transfer in the VP-GMAW process*. Cranfield University: School on Industrial Manufacturing Science.
10. Hsu, C., Soltis, E.P. (2003) Heat input comparison of STT vs. short-circuiting and pulsed GMAW vs. CV Processes. In: *Proc. of 6th Int. Conf. on Trends in Weld. Res.*, 369–374.
11. (2005) *ISO 3834*: Quality requirements for fusion welding of metallic materials.
12. Joseph, A., et al. (2003) Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding. *Sci. and Technology of Welding and Joining*, 8(6), 400–406.
13. Machado, M.V.R. (2011) *Embedded system for wireless signal monitoring during arc welding with technological approach*. MSc. Thesis, Fed. Univ. Uberlandia.
14. Mota, C.P. (2011) *Near-infrared vision system for arc-welding monitoring*: Master Thesis, Federal University of Uberlandia, MSc. Thesis, MG, Brazil, 137f.
15. Pepe, N. (2010) *Advances in Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes*. Cranfield University.
16. Vilarinho, L.O. et al. (2009) Methodology for parameter calculation of VP-GMAW. *Welding J.*, 92–98.

Recieved 26.03.2013



MICRO-WELDING OF ALUMINUM ALLOY BY SUPERPOSITION OF PULSED Nd:YAG LASER AND CONTINUOUS DIODE LASER

Y. OKAMOTO¹, S. NAKASHIBA², T. SAKAGAWA² and A. OKADA¹

¹Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan. E-mail: okamoto@mech.okayama-u.ac.jp

²Advanced Laser Research Laboratory, Kataoka Corporation, 2-14-27 Shin-yokohama, Kohoku-ku, Yokohama 222-0033, Japan

The combination of a pulsed Nd:YAG laser and a continuous diode laser could perform the high-performance micro-welding of aluminum alloy. A pulsed Nd:YAG laser was absorbed effectively from the beginning of laser scanning by pre-heating Nd:YAG laser pulse with the superposition of continuous LD, and wide and deep weld bead could be obtained with better surface integrity. 6 Ref., 2 Tabs, 8 Figures.

Key words: pulsed Nd:YAG laser; aluminum alloy; micro-welding

Introduction

Mobile products such as PDA, Notebook PC and mobile phone have been widely used in the fields of information and communication technology. In the automobile industry, hybrid vehicle and electric vehicle attract customers because of their low energy consumption, and they are expected as the key products of next generation. In order to accomplish highly performance of these products, lightweight and high specific strength materials are required. Aluminum alloys have been widely used to achieve lightweight and miniaturization in these fields, hence high-performance welding has been required. A pulsed Nd:YAG laser of 1064 nm in wavelength has been applied to the micro-welding of aluminum alloy [1]. However, the absorption rate of a Nd:YAG laser by aluminum alloys is only 5 % at room temperature, as shown in Figure 1 [2, 3]. Since the absorbed laser energy is very low, high peak power laser system must be used to achieve sufficient penetration depth and acceptable bead width. High peak power is useful to increase the penetration depth and the bead width, but the excessive heat input leads to the deterioration of surface quality and integrity due to the spatter and the porosity [4].

On the other hand, the aluminum alloy shows the high absorption rate around 810 nm as shown in Figure 1. The wavelength 808 nm of diode laser (hereafter LD) is useful to increase the absorption of laser energy, and its absorption rate is 3 times higher than that of Nd:YAG laser of 1064 nm. In addition, low cost and high power LD is available by the recent development of semiconductor technology, and the high brightness LD is also expected. Therefore, the micro-welding technology of aluminum alloy by the combination of a pulsed Nd:YAG laser and a continuous LD was proposed, and efficient absorption of Nd:YAG laser was expected [5, 6].

© Y. Okamoto, S. Nakashiba, T. Sakagawa, A. Okada, 2013

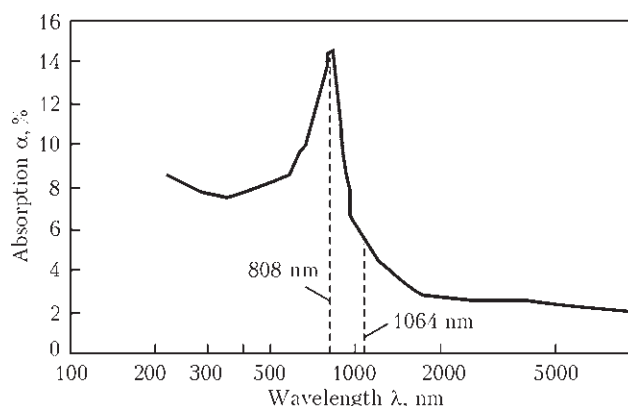


Figure 1. Absorption rate of aluminum alloy A3003 at room temperature

However, it is difficult to perform the sufficient deep penetration depth with good surface integrity at the beginning of laser scanning. The higher peak power could become the penetration depth deeper, while the deterioration of surface integrity might be noticed. The deeper penetration depth from the beginning of laser scanning with the better surface integrity is very useful for the industrial application. From the viewpoints mentioned above, the effects of superposed continuous LD on micro-welding of aluminum alloy by a pulsed Nd:YAG laser were investigated, and the pre-pulse method was discussed in order to improve the penetration depth even at the beginning of laser scanning by pre-heating Nd:YAG laser pulse.

Experimental procedures

Figure 2 shows the schematic diagram of laser irradiation system. Table 1 shows the specifications of a pulsed Nd:YAG laser and a continuous LD used in this study. A pulsed Nd:YAG laser of 1064 nm in wavelength and continuous LD of 808 nm in wavelength were superposed on the same beam axis by a dichroic mirror, and the superposed laser beam of two wavelengths were delivered to a processing head through an optical fiber of 300 μ m diameter with SI

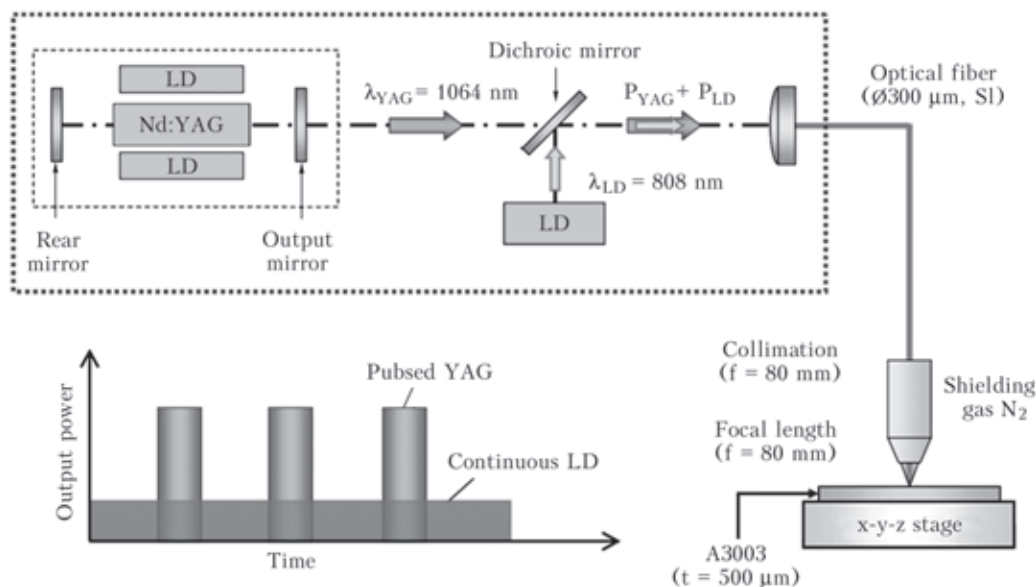


Figure 2. Schematic diagram of laser irradiation system with superposition of pulsed Nd:YAG laser and continuous diode laser

Table 1. Specifications of pulsed Nd:YAG laser and continuous diode laser

	Nd:YAG laser	Diode laser
Max. average power Pa	250 W	65 W
Max. peak power Pp	2.5 kW	-
Wavelength λ	1064 nm	808 nm
Pulse repetition rate Rp	1 - 500 Hz	CW
Pulse duration τ	0.08 - 1.2 ms	CW

type. These laser beams were collimated and focused by lenses of 80 mm in the focal length. The welding experiment was carried out by controlling a scanning velocity of stage at the focusing point with N₂ shielding gas of flow rate 57 l/min. The aluminum alloy A3003 of 0.5 mm thickness was used as a specimen

Table 2. Physical properties of aluminum A3003

Specific heat	900 J/(kg·K)
Thermal conductivity	237 W/(m·K)
Density	2.73 g/cm ³
Poisson's ratio	0.33
Young's modulus	70 kN/mm ²
Coefficient of thermal expansion	$2.4 \times 10^{-6}/K$

except for welding experiments of battery case, and its physical properties are shown in Table 2.

The irradiation waveforms of Nd:YAG laser pulse and continuous LD are shown in Figure 3. The power of pulsed Nd:YAG laser can be controlled every 0.2 ms. In general, the sharp heating up and cooling down might lead to the welding defects such as blow holes and cracks. Therefore, the main pulse of Nd:YAG laser for the processing was controlled with a gradual increment and decrement of laser power during the pulse duration 1.2 ms. In the case of superposition of two laser beams, the irradiation of continuous LD started before the main Nd:YAG pulse as shown in Figure 3.

Effect of superposed continuous diode laser on welding results

Figure 4 shows the surfaces and cross sections of weld bead for aluminum alloy A3003 of 0.5 mm thickness with and without the superposition of continuous LD under the same peak power of Nd:YAG laser. Although the power of continuous LD is approximately 1.2 % against the peak power of pulsed Nd:YAG laser, the superposition of continuous LD made it possible to increase the bead width by 15 % and the weld depth by 150 % compared with welding results without continuous LD. It means that the energy of pulsed Nd:YAG laser could be absorbed effectively to the aluminum alloy by superposition of con-

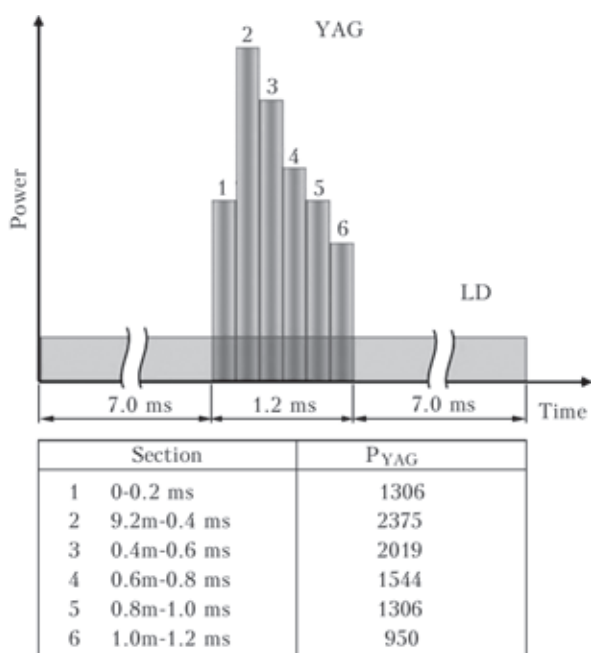


Figure 3. Irradiation waveform of pulsed Nd:YAG laser and continuous LD

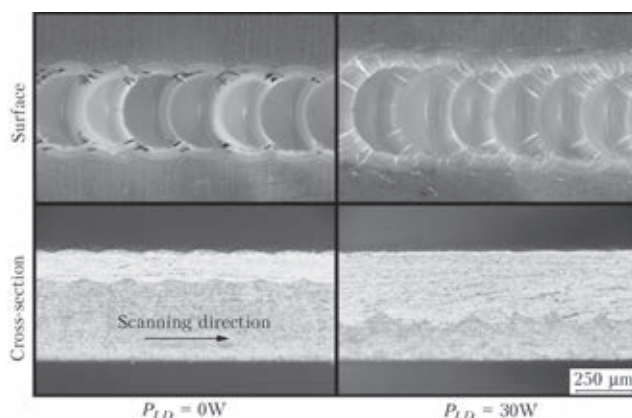


Figure 4. Surface and cross section of weld bead in bead-on-plate irradiation at scanning velocity $v = 30$ mm/s, pulse duration of Nd:YAG laser $\tau = 1.2$ ms, pulse repetition rate of Nd:YAG laser $R_p = 120$ Hz, peak power of Nd:YAG laser $P_{YAG} = 2375$ W and average power of LD $P_{LD} = 30$ W

tinuous LD. In general, the absorption rate increases with increasing the temperature of material. Thus, it is considered that the continuous LD could become the surface temperature higher compared with the case without continuous LD [5], hence the high efficient absorption of laser energy made it possible to increase the penetration depth and bead width.

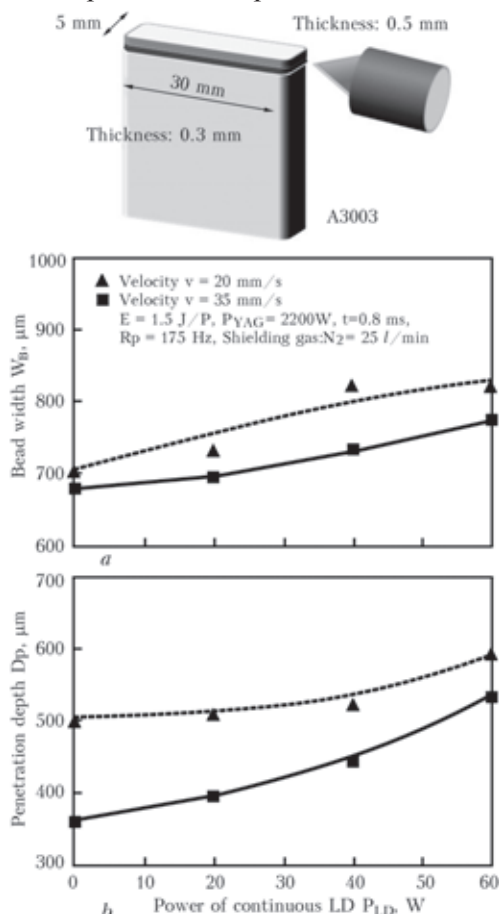


Figure 5. Change of bead width and penetration depth for power of continuous diode laser at scanning velocity $v = 20$ and 35 mm/s, pulse duration of Nd:YAG laser $\tau_p = 1.2$ ms, pulse repetition rate of Nd:YAG laser $R_p = 120$ Hz, peak power of Nd:YAG laser $P_{YAG} = 2375$ W

Figure 5 shows the variations of bead width and penetration depth at scanning speed 20 mm/s and 35 mm/s in welding experiments of aluminum alloy battery case. The size of battery case is 30 mm-width $\times$ 5 mm-length $\times$ 0.3 mm-thickness. The top cover plate of 0.5 mm thickness was fitted and pressed into the inside of battery case. The bead width and penetration depth increased with increasing the continuous LD power at both scanning speeds. The penetration depth without continuous LD at scanning velocity 20 mm/s is approximately 500 μm , and the equivalent penetration depth could be obtained even at higher scanning velocity 35 mm/s by the superposition of continuous LD 50 W. When the average power of continuous LD is 60 W, the penetration depth was approximately 1.5 times larger than that without continuous LD. The bead width at scanning velocity 35 mm/s with continuous LD was also higher than that at scanning velocity 20 mm/s without continuous LD. Moreover, good quality weld beads could be obtained as shown in Figure 3.

It is confirmed that the effect of continuous LD on the penetration depth was remarkable at the faster processing speed. The high throughput and quality micro-welding by using pulsed Nd:YAG laser could be expected by superposition of continuous LD.

Effect of pre-Nd:YAG laser pulse on penetration depth at the beginning of scanning

In order to achieve the high absorption of Nd:YAG laser even at the beginning of laser scanning, pre-heating Nd:YAG laser pulse was investigated in the bead-on-plate experiment as shown in Figure 6. It was expected to keep the high surface temperature before the irradiation of main Nd:YAG laser pulse with the irradiation of continuous LD. As shown in Figure 6 (a), firstly, a continuous LD was irradiated on the specimen surface. Secondly, the pre-Nd:YAG laser pulse was irradiated as a rectangular pulse waveform to increase the surface temperature at the beginning of laser scanning. After the pre-Nd:YAG laser pulse, the main Nd:YAG laser pulses were irradiated.

Since the surface condition has greatly influence on the absorption state, the peak power of pre-Nd:YAG laser pulse on the surface condition was investigated. Figure 6 (b) shows microphotographs of irradiated surface for various peak powers by the single laser shot. For more than peak power 500 W, the specimen surface was molten and became glossy, and the glossiness of specimen surface might reflect a main Nd:YAG laser pulse. On the other hand, the specimen surface was not glossy in the case of peak power 400 W, even the surface temperature increased. Therefore, the peak power 400 W was used for the pre-Nd:YAG laser pulse at pulse width 1.2 ms for 300 μm spot diameter.

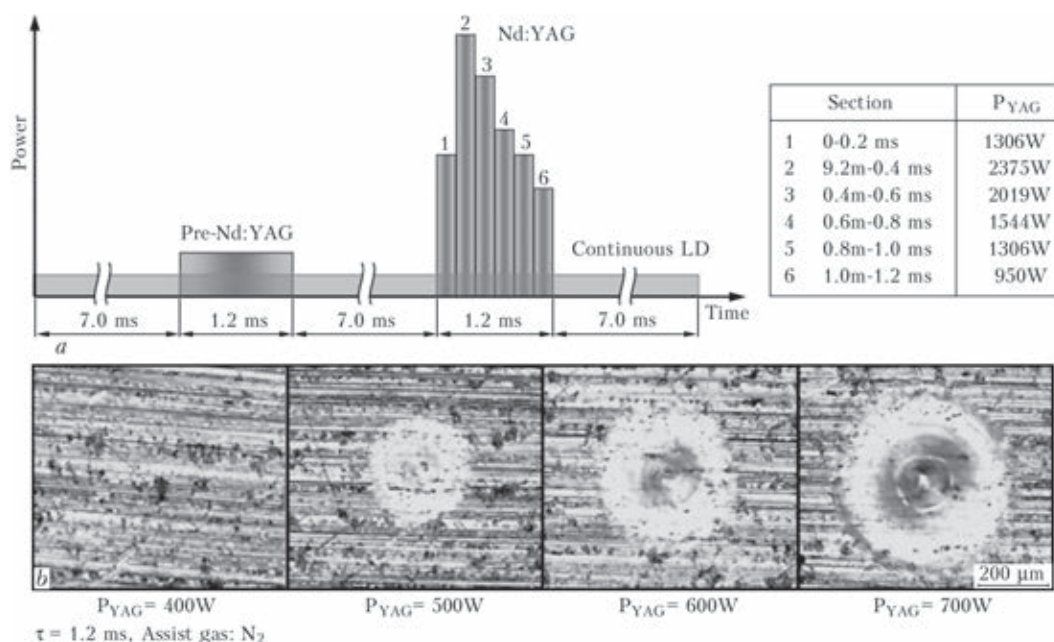


Figure 6. Irradiation waveform and irradiated surface state at pulse duration of Nd:YAG laser $\tau = 1.2$ ms without continuous LD in pre-heating method: (a) Irradiation waveform of pre-heating and main Nd:YAG laser pulse; (b) Irradiated surface for various peak powers of pre-heating pulse by single shot

Figure 7 shows the surfaces and cross sections of weld bead at the beginning of laser scanning. Here, the power density of pulsed Nd:YAG laser was set in the transitional region between heat conduction weld-

ing and key-hole welding. In the case of only main Nd:YAG laser pulse without the pre-Nd:YAG laser pulse, the penetration depth gradually increased in the scanning direction regardless of superposition of continuous LD (B, D). The penetration depth was unstable in the case of pre-Nd:YAG laser pulse without the superposition of continuous LD (A). It is considered that the absorption rate of pulsed Nd:YAG laser was unstable at low specimen surface temperature, since the power density is the transition condition between the heat conduction welding and the key-hole welding. On the other hand, in the case of pre-Nd:YAG laser pulse with the superposition of continuous LD (C), it was obvious that the penetration depth became larger from the beginning of laser scanning by stable higher absorption of laser energy. Moreover, the stable welding process could be performed with steady bead width and penetration depth. It indicated that not only the use of pre-Nd:YAG laser pulse but also the combination of pre-Nd:YAG laser pulse and the superposition of continuous LD made it possible to increase the molten volume at the beginning of laser scanning.

The temperature change of specimen surface was investigated by the numerical calculation in order to discuss the welding phenomenon with and without the pre-heating pulse. The general finite element program 'ANSYS Rev.11.0', in which the unsteady calculation is possible, was used for the numerical analysis by using the analytical model as shown in Figure 8 (a). In the case of superposition of continuous LD, the key-hole effect was assumed. Internal heat generation by the heating element of shape mixed column and hemisphere was considered as a

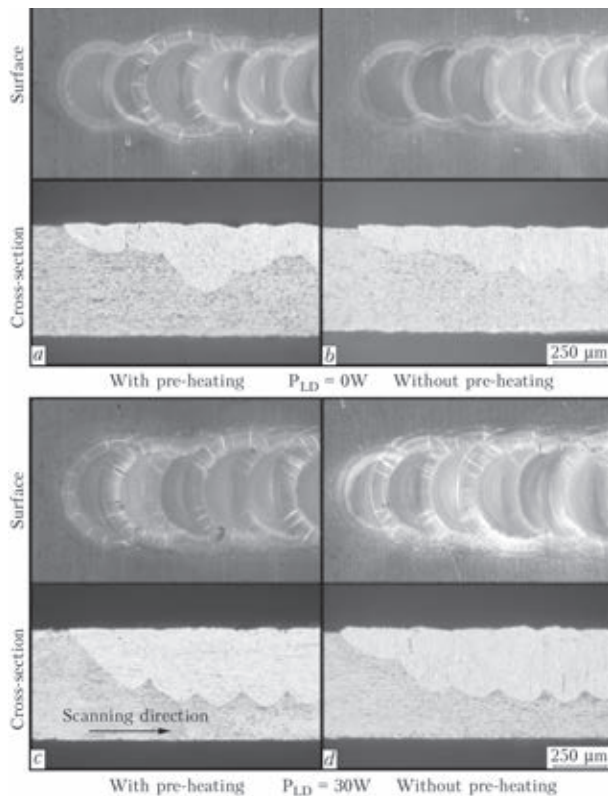


Figure 7. Welding results at the beginning of laser scanning with and without pre-Nd:YAG laser pulse at scanning velocity $v = 30$ mm/s, pulse duration of Nd:YAG laser $\tau = 1.2$ ms, pulse repetition rate of Nd:YAG laser $R_p = 120$ Hz, peak power of Nd:YAG laser $P_{YAG} = 2375$ W, peak power of pre-Nd:YAG laser pulse $P_{pre} = 400$ W and average power of LD $P_{LD} = 0, 30$ W. (a) $P_{LD} = 0$ W; (b) $P_{LD} = 30$ W



heat source as shown in Figure 8 (b). The total power of a pulsed Nd:YAG laser and a continuous LD was irradiated as an internal heat generation. A continuous LD was irradiated on the specimen surface except for pulsed Nd:YAG laser shot. The absorption rate of pulsed Nd:YAG laser was defined as 15 % for a heat flux and 30 % for an internal heat generation, and 30 W continuous LD was given by temperature dependent absorption rate, which were determined by the former investigation [5, 6]. The pulse waveform of main Nd:YAG laser was the same as shown Figure 6 (a). Pre-Nd:YAG laser pulse and a main Nd:YAG laser pulse without the superposition of continuous LD were given as a heat flux of absorption rate 15 % as shown in Figure 8 (c). A pulse of Nd:YAG laser of 300 μm spot diameter was irradiated at the pulse repetition rate 120 Hz and the scanning speed 30 mm/s. The convective heat transfer condition of air was considered after the set time of laser irradiation. Except

for the laser beam irradiated area, the convective heat transfer condition of air was also considered. The pure aluminum thermo physical properties of specimen were used for this analysis. Coefficient of heat transfer and the initial temperature were 35 W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$) and 296 K, respectively.

Figure 8 (d) shows the calculated surface temperature of spot center before the irradiation of main Nd:YAG laser pulse. In the case of only Nd:YAG laser pulse, the surface temperature was the same as an initial temperature before the first main Nd:YAG laser pulse, since there was no energy input. Only continuous LD irradiation increased the surface temperature by 40 K. By using both pre-heating pulse and continuous LD, the surface temperature increased approximately 200 K higher than that of main Nd:YAG laser pulse without pre-heating pulse. The absorption rate of Nd:YAG laser to aluminum alloy increases drastically more than 900 K, melting point of aluminum

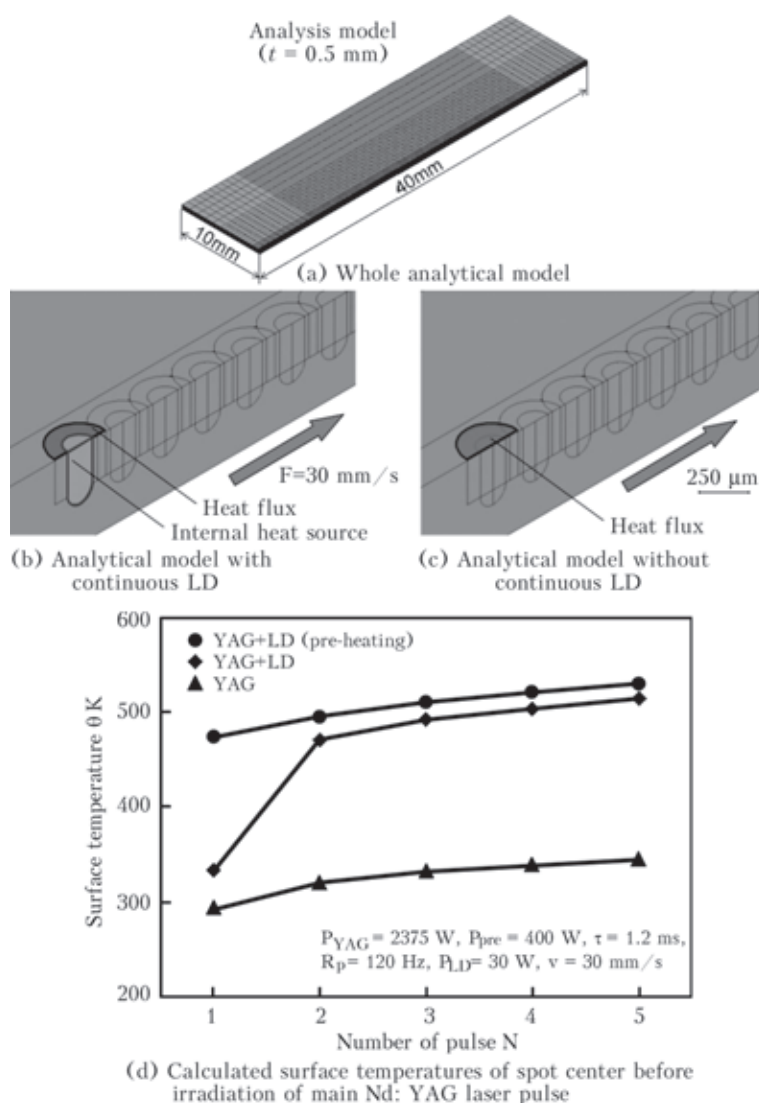


Figure 8. Analytical model and calculated surface temperatures of spot center before irradiation of main Nd:YAG laser pulse with and without pre-Nd:YAG laser pulse at scanning velocity $v = 30 \text{ mm/s}$, pulse duration of Nd:YAG laser $\tau = 1.2 \text{ ms}$, pulse repetition rate of Nd:YAG laser $R_p = 120 \text{ Hz}$, peak power of Nd:YAG laser $P_{YAG} = 2375 \text{ W}$, peak power of pre-Nd:YAG laser pulse $P_{pre} = 400 \text{ W}$ and average power of LD $P_{LD} = 0, 30 \text{ W}$



alloy. Without pre-heating pulse and continuous LD, a pulsed Nd:YAG laser was irradiated on the specimen surface at low temperature firstly, which led to the unstable absorption of a pulsed Nd:YAG laser beam. On the other hand, it is easy to reach the melting point in the case with pre-heating pulse and continuous LD compared with the case of only Nd:YAG laser irradiation. Therefore, it was considered that the energy of pulsed Nd:YAG laser could be absorbed effectively and stably to the specimen surface because of its higher surface temperature even at the beginning of laser scanning with pre-heating pulse and continuous LD.

Conclusions

The effects of superposed continuous LD on micro-welding of aluminum alloy by a pulsed Nd:YAG laser were investigated, and the pre-pulse method was also discussed in order to improve the penetration depth even at the beginning of laser scanning by pre-heating Nd:YAG laser pulse. Main conclusions obtained in this study are as follows.

(1) The energy of pulsed Nd:YAG laser could be absorbed to the aluminum alloy effectively, since the surface temperature of specimen was kept higher by the superposition of continuous LD during the interval time of Nd:YAG laser pulse.

(2) The high-efficiency and high-quality welding for aluminum battery case could be performed by the superposition of pulsed Nd:YAG laser and continuous

diode laser. 15 % increase in bead width and 150 % increase in penetration depth were obtained by the superposition of continuous LD.

(3) A pulsed Nd:YAG laser was absorbed effectively from the beginning of laser scanning by pre-heating Nd:YAG laser pulse with the superposition of continuous LD due to the high surface temperature of specimen. The combination of pre-heating Nd:YAG laser pulse and continuous LD made it possible to perform the stable welding state from the beginning of laser scanning by stable absorption of pulsed Nd:YAG laser.

1. Zhang, J., Weckman, D.C., Zhou, Y. (2008) Effects of temporal pulse shaping on cracking susceptibility of 6061-T6 aluminum Nd:YAG laser welds. *Welding J.*, **87**, 18–30.
2. (2001) *Chronological Scientific Tables 2001*. Maruzen: National Astronomical Observatory Institute, 523.
3. Abe, N. (2003) Trend of direct materials processing with high power diode lasers. *The Review of Laser Engineering*, **31**(5), 318–325.
4. Sakurai, T., Nakagawa, Y. (2004) Development of LD + YAG hybrid laser. In: *Proc. of 62nd Laser Materials Processing Conf.*, 102–110.
5. Sakagawa, T., Okamoto, Y., Uno, Y. et al. (2009) High-efficiency welding of aluminum alloy by hybrid system combined pulsed Nd:YAG laser and diode laser. In: *Proc. of 26th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 1008–1014.
6. Haraguchi, S., Okamoto, Y., Uno, Y. et al. (2010) Investigation on welding phenomenon for aluminum alloy by superposition of pulsed YAG laser and diode laser. *J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **4**(5), 875–882.

Received 01.03.2013



MECHANICAL BEHAVIOR AND FAILURE OF SANDWICH STRUCTURES

E. GDOUTOS

School of Engineering, Democritus University of Thrace, GR-671 00 Xanthi, Greece. E-mail: egdoutos@civil.duth.gr

The failure behavior of composite sandwich beams under three- and four-point bending was studied. The beams were made of unidirectional carbon/epoxy facings and various core materials including PVC closed-cell foams, a polyurethane foam and an aluminum honeycomb. Various failure modes including facing wrinkling, indentation failure and core failure were observed and compared with analytical predictions. It was established that the initiation, propagation and interaction of failure modes depend on the type of loading, constituent material properties and geometrical dimensions. 11 Ref., 2 Tabs, 4 Figures.

Key words: investigation of failure behavior, three-point bending, sandwich beams, carbon-epoxy facing, various core materials, strength-to-weight ratio

1. Introduction

Sandwich structures consisting of strong and stiff facings and light weight cores offer improved stiffness and strength to weight ratios compared to monolithic materials. Under flexural loading the facings carry almost all of the bending, while the core takes the shear loading and helps to stabilize the facings. Facing materials include metals and fiber reinforced composites. The latter are being used in advanced applications due to the large strength-to-weight ratio. The core materials mainly include honeycombs, foams and wood.

Possible failure modes of sandwich structures include tensile or compressive failure of the facings, debonding at the core/facing interface, indentation failure under concentrated loads, shear core failure, wrinkling of the compression face and global buckling. Recently, the authors have performed a thorough investigation of the failure behavior of sandwich beams with facings made of carbon/epoxy composite material and core made of foam materials [1-6].

In the present work, failure modes were investigated experimentally in sandwich beams under four-point and three-point bending. Failure modes observed and studied include core failure, face sheet wrinkling and indentation failure.

2. Materials and Specimens

The sandwich beams were fabricated from 8-ply unidirectional carbon/epoxy (AS4/3501-6) facings and various core materials. The facings were bonded to the core with an epoxy adhesive (Hysol EA 9430). The assembly was cured at room temperature. The facings and core had a thickness of 1 and 25.4 mm, respectively. Beam specimens 25.4 mm wide and of various lengths were cut from the sandwich plates. Tables 1 and 2 give some characteristic properties of the sandwich constituent materials.

3. Experimental Procedure

Special test fixtures were fabricated to provide three- and four-point bending for beams of various lengths. Five span lengths of 10.2, 20.3, 25.4, 40.6

Table 1. Properties of balsa wood, aluminum and foam-filled honeycomb, and polyurethane materials

Property	Balsa Wood CK57	Aluminum Honeycomb PAMG 5052	Foam Filled Honeycomb Style 20	Polyurethane FR-3708
Density, ρ kg/m ³ (lb/ft ³)	150 (9.4)	130 (8.1)	128.3 (8)	128.3 (8)
In-plane long. comp. elast. mod., E_{1c} MPa (ksi)	129.5 (18.8)	9.5 (1.38)	24.1 (3.5)	38.5 (5.6)
In-plane long. tens. elast. mod., E_{1t} MPa (ksi)	93.6 (13.6)	4.5 (0.65)	1.3 (0.19)	416.6 (60.4)
In-plane trans. comp. elast. mod., E_{2c} MPa (ksi)	129.5 (18.7)	6 (0.87)	7.6 (1.1)	38.5 (5.6)
Out of plane comp. elast. mod., E_{3c} MPa (ksi)	5394 (782.3)	2125 (308)	269.1 (39)	108.7 (15.8)
Transverse shear elast. mod., G_{13} MPa (ksi)	58.7 (8.5)	579 (84)	8.5 (1.23)	10.3 (1.49)
In-plane long. comp. strength, F_{1c} MPa (ksi)	0.78 (0.11)	0.2 (0.03)	0.4 (0.06)	1.15 (0.17)
In-plane long. tensile strength, F_{1t} MPa (ksi)	1.13 (0.16)	1.63 (0.24)	0.48 (0.07)	1.1 (0.16)
In-plane trans. comp. strength, F_{2c} MPa (ksi)	0.78 (0.11)	0.17 (0.03)	0.32 (0.05)	1.15 (0.17)
Out of plane comp. strength, F_{3c} MPa (ksi)	9.6 (1.39)	11.8 (1.7)	1.35 (0.2)	1.74 (0.25)
Transverse shear strength, F_{13} MPa (ksi)	3.75 (0.54)	3.45 (0.5)	0.75 (0.11)	1.4 (0.2)



Table 2. Properties of carbon/epoxy facings, adhesive, and H100 and H250 PVC foams

Property	Facing	FM-73 Adhesive	Foam Core (H100)	Foam Core (H250)
Density, ρ , kg/m ³	1,620	1,180	100	250
Thickness, h , mm	1.01	0.05	25.4	25.4
Longitudinal Modulus, E_1 , MPa	147,000	1,700	120	228
Transverse Modulus, E_3 , MPa	10,350		139	403
Transverse Shear Modulus, G_{13} , MPa	7,600	110	48	117
Longitudinal Compressive Strength, F_{1c} , MPa	1,930		1.7	4.5
Transverse Compressive Strength, F_{3c} , MPa	240		1.9	6.3
Transverse Shear Strength, F_{13} , MPa	71	33	1.6	5.0

and 76.2 cm were tested. In studying the effects of pure bending, special reinforcement was provided for the core at the outer sections of the beam to prevent premature core failures. Also, under three-point bending, the faces directly under concentrated loads were reinforced with additional layers of carbon/epoxy to suppress and prevent indentation failure. Only in the case when the indentation failure mode was studied, there was no face reinforcement. The concentrated load was applied to the specimens with a cylinder of diameter of 25.4 mm (1 in.).

Strains on the outer and inner (interface between facing and core) surfaces of the facings were recorded with strain gages. Most gages were oriented along the axis of the beam, but some were mounted in the transverse direction to record transverse strains. Beam deflections were measured with a displacement transducer (LVDT) and by monitoring the crosshead motion. The deflection was also monitored with a course moiré grating (31 lines/cm). Longitudinal and transverse strains in the core were measured with finer moiré gratings of 118 and 200 lines/cm. The deformation of the core was also monitored with birefringent coatings using reflection photoelasticity.

4. Failure Modes

A number of failure modes were recorded and studied in the composite sandwich beams subjected to three- and four-point bending. They include wrinkling of the compression facing, core failure and indentation of the loaded face. These failure modes are discussed in the following sections.

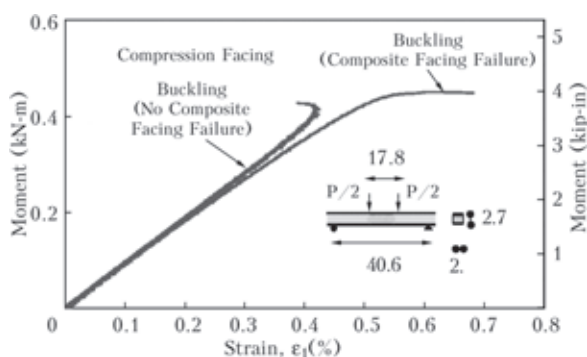


Figure 1. Facing wrinkling in sandwich beam under four-point bending (Divinycell H100 foam core; dimensions are in cm)

4.1. Compression Facing Wrinkling

Compression facing wrinkling failures were observed in sandwich beams under both four-point and three-point bending. Fig. 1 shows moment versus strain results for two different tests of sandwich beams with Divinycell H100 cores under four-point bending. Evidence of wrinkling is shown by the sharp change in recorded strain on the compression facing, indicating inward and outward wrinkling in the two tests. In both cases the critical wrinkling stress was $\sigma_{cr} = 673$ MPa.

Wrinkling is a localized short-wave buckling of the compression facing. Wrinkling may be viewed as buckling of the compression facing supported by an elastic continuum, the core. The critical wrinkling stress according to Heath [7] is given by

$$\sigma_{cr} = \left[\frac{2}{3} \frac{h_f}{h_c} \frac{E_{c3} E_{f1}}{(1 - \nu_{12} \nu_{21})} \right]^{1/2} \quad (1)$$

where h_f, h_c : facing and core thicknesses, respectively; E_{f1}, E_{c3} : facing and core moduli, respectively; ν_{ij} : Poisson's ratio associated with loading in the i -direction and strain in the j -direction and the indices 1 and 3 refer to the in-plane and through-the-thickness directions, respectively.

Equation (1) predicts the following value of the wrinkling stress

$$\sigma_{cr} = 687 \text{ MPa.}$$

This value is close to the experimental value of 673 MPa.

In the case when shear is present in addition to bending, the influence of the transverse shear modulus of the core, G_{c13} , must be taken into account. An expression given by Hoff and Mautner [8] has the form

$$\sigma_{cr} = c (E_{f1} E_{c3} G_{c13})^{1/3} \quad (2)$$

where c is a constant usually taken as equal to 0.5, 0.6, or 0.65. Note that the critical stress in this expression depends only on the elastic moduli of the facing and core materials. In the relation above the core moduli are the initial elastic moduli if wrinkling occurs



while the core is still in the linear elastic range. This requires that the shear force at the time of wrinkling be low enough or, at least,

$$V < A_c F_{cs} \quad (3)$$

where A_c is core cross sectional area and F_{cs} the shear strength of the core. This is the case for long span beams under three-point bending.

4.2. Core Failure

Core failures were observed in sandwich beams under three-point bending. The core carries primarily the applied shear loading. In short beams under three-point bending the core is mainly subjected to shear and failure occurs when the maximum shear stress reaches the critical value (shear strength) of the core material. In long-span beams the normal stresses in the core become of the same order of magnitude or even higher than the shear stresses. In this case, the core is subjected to a biaxial state of stress and fails according to an appropriate failure criterion. It was shown that failure of the core materials can be described by the Tsai-Wu failure criterion [9]. For a beam loaded under combined bending and shear, the foam is subjected to longitudinal normal stress, σ_1 , and in-plane shear stress, τ_5 (τ_{13}). The Tsai-Wu criterion for this case takes the form

$$f_1 \sigma_1 + f_{11} \sigma_1^2 = 1 - k^2 \quad (4)$$

where

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}}, f_{11} = \frac{1}{F_{1t} F_{1c}}, f_{55} = \frac{1}{F_5^2}, k = \frac{\tau_5}{F_5}$$

F_{1t} , F_{1c} = tensile and compressive strengths in the in-plane (1, 2) direction. F_5 = shear strength on the 1-3 plane.

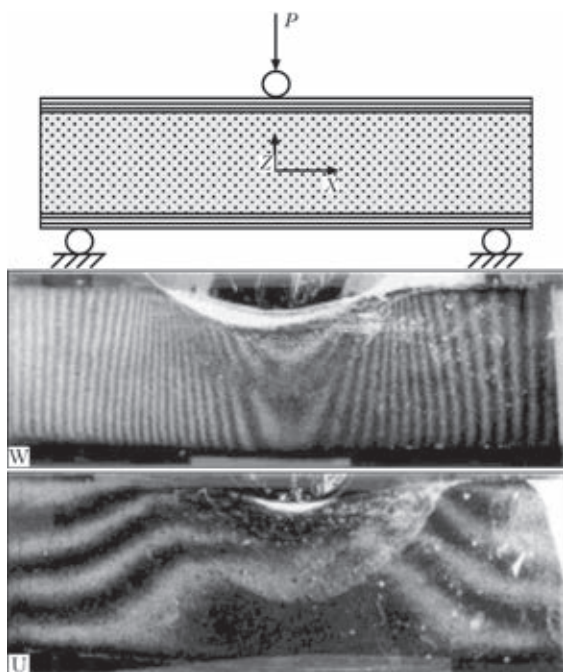


Figure 2. Moiré fringe patterns corresponding to horizontal and vertical displacements in sandwich beam under three-point bending (12 lines/mm; Divinycell H250 core)

In the above equations σ_1 , σ_3 and τ_5 are the normal and shear stresses referred to the principal material directions (in-plane is direction 1 and through-the-thickness is direction 3), F_{1c} and F_{1t} are the compressive and tensile strengths along the in-plane direction, F_{3c} and F_{3t} are the compressive and tensile strengths along the through-the-thickness direction and F_5 ($= F_{13}$) is the shear strength on the 1-3 plane.

The state of deformation and failure mechanisms in the core were studied by means of moiré method. Fig. 2 shows moiré fringe patterns in the core of a sandwich beam with Divinycell H250 core under three-point bending. The moiré fringe patterns corresponding to the horizontal and vertical displacements away from the applied load consist of nearly parallel and equidistant fringes from which it follows that the normal strains are zero, while the shear strain is nearly constant across the core thickness. This is valid only in the linear range.

4.3. Indentation Failure

Indentation failure was observed in beams under three-point bending when no special reinforcement of the facing or the core was provided in the area under the load. Fig. 3 shows the variation of the applied load with the displacement of the indenting roller for a 36 cm long beam under three-point bending. The displacement represents the sum of the global beam deflection and the local indentation, but it is more sensitive to the local indentation. Therefore, the proportional limit of the load-displacement curve is a good indication of initiation of indentation. In the present case the beam was made with a Divinycell H100 core. The load at initiation of indentation is 735 N. The peak load measured was $P_{max} = 1080$ N.

The indentation failure of the sandwich beam can be predicted by treating the loaded face as a beam resting on a foundation. For linear elastic behavior, the core is modeled as continuous distributed linear tension/compression springs. The stress σ at the interface between core and facing is proportional to the

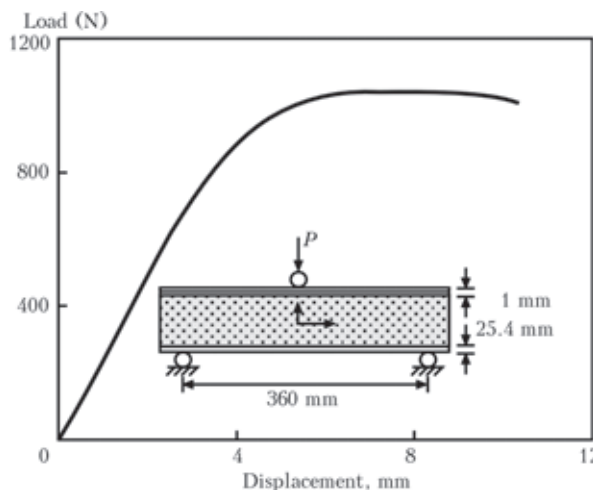


Figure 3. Load versus deflection under load of sandwich beam under three-point bending (carbon/epoxy facings, Divinycell H100 core)



local deflection, w

$$\sigma = kw \quad (5)$$

where k is the foundation modulus given by [10]

$$k = 0.64 \frac{E_c}{h_f} \sqrt[3]{\frac{E_c}{E_{f1}}} \quad (6)$$

For a long (assumed infinite) facing the deflection w_P under the load P is [10]

$$w_P = \frac{P\lambda}{2kb} \quad (7)$$

where

$$\lambda = \frac{1.18}{h_f} \sqrt[3]{\frac{E_c}{E_{f1}}} \quad (8)$$

and b is the width of the facing.

Yield of the core under the load occurs when the interfacial stress σ reaches the yield stress of the foam core. The critical load at initiation of core yield is calculated from Eqs. (5) to (8) and the yield condition as

$$P_{cy} = 1.70 \sigma_{ys} b h_f \sqrt[3]{\frac{E_{f1}}{E_c}} \quad (9)$$

where σ_{ys} is the yield stress of the core.

As the load increases beyond the yield value, plastic deformation propagates through the core from the center to the ends of the facing. For a rigid-perfectly plastic foundation the local bending stress at the upper surface of the facing is given by [11]

$$\sigma_{fl} = \frac{9P^2}{16b^2 h_f^2 \sigma_{ys}} \quad (10)$$

For a beam in three-point bending the global stress in the facing is

$$\sigma_{fb} = \frac{PL}{4b h_f (h_f + h_c)} \quad (11)$$

where h_c is the thickness of the facing.

Indentation failure occurs when the sum of the local and global bending stresses, σ_{fl} and σ_{fb} , reaches the compressive strength of the facing material. The load at initiation of indentation in Fig. 3 is 735 N and agrees with the calculated value of 800 N from Eq. (9). The peak load measured is $P_{max} = 1080$, while the calculated value is $P_{max} = 1310$ N. The difference in the results may be attributed in the simplifying assumption of a rigid-perfectly plastic foundation.

5. Failure Mode Transition

From the above discussion it is obvious that initiation of a particular failure mode depends on the geometrical characteristics, the material properties and the loading conditions of the beam. In the case of beams under three-point bending when reinforcement of the facings or the core is provided to suppress indentation failure, the prevalent failure modes are facing wrinkling and core failure. For short spans, core failure occurs first and then it triggers facing

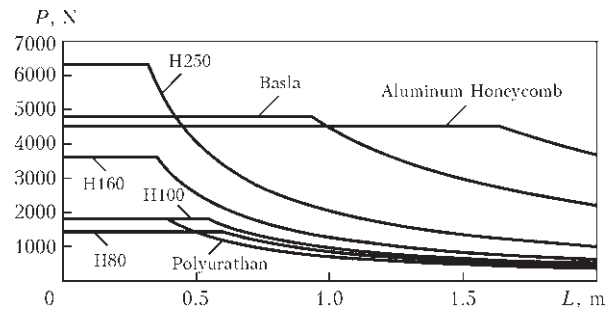


Figure 4. Critical load versus span length for failure initiation in sandwich beams under three-point bending. Horizontal lines indicate core shear failure and curved lines indicate failure by compressive facing wrinkling

wrinkling. For long spans, facing wrinkling can occur before any core failure. Thus, a curve for the critical load for core failure initiation versus span length is obtained. On the other hand, the critical load for facing wrinkling as a function of span length can be predicted from Eq. (2). Fig. 4 shows curves of the critical load versus span length for initiation of failure by core failure and facing wrinkling for a sandwich beam with various core materials.

The intersection of the curves defines the transition from core failure initiation to facing wrinkling initiation. Note that for core materials H250, balsa wood and aluminum honeycomb with increased through-the-thickness Young's modulus the compressive facing wrinkling failure curve is displaced, according to Eq. (2) to the right, and therefore, the critical length for failure mode transition from core failure to wrinkling increases. Thus, as the through-the-thickness Young's modulus of the foam increases, the critical length of the beam for failure mode transition from core failure to wrinkling, also increases.

6. Conclusions

Failure modes of composite sandwich beams depend on the type of loading, constituent material properties and geometrical dimensions. For sandwich beams made of unidirectional carbon/epoxy facings and PVC closed-cell foam cores failure modes observed and studied include core failure, compressive facing wrinkling and indentation failure. Experimental results were compared with theoretical predictions whenever they were available.

Following initiation, interaction of failure modes takes place leading to catastrophic fracture. Thus, failure initiation by plastic deformation of the core degrades the supporting role of the core and precipitates other failure modes, such as facing wrinkling.

When core failure and stiffness degradation occur first, the critical wrinkling stress is substantially reduced. Thus, catastrophic failure of a sandwich beam appears to be the result of initiation propagation and interaction of failure modes, as influenced by type of loading, constituent material properties and geometrical dimensions.



1. Daniel, I. M., Gdoutos, E. E., Wang, K.-A. et al. (2002) Failure modes of composite sandwich beams. *Int. J. Damage Mech*, **11**, 309–334.
2. Gdoutos, E. E., Daniel, I. M., Wang, K.-A. (2002) Indentation failure in composite sandwich structures. *Exp Mech*, **42**, 426–431.
3. Daniel, I. M., Gdoutos, E. E., Wang, K.-A. (2002) Failure of composite sandwich beams. *Adv. Com. Letters*, **11**, 49–57.
4. Abot, J. L., Daniel, I. M., Gdoutos, E. E. (2002) Contact law for composite sandwich beams. *Sandwich Struct. & Mater.* **4**, 157–173.
5. Gdoutos, E. E., Daniel, I. M., Wang, K.-A. (2003) Compression facing wrinkling of composite sandwich structures. *Mech. Mater.*, **35**, 511–522.
6. Gdoutos, E. E., Daniel, I. M., Wang, K.-A. (2000) Failure of cellular foams under multiaxial loading. *Comps. Part A*, **33**, 163–176.
7. Heath, W. G. (1969) Sandwich construction. Pt 2: The optimum design of flat sandwich panels. *Aircraft Engng*, **32**, 230–235.
8. Hoff, N. J., Mautner, S. E. (1945) The buckling of sandwich-type panels. *J. Aerosp. Sci.*, **12**, 285–297.
9. Tsai, S. W., Wu, E. M. (1971) A general theory of strength for anisotropic materials. *J. Comp. Mat.*, **5**, 58–80.
10. Hetenyi, M. (1946) *Beams on Elastic Foundation*. The University of Michigan Press.
11. Soden, P. D. (1996) Indentation of composite sandwich beams. *J. Strain Anal.*, **31**, 353–360.

Received 08.04.2013



ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛУРГИИ И ТЕХНОЛОГИИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. В. ЦВЕТКОВ, А. В. НИКОЛАЕВ, А. В. САМОХИН

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН.
РФ. 119991, Москва, Ленинский просп., 49. E-mail: tsvetkov@imet.ac.ru

Сформулирована аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и при обработке материалов, позволившая оценить перспективы их практического применения и пути оптимизации конструктивно-технологического оформления. Оборудование для шахтных печей с плазменным нагревом и процессы воздействия плазмы на металлургические расплавы имеют близкие прототипы в классической металлургии. Струйно-плазменные процессы, ориентированные на получение веществ в дисперсном состоянии, требуют создания оригинального оборудования. Авторами реализованы процессы плазменно-водородного восстановления оксидов тугоплавких металлов, плазменной восстановительной плавки оксидов группы железа, получения соединений металлов (карбиды, нитриды, оксиды и др.), позволяющие производить продукты в виде дисперсных порошков. Они отличаются возможностью энерго- и ресурсосбережения, получения продуктов с особыми эксплуатационными свойствами и совместимости с окружающей средой. Предложена концепция модульного энерготехнологического комплекса, объединяющего на базе плазменной техники производство энергии и химико-металлургическое изготовление металлов, сталей и сплавов из природного и техногенного сырья. Такой экологически чистый комплекс позволит снизить энерго- и ресурсозатраты. Библиогр. 15, рис. 10.

Ключевые слова: струйно-плазменные процессы, дисперсные порошки, плазмохимическая установка, вольфрам, энерго- и ресурсосбережение, энерготехнологический комплекс, плазменно-дуговое жидкофазное восстановление железа

Исследования физикохимии и технологии воздействия термической плазмы на вещество в различных агрегатных состояниях, направленные на разработку экологически чистых энерго- и ресурсосберегающих процессов производства материалов с особыми свойствами, в том числе наноматериалов, основаны на научной теории о воздействии высококонцентрированных источников энергии на вещество [1, 2].

В результате систематических исследований термодинамики, кинетики и механизма восстановления оксидных систем с использованием современных методов исследования топохимических реакций, положений гетерогенного катализа, теории абсолютных скоростей реакций создана теория процессов восстановления металлов в различных агрегатных состояниях, в том числе при воздействии потоков термической плазмы [3, 4].

Разработана методология исследования плазменных процессов, основанная на высокотемпературном термодинамическом анализе, математическом моделировании и экспериментальных кинетических исследованиях, с использованием специально разработанной аппаратуры [5].

В ходе струйно-плазменных процессов выявлена определяющая роль тепломассообмена для распределенного в плазменном потоке диспергированного обрабатываемого вещества и его перехода в газовую фазу, т.е. степени гомогенизации процесса [3, 5-8].

Сформулирована аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и обработке материалов, позволившая оценить перспективы их практического применения, а также пути оптимизации конструктивно-технологического оформления [7] (рис. 1). Отечественные работы в области применения плазменной техники проводились в ряде организаций, но, к сожалению, не получили существенного развития. Однако использование электродуговых плазмотронов мегаватной мощности способствует успешному применению плазмы в промышленных шахтных агрегатах (например, в плазменных вагранках в США) или в процессах плазменной переработки цинксодержащих пылей на заводе фирмы «Steel» (Швеция).

Процессы воздействия плазмы на металлургические расплавы, конструктивно оформленные в виде плазменных печей, в ряде вариантов получили достаточно широкое применение в виде рафинирующего и легирующего переплавов, плазменного подогрева металла перед непрерывной разливкой. Отечественные разработки реализованные на Челябинском металлургическом заводе, перенесены на завод во Фрайтале (бывшая ГДР), где успешно производили до 150 марок качественных сталей и сплавов. Впоследствии по лицензии завода использовались в Австрии (50-тонная плазменная печь фирмы «FEST-Alpine»). Нами разработан и внедрен на комбинате «Южуралникель» процесс плазменной восстановительной плавки



Рис. 1. Аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и при обработке материалов

оксидного сырья применительно к производству металлического кобальта (рис. 2, 3), впоследствии использованный для получения никеля.

Анализ процессов четвертого класса не является предметом рассмотрения настоящей статьи, однако следует отметить их распространение в промышленности, например процессов плазменной резки, плазменного напыления. Весьма перспективным является также плазменная обработка поверхности.

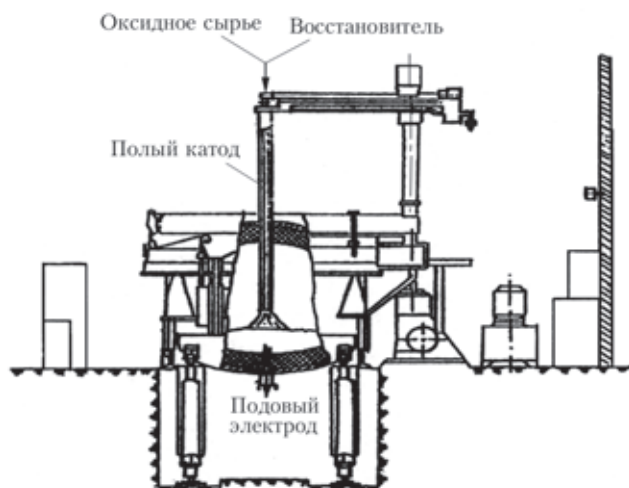


Рис. 2. Плазменная печь для восстановительной плавки оксидного сырья

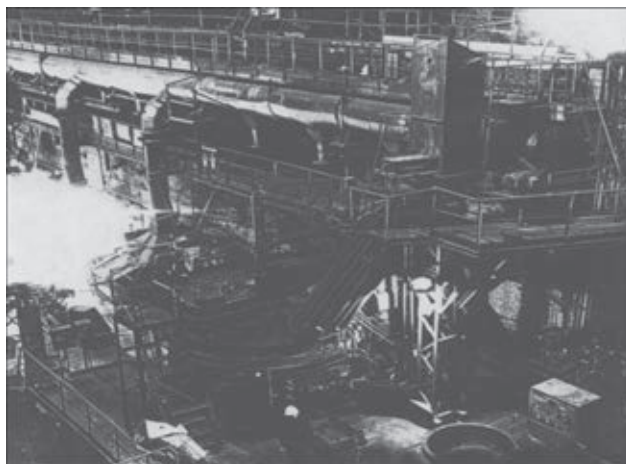


Рис. 3. Промышленная плазменная печь восстановительной плавки оксидного сырья

В отличие от процессов первых двух классов, у которых плазменное оборудование имеет аналогичные прототипы в классической металлургии, для процессов третьего класса (струйно-плазменных) требуется создание оригинального оборудования.

Как правило, струйно-плазменные процессы ориентированы на получение веществ в дисперсном состоянии. Плазменные процессы получения порошков отличаются универсальностью (рис. 4). При введении вещества в любом агрегатном состоянии в плазму, генерируемую различными источниками, которые отличаются химическим составом, мы с помощью физических и физико-химических процессов получаем сфероидизированные, плакированные порошки, а также порошки элементов и соединений различной дисперсности, в том числе наноразмерные.

Нами впервые в мировой практике реализован промышленный процесс плазменно-водородного восстановления оксида вольфрама с получением ультрадисперсного порошка вольфрама. На его основе созданы материалы с особыми эксплуатационными свойствами [9]. Продемонстрировано, что плазменные металлургические процессы, при условии рационального выбора объекта и оптимизации конструктивно-технологического оформления, являются энерго- и ресурсосберегающими в обеспечении совместимости с окружающей средой.

Для ультрадисперсных продуктов плазменного восстановления оксидов вольфрама продемонстрирован ряд практических применений, основанных на особенностях ультрадисперсного состояния (снижение температуры и энергоемкости компактирования, интенсификация процессов спекания и сварки, получение на их основе твердых сплавов повышенной твердости и износостойкости).

Разработана и запатентована конструкция плазмохимической установки для получения нанопорошков.



Рис. 4. Схема плазменной технологии производства порошков

рошков металлов и химических соединений при взаимодействии дисперсного и парообразного сырья в струе термической плазмы, генерируемой электродуговым плазмотроном (рис. 5).

Исследован ряд плазмохимических процессов получения нанодисперсных порошков металлов и соединений. Установлены термодинамические и кинетические закономерности и управляющие параметры, обеспечивающие получение порошков заданного химического и дисперсного составов. Разработаны методы управления средним размером частиц получаемых порошков при изменении энтальпии плазменной струи, расхода сырья, конструктивных особенностей реактора, а также при использовании газовой закалки продуктов плазмохимического взаимодействия. В качестве преимуществ предлагаемой технологии продемонстрированы получаемые нанопорошки (металлы, карбиды, нитриды, карбонитриды, оксиды и др.),

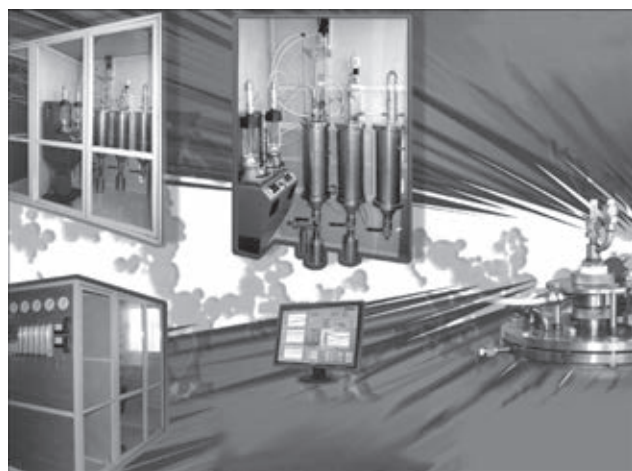


Рис. 5. Плазмохимическая установка синтеза нанопорошков

небольшая продолжительность плазменных процессов ($<0,01$ с) и высокая производительность оборудования, возможность использования традиционной сырьевой базы без предварительной подготовки, значительный диапазон производительности ($0,1 \dots n \cdot 10$ кг/ч) [10-13].

Разработаны физико-химические основы и принципы конструктивно-технологического оформления процесса получения путем синтеза в углеводородсодержащей плазме нанопорошков системы вольфрам-углерод (рис. 6), используемых для получения нанопорошков монокарбида вольфрама в качестве основы для производства наноструктурных твердых сплавов со значительно повышенными эксплуатационными свойствами

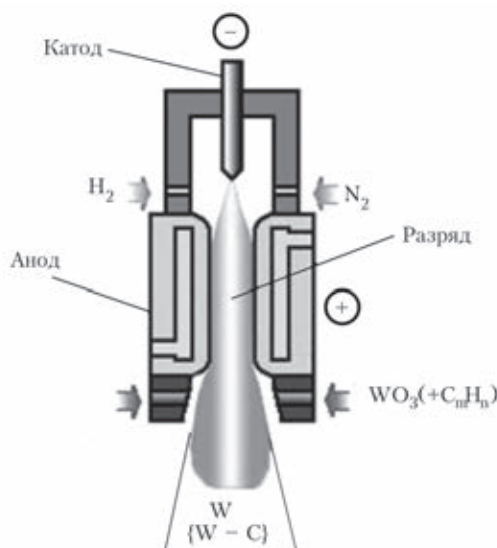


Рис. 6. Принципиальная схема получения нанопорошков вольфрама и {W-C} в струе термической плазмы дугового разряда

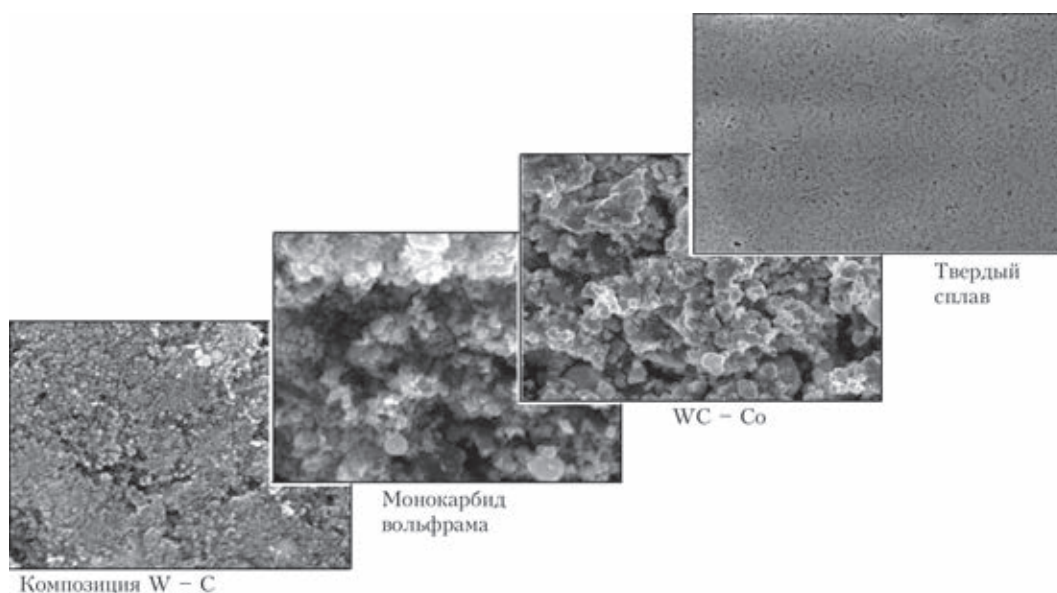


Рис. 7. Стадии получения наноструктурного твердого сплава

(рис. 7). Актуальность этой проблемы для отечественной порошковой металлургии определяется следующими факторами. В настоящее время российская промышленность потребляет около 3000 т твердых сплавов (примерно 10 % мирового потребления). Треть этого количества приобретают за рубежом, 1200 т/год производит КЗТС, 300 т — завод «Победит», 100 т — фирма «АЛГ», остальное — другие мелкие производители. Российские предприятия в настоящее время выплавляют только средне- и крупнозернистые (более 1 мкм) твердые сплавы. Задача повышения качества твердых сплавов во всем мире решается путем их наноструктурирования.

Рассмотрены и частично опробованы виды перспективного практического использования нанопорошков для создания материалов с особыми свойствами, например для модифицирования литейных сплавов, создания эффективных композитов и покрытий, в том числе наноструктурные мишени для нанесения покрытий, порошки для нанесения наноструктурных покрытий, компоненты для композиционных материалов, компоненты модификаторов литых сплавов, компоненты наноструктурных износостойких покрытий, нанопористые металлические и керамические фильтры.

В настоящее время наш коллектив предлагает к практической реализации следующие научно-технологические разработки [14, 15]:

- технологические процессы получения наноразмерных порошков элементов (вольфрам, тантал, ниобий, молибден, никель, кобальт, железо, медь) и их соединений (оксидов, карбидов, нитридов), а также композиций с заданным дисперсным, химическим и фазовым составами в термической плазме дугового электрического разряда.

Средний размер получаемых нанопорошков изменяется в диапазоне 20...100 нм;

- основы технологии создания наноструктурных твердых сплавов карбид вольфрама-кобальт с резко повышенной твердостью и износостойкостью для применения в изготовлении режущего инструмента. Предусмотрено получение твердых сплавов в диапазоне концентраций от ВК-1 до ВК-15 с введением комплексных ингибиторов роста зерна (рис. 7);

- изготовление плазмохимических установок синтеза нанопорошков металлов и соединений мощностью 30, 100, 300 кВт (производительностью 0,5...1,0; 5...10; 30...50 кг/ч) с использованием электродуговых генераторов плазмы;

- проектирование производственных участков нанопорошков на базе плазмохимических установок;

- исследования, направленные на разработку материалов для создания высокочастотных электролитических конденсаторов на основе нанопорошков тантала и ниобия, нанопорошковых модификаторов чугуна, стали и сплавов, обеспечивающих уменьшение размеров кристаллической структуры металла при массовой доле 0,05...0,1 %;

- композиционных материалов с использованием нанопорошков;

- нанопорошковых пигментов;

- наноструктурных покрытий способом плазменного напыления материалов, приготовленных с использованием нанопорошков;

- наноструктурных металлических и композиционных проводников с особыми электромагнитными свойствами;

- катализаторов топливных элементов.

Для обеспечения безопасной работы с наноструктурными объектами



Исследовали токсикологические свойства нанопорошковых материалов. Оценивали риск и возможность обеспечения безопасности производства, использования и утилизации наноматериалов. Создали базу данных по биобезопасности существующих наноматериалов. Разработали методологические подходы к гигиеническому нормированию и сертификации производств, товаров и услуг в сфере нанотехнологии.

Изучены некоторые процессы при воздействии термической плазмы на газовые среды, расплавы и растворы, в том числе применительно к процессам переработки техногенного сырья, среди которых плазменно-каталитический риформинг углеводородного сырья для получения водородсодержащих газов и окисление органических примесей в воде.

Современное производство стали, осуществляемое по аппаратурно-технологической схеме домна — конвертер (рис. 8) имеет ряд существенных недостатков, определяемых необходимостью соответствия высоким требованиям к сырью и его специальной подготовке, поскольку специфика доменного процесса требует от поступающего в домны материала высокого уровня механических свойств в сочетании с обеспечением газопроницаемости. Агломерация и коксохимическое производство, где применяют дорогой и

дефицитный коксующийся уголь, не только удорожают производство в целом, но и наносят существенный ущерб окружающей среде, который по ценностной оценке может достигать 25 себестоимости производства стали. Предлагаемые альтернативные процессы, в частности способ прямого восстановления, нашедший промышленное применение и в отечественной металлургии, по ряду причин, в том числе из-за энергетических расходов, не смог существенно потеснить традиционную технологию производства стали, в основе которой лежит доменный процесс. Представляется, что положительную роль в возможной трансформации сталеплавильного производства может сыграть применение плазменной техники как на стадии получения восстановителя и топлива для экологически чистой ТЭЦ из низкосортного органического сырья путем его газификации, так и в восстановительном агрегате.

Нами развивается концепция энерготехнологии будущего, основанная на создании по модульному принципу экологически чистого энерготехнологического комплекса, объединяющего на базе плазменной техники производство энергии и химико-металлургическое производство металлов, сплавов и соединений из природного и техногенного сырья (рис. 9). При этом прогнозируется значительное сокращение энергозатрат, по срав-

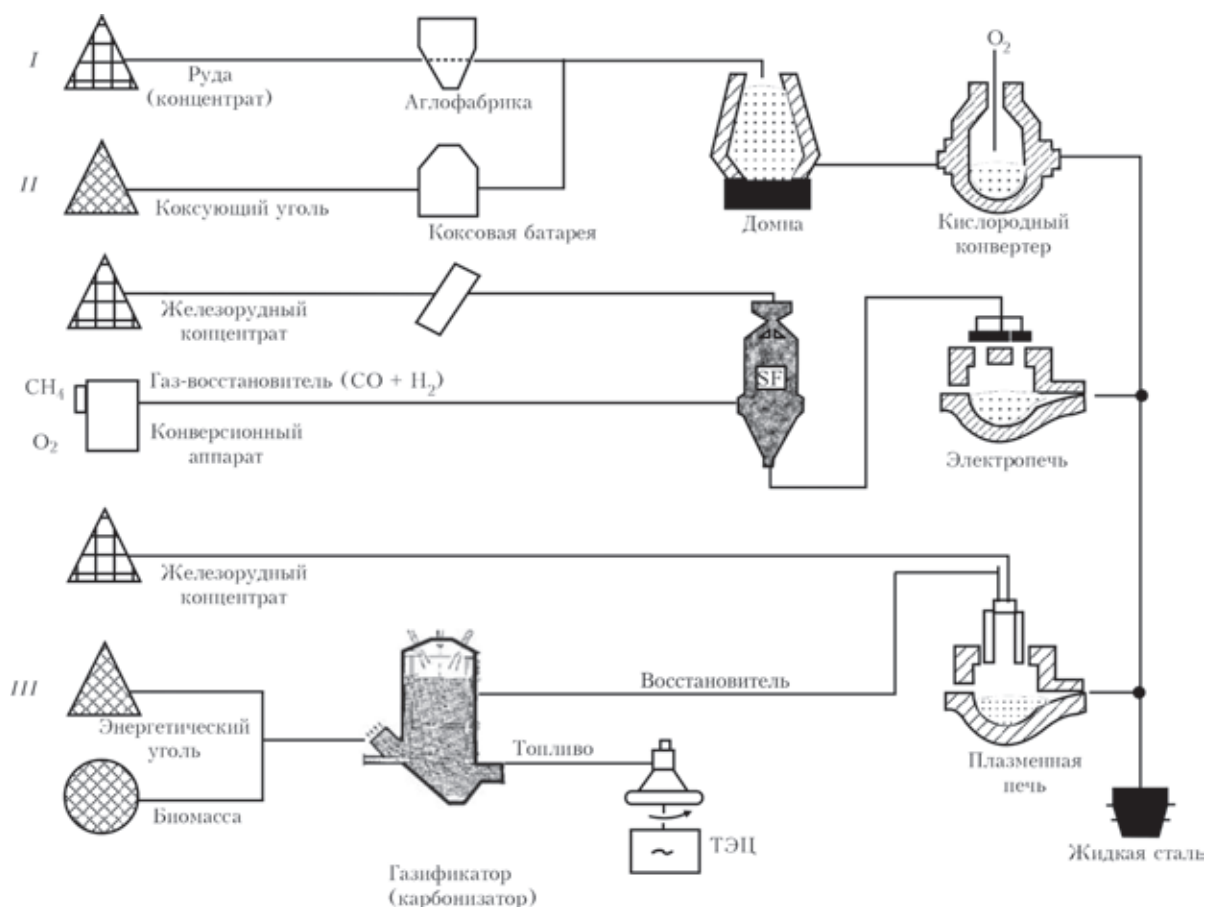


Рис. 8. Схема производства стали

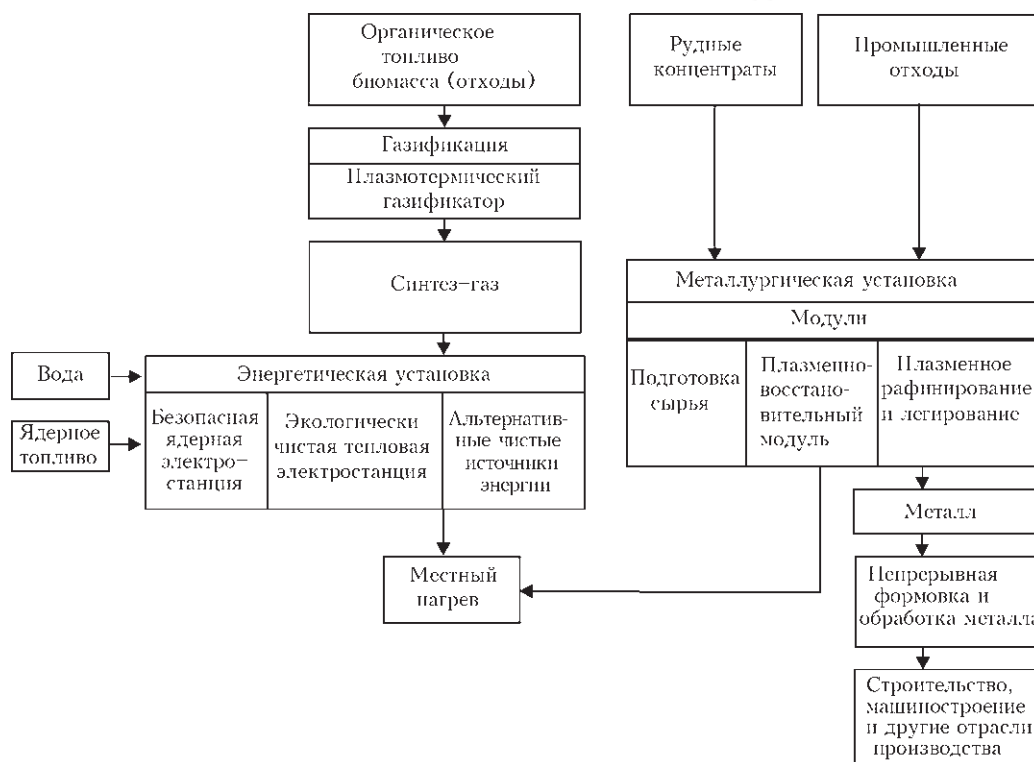


Рис. 9. Принципиальная схема энергометаллургического комплекса

нению с традиционными и альтернативными способами.

Создание плазменного энергометаллургического комплекса позволит снизить в 1,5...2,0 раза

энергоёмкость производства стали; в качестве первичного источника энергии использовать энергетический уголь и углеводородсодержащие отходы; снизить вредное воздействие на окружающую

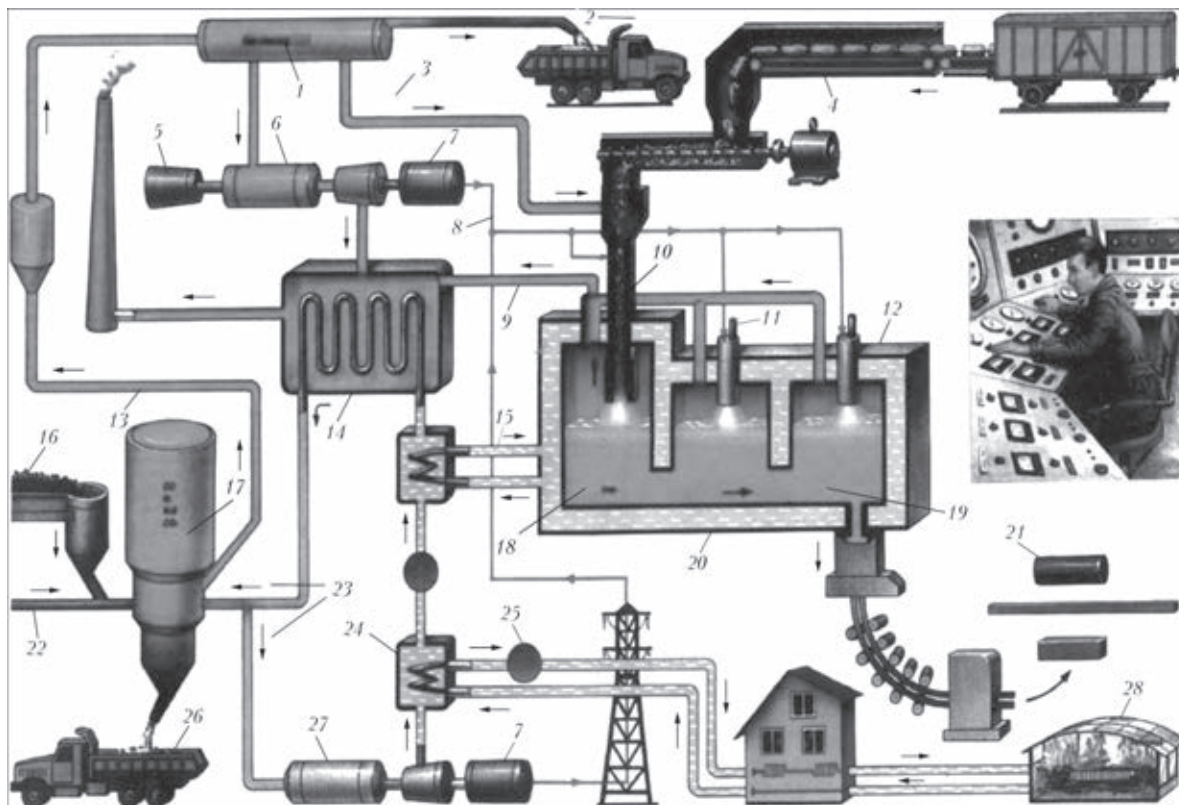


Рис. 10. Схема прогнозируемой металлургии будущего: 1 — газоочистка; 2 — сера; 3 — восстановительный газ; 4 — железорудный концентрат; 5 — компрессор; 6 — газовая турбина; 7 — генератор; 8 — передача электроэнергии; 9 — отработанный газ; 10 — плазмотрон (восстановление); 11 — плазмотрон (очистка); 12 — плазмотрон (легирование); 13 — газификатор; 14 — бойлер; 15 — вода; 16 — уголь; 17 — CO, H₂, H₂O, CO₂; 18 — железо; 19 — сталь; 20 — металлургический блок; 21 — прокат; 22 — кислород; 23 — пар; 24 — теплообменник; 25 — насос; 26 — зола; 27 — паровая турбина; 28 — теплица



среду вследствие отсутствия коксохимического и агломерационного производств; расширить сырьевую базу, комплексно использовать рудное сырьё, создать многотоварное металлургическое производство, в том числе наноструктурных материалов; создать замкнутую экосистему комплекс — жилой массив.

Применительно к целевой задаче оптимизации конструктивно-технологического оформления восстановительного модуля комплекса разработаны физико-химические и энергофизические основы построения процессов бескоксового плазменно-дугового получения металлов группы железа из дисперсного оксидного сырья. Продемонстрирована применимость процесса плазменного жидкофазного восстановления к сложному рудному сырью типа титаномагнетита. Выработаны рекомендации для составления технического задания на разработку и изготовление опытно-промышленной плазменно-дуговой жидкофазной печи мощностью 3...5 МВт для восстановления железа из титаномагнетитового концентрата.

На основе развиваемой концепции расчетных и экспериментальных исследований, нацеленных на создание оптимального конструктивного оформления энерготехнологических процессов на базе плазменной техники, надеемся предложить для реализации перспективную схему металлургии будущего (рис. 10).

Работы проводились при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-08-00516-а, № 13-03-00733, грант Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-854.2012.3).

1. Рыкалин Н. Н. Тепловые основы сварки. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — 271 с.
2. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
3. Цветков Ю. В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. — М.: Наука, 1980. — 360 с.
4. Цветков Ю. В. Пути интенсификации процессов восстановления в свете адсорбционно каталитических представлений. Физическая химия окислов металлов. — М.: Наука, 1981. — С. 9–15.
5. Цветков Ю. В. Особенности термодинамики и кинетики плазменно-металлургических процессов // Физика и химия плазменных металлургических процессов. — М.: Наука, 1985. — С. 9–15.
6. Tsvetkov Yu. V. Plasma metallurgy. Current state, problems and prospects // Pure and Applied Chemistry. — 1999. — 71, № 10. — P. 1853–1862.
7. Цветков Ю. В., Николаев А. В., Панфилов С. А. Плазменная металлургия. — Новосибирск: Наука, 1992. — 265 с.
8. Цветков Ю. В. Физикохимия плазменной металлургии // Технология металлов. — 2006. — № 4. — С. 7–14.
9. Каламазов Р. У., Цветков Ю. В. Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена. — М.: Металлургия, 1988. — 193 с.
10. Цветков Ю. В. Термическая плазма в нанотехнологиях // Наука в России. — 2006. — № 2. — С. 4–9.
11. Самохин А. В., Алексеев Н. В., Цветков Ю. В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов // Химия высоких энергий. — 2006. — 40, № 2. — С. 120–126.
12. Цветков Ю. В., Самохин А. В. Плазменная нанопорошковая металлургия // Автомат. сварка. — 2008. — Ноябрь. — С. 171–175.
13. Тепломассоперенос в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением в процессах получения нанопорошков / А. Г. Астахов, А. В. Самохин, Ю. В. Цветков, Н. В. Алексеев // Химия высоких энергий. — 2012. — 46, № 4. — С. 327–330.
14. Цветков Ю. В., Николаев А. В. Плазменные процессы в составе энергометаллургического комплекса (некоторые проблемы металлургии будущего) // Ресурсы. Технология. Экономика. — 2006. — № 2. — С. 20–26; № 3. — С. 38–42.
15. Энергоэффективное применение плазменной печи при восстановлении титаномагнетитового концентрата / А. В. Николаев, Д. Е. Кирпичев, А. А. Николаев, Ю. В. Цветков // Главный энергетик. — 2012. — № 3. — С. 26–36.

Поступила в редакцию 11.07.2013



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ БАЗОВЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. В. ДУБ

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», РФ. 1090808, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4.

E-mail: cniitmash@cniitmash.ru

Рассмотрены основные элементы новых комплексных технологий, обеспечивающих эффективное получение материалов с новым уровнем свойств. Отмечена перспективность создания новых систем легирования конструкционных материалов для машиностроения с управлением их первичной кристаллической структурой, механизмами упрочнения, сопротивления хрупким разрушениям. Табл. 4, рис. 10.

Ключевые слова: технологические и материаловедческие принципы, комплексные технологии, конструкционные стали, базовые отрасли промышленности, перспективные направления исследований

Новые требования по надежности требуют использования новых технологических и материаловедческих принципов. Связь «микро-мезо-макро» параметров структуры материалов (табл. 1), закладываемых при переходе из жидкого состояния в твердое, т.е. от самого начала технологического маршрута, требует применения новых научных и технологических подходов для создания новых технологий. Старые технологии позволяли убрать только грубые несоответствия между требованиями и фактическим качеством.

Таблица 1. Уровни структуры

Микроуровень ($\leq L_0$)	
Вакансия, атом	$2...3 \cdot 10^{-10}$ м
Кластеры	$2...5 \cdot 10^{-9}$ м
Дислокация	10^{-8} м
Мезоуровень	
Блок мозаики, субзерно, сульфиды, НВ	$10^{-7}...10^{-6}$ м
Уровень зерна L_s	
Зерно, дендрит, сульфиды, НВ	$10^{-5}...10^{-4}$ м
Макроуровень ($> L_s$)	
Группа зерен	$2...5 \cdot 10^{-4}$ м
Участок образца	10^{-3} м
Образец в целом	Более $10^{-3}...10^{-2}$ м

Отрасли, нуждающиеся в разработке новых технологий и материалов:

энергетика, ТЭК, атомная промышленность: трубопроводы, ветряные электрогенераторы, запорная арматура; жаропрочные экономнолегированные материалы для суперсверхкритических параметров (ССКП) работы; лопатки для ступени ГТУ; конструкционные материалы с улучшенными

ми рабочими характеристиками для реакторных установок, турбин, сроком службы более 60 лет;

химическая промышленность: конструкционные материалы для реакторов и труб высокого давления;

транспорт и магистральные газопроводы: новые материалы для железных дорог, судостроение, трубы высокой прочности;

Изделия оборонной техники.

Важнейшим этапом формирования, исследования и управления свойствами металлоизделий является процесс затвердевания. Он складывается из ряда физических и физико-химических процессов, ключевым в которых является этап кристаллизации, т.е. непосредственно фазовый переход первого рода: жидкость (расплав) – твердое тело (кристаллы).

Поскольку все реальные металлические системы, используемые для изготовления изделий, являются многокомпонентными, очень важно понять какую степень возмущения в регулярность кристаллического строения основы сплава (в нашем случае железо) вносит каждый участник композиции. При этом в первую очередь целесообразно выделить наиболее сильно возмущающие элементы. Для такой оценки наиболее подходит выражение, названное Чалмерсон коэффициентом аккомодации A_k :

$$A_k = e^{\frac{\Delta H_s}{RT_{пл}}}, \quad (1)$$

где A_k – коэффициент аккомодации; ΔH_s – скрытая теплота затвердевания; $T_{пл}$ – температура затвердевания.

В случае плавления A_k принимают равным 1.

Для количественной меры оценки возмущения, вызываемой примесью при затвердевании, разработано выражение (2):

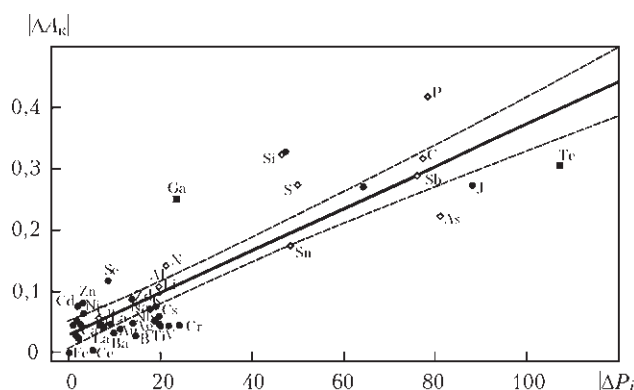


Рис. 1. Связь потенциала ионизации ΔP_i и ΔA_k

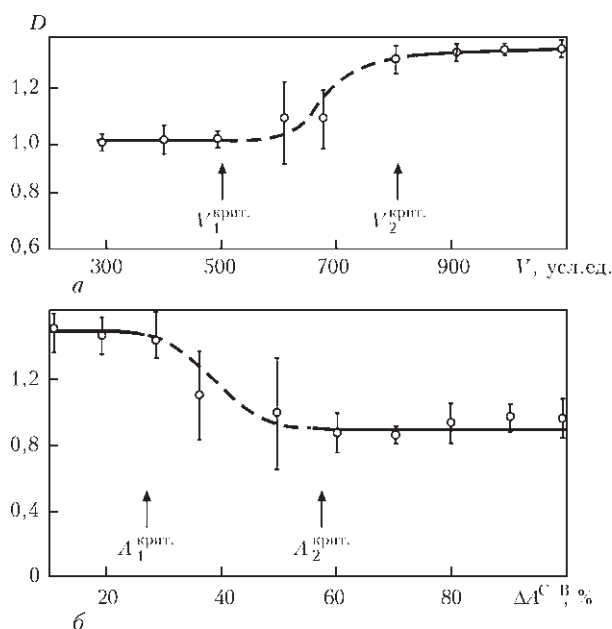


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности D модельных структур от скорости охлаждения V (а) и относительного коэффициента accommodation ΔA_k^B (б)

$$|\Delta A_k| = A_k^{Fe} - A_k^B. \quad (2)$$

В результате вычисления $|\Delta A_k|$ элементы, оказывающие наиболее сильное возмущающее влияние на затвердевание сплавов на основе железа, расположились в ряд по степени их убывания:

P, Si, C, S, Sb, As, Bi, Sn, N, Cu, Al, Mn. (3)

Величина $|\Delta A_k|$ хорошо коррелирует с потенциалом ионизации ΔP_i , интегрально описывающим теплофизические особенности отдельного элемента (рис. 1).

Исходя из гипотезы двухстадийного механизма процесса кристаллизации (атомарный расплав – кластерно-атомарный пограничный слой – присоединение кластеров к кристаллическому фронту), промоделировали кристаллизацию и влияние теплофизических (скорость затвердевания) и физико-химических (концентрация и $|\Delta A_k|$ примеси) факторов на фрактальную размерность D как характеристику регулярности строения кристаллической матрицы (рис. 2). Как видно из последо-

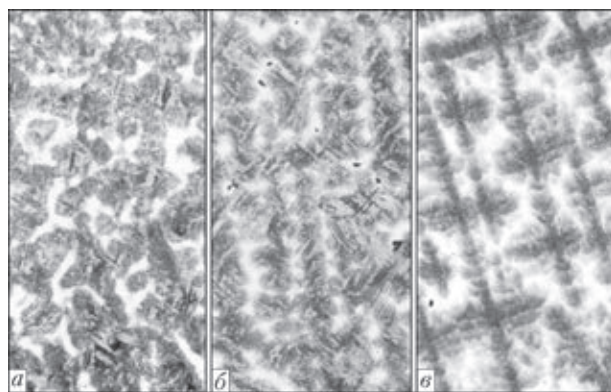
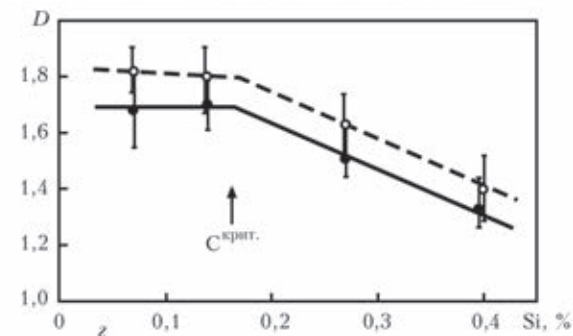


Рис. 3. Микроструктура образцов при различном содержании кремния (а–в): а — 0,05 %; б — 0,15; в — 0,27; з — зависимость фрактальной размерности D модельных структур от содержания кремния



$KCV, \text{ Дж/см}^2$

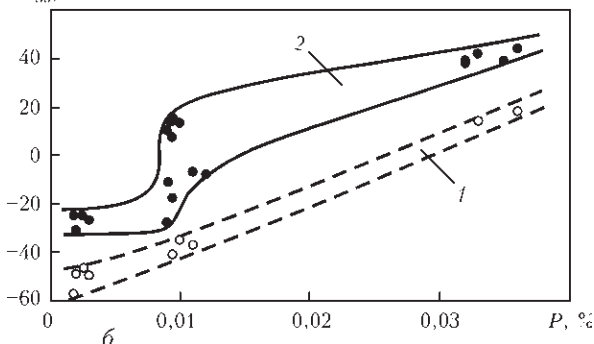
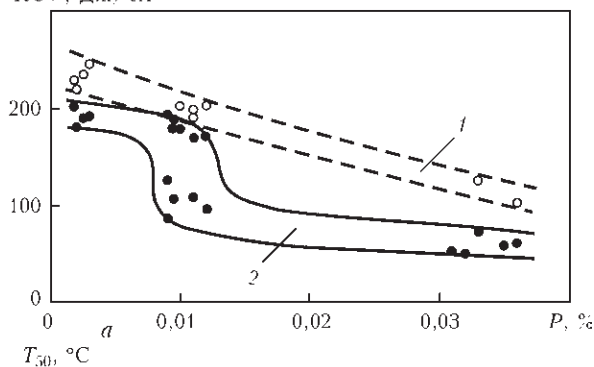


Рис. 4. Влияние фосфора и кремния на изменение ударной вязкости (а) и температуры хрупко-вязкого перехода (б): 1 — $< 0,1\%$ Si; 2 — $\geq 0,1\%$ Si

вательности (3) кремний очень сильно влияет на процесс кристаллизации сплавов на основе железа. На рис. 3 показаны результаты экспериментального и расчетного изучения влияния кремния



и ΔA_k на структуру конструкционной Cr–Ni–Mo стали.

Не менее сильнодействующим при кристаллизации стали является фосфор. В связи с тем, что воздействие возмущающих элементов складывается, их влияние либо усиливается, либо, в случае присутствия в количестве меньше критической концентрации, ослабляется (рис. 4).

Одновременно с процессами, нарушающими регулярность строения кристаллической структуры, развиваются явления, способствующие снижению сопротивления деградирующим нагрузкам (тепловым, корпускулярным, периодическим силовым и т.д.). Данные табл. 2 подтверждают связь между нарушением регулярности строения при наличии определенной примеси $|\Delta A_k|$ и склонностью материала к охрупчиванию.

Современные представления о природе охрупчивания сталей основываются на образовании предсегрегаций (преципитатов) и сегрегаций (фосфора, серы, олова, сурьмы и других элементов) и усиливающим действием легирующих элементов — кремния, никеля, марганца, влияние которых сильно зависит от их концентрации.

Существенным вопросом в данном случае становится состояние и протяженность границ зерен. Исследованию состояния границ зерен в металле корпусного оборудования АЭУ всегда уделяли самое пристальное внимание. В последний период в связи с требованиями по увеличению ресурса и надежности этих изделий, а также с целью создания конкурентных преимуществ отечественного атомного энергетического оборудования в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» систематически проводятся работы по изучению механизмов формирования границ зерен, оценке их влияния на свойства изделий и разработке технологических методов управления качеством и свойствами границ.

С использованием накопленного экспериментального материала разработана методика моделирования, позволяющая оценить размер зерен первичной кристаллической структуры и их эволюцию при различных операциях деформации. Эта работа в таком объеме и с такой глубиной проводится в нашей стране впервые.

Проведена оценка влияния элементов, наиболее сильно влияющих на состояние границ. Для примера изучили поведение фосфора — элемента, существенно влияющего на состояние границ на всех этапах технологического маршрута и при эксплуатации. Как известно, фосфор является элементом, чей коэффициент аккомодации сильно отличается от железа. Поэтому он является сильно ликвирующим элементом, равновесный коэффициент распределения которого при кристалли-

Таблица 2. Зависимость между $|\Delta A_k|$ и охрупчиванием низколегированных сталей

Параметр	Fe	Cu	N	C	Si	P
A_k	0,360	0,303	0,503	0,042	0,037	0,778
$ \Delta A_k = A_k^B - A_k^{Fe} $	0	0,057	0,143	0,318	0,323	0,418

зации очень низок (K_0 менее 0,1). В связи с этим при затверждении крупных слитков, используемых при производстве корпусного оборудования АЭУ, этот элемент распределяется неравномерно, накапливаясь в междендритных пространствах (микроликвация) и в зонах химической неоднородности (подприбыльной и зоне внецентренной ликвации). Известны термодинамические подходы, позволяющие проследить изменение концентрации фосфора. Рассчитанные значения показывают какой уровень концентрации примеси можно ожидать на границах в изделии, полученном из относительно крупного слитка со средним радиусом более 400 мм.

Следует обратить внимание еще на то, что, поскольку K_0 является термодинамической характеристикой, полагали, что она не зависит или мало зависит от концентрации ликвирующего элемента. Однако работами последних лет, в том числе и сотрудников ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», показано, что в случае концентрации примеси в расплаве, приближающейся к пределу растворимости этого элемента в твердом железе, значения K_0 резко возрастают.

С учетом этих подходов и экспериментальных результатов по изучению дендритной структуры литой стали 15Х2НМФ рассчитали концентрацию фосфора в пограничном слое, который является прообразом границ в будущем изделии (протограница), и на конечном этапе — степень заполнения пограничного слоя атомами фосфора в зависимости от величины зерна.

Исследования показали, что степень заполнения фосфором пригодных для адсорбции мест на

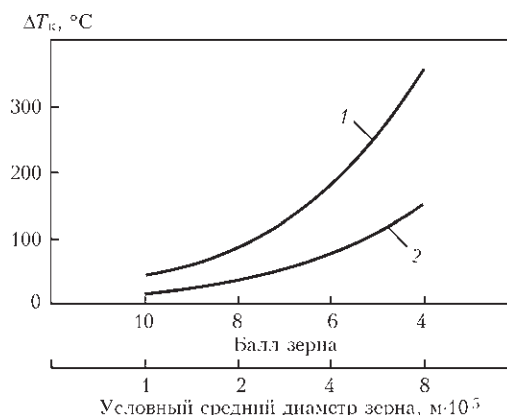


Рис. 5. Влияние содержания фосфора в металле перед затверждением и величины зерна готового изделия на повышение критической температуры хрупкости: 1 — начальная концентрация фосфора в жидком металле 0,01 %; 2 — 0,003



0,1 приводит к повышению критической температуры хрупкости на 27...28 °С. В результате удалось получить зависимость влияния содержания фосфора в металле перед затвердеванием и величины зерна готового изделия на повышение критической температуры хрупкости. Результаты изменения $\Delta T_{к0}$ представлены на рис. 5. Важно, что получение в готовом металле изделий из стали 15Х2НМФ величины зерна выше определенной (более 6...8 балла) обеспечивает высокую устойчивость против хрупких разрушений, а снижение содержания в исходном металле фосфора менее 0,004 % делает сталь практически нечувствительной к деградирующим воздействиям.

Прогресс при производстве высоконадежных изделий, например, корпусов атомных нефтехимических реакторов, сварных роторов и др. связан с дальнейшим продвижением по снижению $T_{к0}$ металла сварных швов. ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» разработал программу технологических и организационных мер, к числу которых относится, например, модернизация производства плавящихся флюсов.

Известно, что металл сварных швов имеет ряд особенностей по сравнению с основным металлом, так как эксплуатируется в литом состоянии. Охрупчивание Cr–Ni–Mo швов ($Ni < 1,5\%$, $P < 0,012\%$) при замедленном охлаждении при отпуске обусловлено содержанием кремния, марганца и азота выше определенного уровня (рис. 6). В значительной мере технологические средства решения задачи применительно к корпусу ВВЭР-1000 в настоящее время известны и достижимы:

- ограничение содержания азота достигается вакуумированием при выплавке стали для сварочной проволоки;
- ограничение содержания кремния и марганца в стали для проволоки;
- контроль перехода кремния и марганца в процессе сварки в зоне «шлак–сварочная ванна» путем регламентации электрических параметров режима сварки;
- целевое создание сочетания «плавка проволоки–партия флюса» (взамен селективного применения случайных партий флюса).

Реализовать научные разработки можно, только используя новые технологические процессы или системно применяя ранее наработанные технологические решения, комбинируя их в строго определенной нормированной последовательности и чередуя с вновь рекомендуемыми приемами.

Основные элементы новых технологий:

Сталеплавильный цикл:

- современное оборудование для шихтозаготовки, современные строго контролируемые по составу, виду и габаритам шихтовые материалы;

- современное сталеплавильное оборудование, обеспечивающее эффективное плавление, точно регулируемое осуществление окислительных процессов (обезуглероживание, глубокая дефосфорация) или отсутствие окисления (полный переплав);

- современное оборудование для выпечки обработки жидкого полупродукта, обеспечивающее вакуумирование, интенсивное проведение восстановительных реакций (глубокое десульфационное раскисление, контроль окисленности и управление окисными морфологиями), точное легирование, строго регулируемый нагрев и интенсивное перемешивание.

Циклы затвердевания и разлива:

- применение специализированной оснастки, которая обеспечивает ее оптимальную тепловую работу и рациональное использование литой заготовки (форма слитка, соответствующая назначению изделия);

- применение рационального метода разлива (сверху, сифон, в вакууме или специализированной атмосфере);

- стандартное состояние жидкого металла перед разливкой (строго регламентированный химический состав, окисленность, содержание водорода, температура);

- защита от контакта с окружающей атмосферой (защита от вторичного окисления, насыщения водородом и азотом);

- дифференцируемый и контролируемый температурно-скоростной режим разлива.

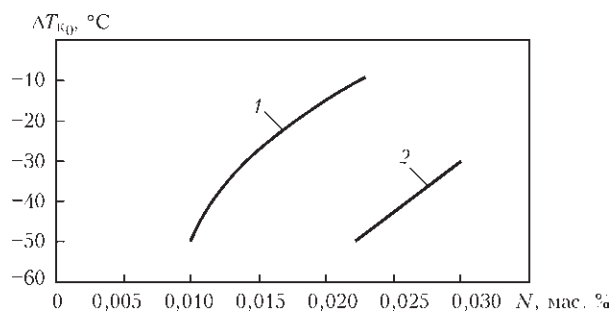


Рис. 6. Влияние содержания азота на переходную температуру хрупкости металла шва $T_{к0}$ в зависимости от суммарной концентрации кремния и марганца 0,7 % (1) и 0,6 (2)

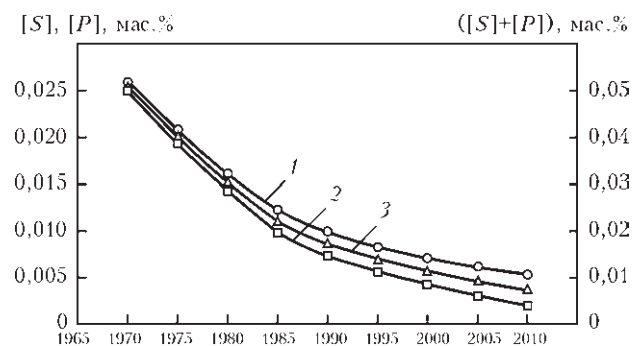


Рис. 7. Динамика изменения допустимого содержания примесей в сталях для энергомашиностроения: 1 — [P]; 2 — [S]; 3 — [P]+[S]

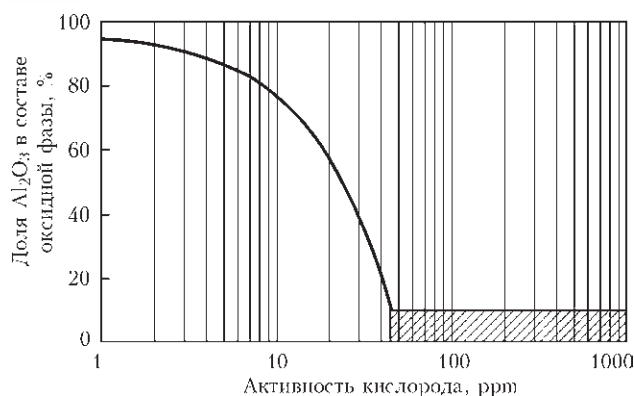


Рис. 8. Влияние активности кислорода на содержание Al_2O_3 в составе неметаллической фазы (для стали с 9 % Cr)

Деформационный передел:

- современное печное, кузнечно-прессовое оборудование, обеспечивающее необходимое распределение температур перед деформацией на накопленную деформацию и скорость деформации;
- современная оснастка, измерительный электронный инструмент;
- программная деформация, учитывающая данные о качестве и особенностях исходной заготовки (слитка, слитка ЭСП, ковальной заготовки).

Термическая обработка:

- дифференцированные режимы, учитывающие результаты оценки характеристик слитка (химический состав, содержание водорода, количество включений) и деформированной заготовки (максимальный размер зерна, распределение неметаллических включений и зон химической неоднородности);
- современные термические печи с допустимой неоднородностью термического поля в пределах до 5°C , применение вертикальных печей с нижним установочным устройством;
- современные спрейные термические установки (преимущественно вертикального типа), современные закалочные устройства и среды.

Сварочный и механообрабатывающий этап:

- современные средства контроля и метрологическое оборудование;
- сварочные материалы, адаптированные к основному металлу;
- сварочные флюсы, обеспечивающие как защиту, так и формирование заданных свойств и качества материала шва;
- увеличение доли автоматизированных процессов, применение трехкоординатных сварных и наплавленных головок;
- применение современных процессов окончательной механической обработки, не приводящих к накоплению напряжений в изделии.

Рассмотрим некоторые примеры применения современных технологий.

На рис. 7 показана динамика изменения допустимого содержания регулируемых примесей в

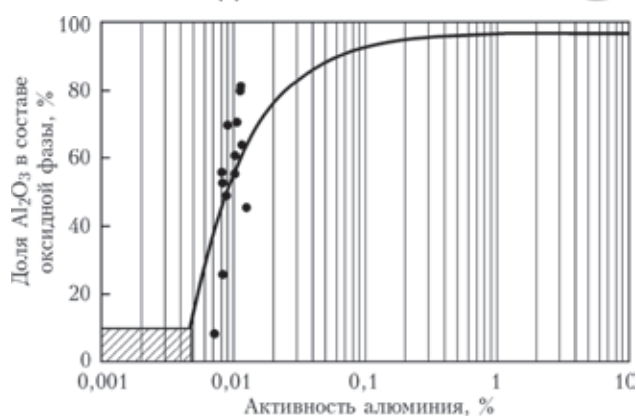


Рис. 9. Влияние активности алюминия (концентрации) на содержание Al_2O_3 в оксидных включениях стали 15X2НМФА (кривая получена в лабораторных условиях)

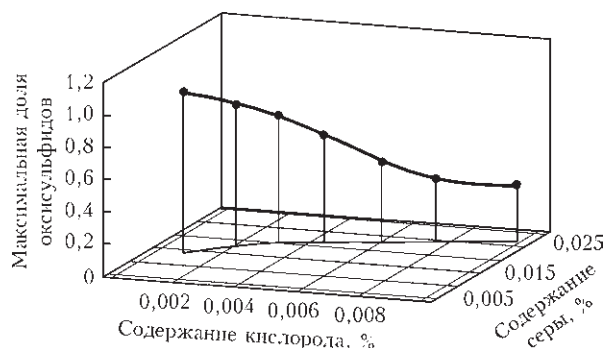


Рис.10. Влияние окисленности на изменение доли оксисульфидов в низкоуглеродистой стали

материалах, используемых в атомной и конвекционной энергетике и других важных отраслях экономики. Результаты показывают, что на сегодня технология позволяет приблизиться к пределу растворимости серы и фосфора в сталях и, таким образом, кардинально решить проблему химической неоднородности и связанным с ней охрупчиванием конструкционных материалов.

Управление составом и морфологией включений в различных материалах для энергетики приведено на рис. 8–10.

Применение ряда технологических решений, которые указаны ранее, позволили поднять технологию производства оборудования для АЭС на более высокий уровень, что явилось принципиально новым этапом в развитии металлургии как для атомного машиностроения, так и машиностроения в целом. Повышенные требования к чистоте металла, интенсивное рафинирование, новая технология разлива,ковки и термообработки, принятые для корпусов реакторов проекта АЭС-2006, позволили получить при изготовлении очень низкие значения фактической величины критической температуры хрупкости для всех элементов корпуса и крышки реактора (ниже 90°C) (табл. 3).

Еще одним примером применения нового подхода к технологии явилась разработка особо чистой модификации стали марки 10ГН2МФА-А, в которой существенно снижено содержание серы и фосфо-



Таблица 3. Характеристики сталей 15X2НМФА-А, 15X2НМФА-Ф класс1

Деталь	Объем выборки	Механические свойства								Т _{к0}	Примечания
		+20°С				+350°С					
		σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	ψ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	ψ, %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ТУ 0893-013-00212179-2003 (с изм. №2-2011)		610	490	15	55	539	441	14	50	-45°С – для обечаек активной зоны, -35 °С - для обечаек зоны патрубков -20 °С - для днища и эллипсоида, фланцев крышки и корпуса	Установленные значения Т _{к0} основаны на реальном опыте изготовления КР ВВЭР-1000
Обечайки активной зоны (опорная, верхняя и нижняя)	48	712	607	21,8	75,6	595	518	17,0	74,0	-50 ÷ -75	Референтность: 37 блоков ВВЭР-1000 ВВЭР-1200
Фланцы крышки и корпуса	44	700	602	20,0	74,0	585	517	15,0	75,0	-50 ÷ -80	
Обечайки зоны патрубков	45	691	582	21,0	75,0	572	495	16,0	73,0	-50 ÷ -75	
Днище корпуса, эллипсоид крышки	66	715	602	20,0	73,0	592	517	15,0	70,0	≤-70	
Обечайка зоны патрубков для Балтийской АЭС	Первая	670	565	24	76,0	547	472	16,5	72	-90	Освоение производства на ПАО «ЭМСС».
За всё время производства ни одна из обечаек для КР не имела недопустимых отклонений от требований ТУ											

Таблица 4. Химический состав стали для коллекторов парогенераторов типа ПГВ-1000МКП, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	Mo	W	Cr	Cu	S	P
							не более			
10ГН2МФА-ВД 10ГН2МФА-Ш	0,08-0,12	0,17-0,37	0,80-1,10	1,8-2,3	0,40-0,70	0,03-0,07	0,30	0,30	0,005	0,008
10ГН2МФА-А	0,09-0,11	0,20-0,30	0,90-1,00	1,8-2,0	0,55-0,65	0,04-0,06	0,15	0,15	0,002	0,006

Примечание. В стали 10ГН2МФА-А определяется содержание Sn, As, Sb и $X = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \cdot 100 \leq 15$.

ра, сужены пределы содержания основных легирующих элементов, введено определение содержания мышьяка, олова и сурьмы с регламентацией X-фактора ($X = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \cdot 100$) (табл. 4).

Необходимо также отметить, что в настоящее время в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» для понижения критической температуры хрупкости и стабилизации свойств при сварке проводятся исследования по определению механизма влияния комплексных модификаторов, вводимых в металл сварного шва через керамический флюс, на механические характеристики металла сварного шва.

Испытания механических свойств металла сварных швов, полученных при сварке опытных образцов из стали марки 15X2НМФА с использованием опытных составов керамических флюсов марки ФЦК-16 в сочетании с проволокой марки СВ-12X2Н2МФА, свидетельствуют о высоком уровне механических характеристик металла шва, превышающих требования нормативной документации. Испытания при сварке под флюсом КВ-4 показали, что критическая температура хрупкости составляет $T_{к0} = -30$ °C.

Выводы

В настоящее время существуют, опробованы и внедрены элементы новых комплексных технологий, обеспечивающих эффективное получение материалов с новым уровнем свойств.

Дальнейшие поиски в области комплексных технологических и материаловедческих исследований направлены на создание новых систем легирования конструкционных материалов для машиностроения, направленных на управление первичной кристаллической структуры, механизмами упрочнения, механизмами сопротивления металлов хрупким разрушениям.

Необходимо разработать новые системы технологической и нормативной документации, опирающейся, в том числе, на использование объективных экспрессных методов и создающие условия для непрерывного электронного мониторинга технологии, позволяющего корректировать ее по оперативным показателям, полученным на предыдущем этапе.

Поступила в редакцию 10.06.2013



АНАЛИЗ И ВЫБОР СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

М. БЕЛОЕВ¹, В. И. ХОМЕНКО², С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО³

¹ KZU Holding Group. Болгария, 1700, г. София. E-mail: marin.beloev@kzu-group.com

² ЗАО «Псковэлектросвар». РФ. 18022, г. Псков, ул. Новаторов, 3. E-mail: info@pskovelectrosvar.ru

³ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. Украина. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены достоинства и недостатки различных технологий соединения труб, применяемых при строительстве магистральных трубопроводов. Отмечено, что способ контактной сварки оплавлением имеет преимущества по сравнению с дуговым, лучевым и гибридным способами сварки. Табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: сварные трубопроводы, электродуговые процессы, лучевые методы сварки, контактная стыковая сварка, экономическая эффективность

Развитые страны, испытывающие потребности в большом количестве природного газа, активно планируют и строят магистральные трубопроводы от газодобывающих центров к местам потребления. Особенно это касается таких стран, как Бразилия, Алжир, Австралия, Россия, страны Каспийского региона и Ближнего Востока.

Сварка является наиболее ответственной технологической операцией при строительстве трубопроводов, и темп строительства зависит от производительности выполнения сварочных работ, поэтому развитие сварочных технологий является решающим фактором, определяющим качество и эффективность выполнения строительно-монтажных работ.

Сварочные процессы и технологии можно разделить на следующие группы: электродуговые, лучевые и пресовые, включая контактную сварку оплавлением и сварку трением. Применение этих технологий должно обеспечивать высококачественные сварные соединения нового поколения трубопроводов из стали повышенной категории прочности, таких как X65, X70, X80 при диаметрах до 56 дюймов.

Электродуговые процессы. С 1960-х годов самой распространенной технологией была ручная электродуговая сварка (РДС) электродами целлюлозного вида корня шва и заполняющих слоев электродами с основным видом покрытия. Эта технология и в настоящее время используется для сталей обычного класса прочности. Она требует высокой квалификации сварщиков-операторов при соблюдении температурного режима сварки с целью удаления водорода из сварного соединения. Технология РДС будет и далее использоваться на

небольших участках трубопроводов при стесненных условиях и ремонтно-сварочных работах.

Процесс сварки MIG/MAG с выполнением корня шва с управляемым переносом электродного металла по методу STT и последующим заполнением разделки при обычном процессе представлен на рис. 1. В настоящий момент этот метод широко используется, причем заполнение после выполнения корневого слоя, помимо использования процесса MIG/MAG, можно выполнять и электродами с основным видом покрытия. Особенностью этого процесса является достижение очень высокого качества многослойного шва, если сварка полностью выполнена с внешней стороны трубы.

Для выполнения сварного шва полностью процессом MIG/MAG (рис. 2) ряд фирм провели исследовательские работы и создали аппаратуру для автоматической орбитальной сварки (установки «Протеус»).

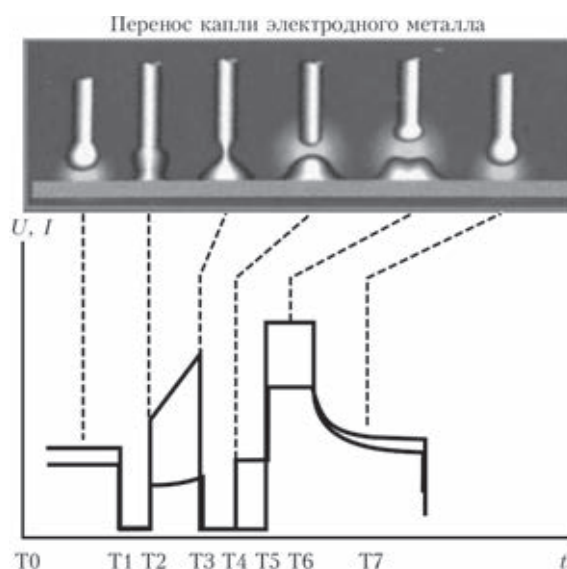


Рис. 1. Схема процесса MIG/MAG (метод STT)

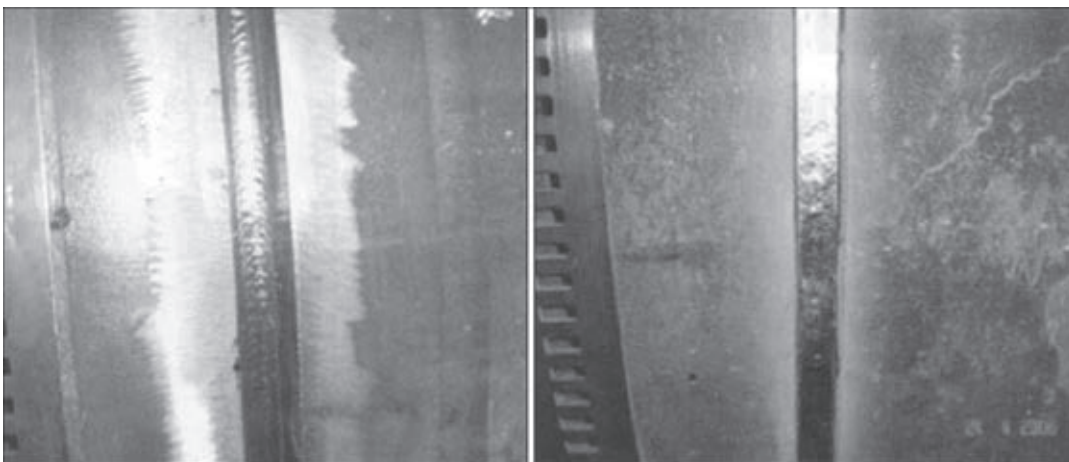


Рис. 2. Внешний вид сварного соединения, выполненного процессом MIG/MAG

Существуют модификации, когда орбитальный аппарат работает с двумя горелками (рис. 3), что сокращает время заполнения шва. Особенно интересна модификация тандемного процесса MIG/MAG, предоставляющего новые возможности роста производительности. В этом случае одна сварочная горелка с двумя контактными дюзами обеспечивает подачу двух проволок в одну сварочную ванну. В настоящее время его использование в строительно-монтажных условиях ограничено, во-первых, из-за нестабильности процесса и, во-вторых, потребности в сварщиках-операторах высокой квалификации.

Для процесса MIG/MAG наиболее усовершенствованной является технология с использованием сварочной колонны (рис. 4) фирмы CRC Evans (США, Хьюстон). Согласно этой технологии сварное соединение выполняется сварочными головками, расположенными изнутри и снаружи сварного соединения соответствующих труб.

К сварным соединениям кольцевых сварных швов при выполнении процессом MIG/MAG предъявляются требования по очень точной геометрии стыкующихся торцов труб и точного контроля параметров сварки. Поскольку наплавленный слой на одном сварочном посту имеет толщину 3 мм, то для толстостенных труб, например 24 мм, необходимо организовать восемь сварочных постов, чтобы сохранить расчетный цикл во время выполнения одного сварного стыка. В на-

стоящий момент эта технология широко используется. Однако она требует персонала численностью свыше 60 человек, обслуживающего сварочную колонну для сварки трубопровода диаметром 1420 мм при толщине стенки до 24 мм.

Лучевые способы сварки. Среди лучевых сварочных технологий наиболее развитой является технология гибридной лазерной сварки. Разработанные в SLV Halle (Германия) установки в лабораторных условиях показывают обнадеживающие результаты (рис. 5). Однако для внедрения этой технологии необходимо приложить еще много усилий по модификации оборудования (рис. 6) и разработке монтажно-сварочных приспособлений.

Прессовые способы. На региональном конгрессе Международного института сварки, состоявшемся в Софии 20–24 октября 2010 г., обсуждались все используемые сварочные технологии при сооружении магистральных трубопроводов.



Рис. 3. Аппаратура «Протеус» с двумя головками



Рис. 4. CRC колонна на трассе

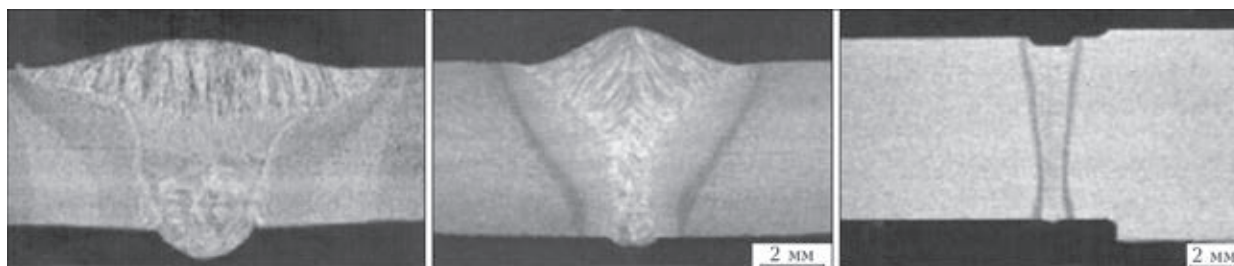


Рис. 5. Макрошлиф соединений трубных сталей, выполненных с использованием различных источников энергии: а – MIG/MAG; б – MIG/MAG + лазер; в – лазер

Наиболее удачной с точки зрения производительности, небольшого количества обслуживающего персонала, наименьшего влияния субъективного человеческого фактора была признана технология стыковой контактной сварки оплавлением (КССО). Резолюция конгресса рекомендовала ее приоритетное внедрение.

На практике технология КССО представляет собой процесс, при котором обеспечивается подача напряжения между двумя торцами труб, которые сближаются по определенной программе, в результате чего получается искрение (flashing). Энергия проходящего тока большого значения (сотни тысяч ампер) нагревает торцы труб, после быстрого сжатия которых обеспечивается неразъемное соединение.

Эта технология создана в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством Б. Е. Патона, С. И. Кучук-Яценко, В. К. Лебедева совместно с организациями Миннефтегазстроя СССР в 1970-е годы. В дальнейшем на ее базе была разработана сварочная установка «Север 1», с помощью которой было сварено свыше 1 млн сварных соединений труб диаметром 1420 мм и после 30 лет их эксплуатации нет ни одного случая возникновения аварийной ситуации.

После 2009 г. завод ЗАО «Псковэлектросвар» совместно с ИЭС им. Е. О. Патона провел модификацию этого оборудования для использования данной технологии при сварке трубопрово-

дов большого диаметра. Был разработан комплекс КСС-04 (рис. 7), который в настоящее время планируется широко использовать на многих участках инвестиционной трубопроводной системы как в РФ, так и в других странах.

В соответствии с упомянутой выше резолюцией МИС было получено несколько экспериментальных сварных соединений труб большого диаметра, которые затем были испытаны в лабораториях ЗАО «Псковэлектросвар», а также в лабораториях Института материаловедения Болгарской академии наук. С помощью компьютерной системы управления были точно заданы параметры режима сварки и режимы последующей термообработки, а также параметры снятия наружного и внутреннего граты для последующего автоматического ультразвукового контроля.

В экспериментах использовали сталь категории прочности X65 фирмы «Eugoripe» (Германия) следующего химического состава, мас. %: 0,071 углерода, 0,237 кремния, 1,51 марганца, 0,005 серы, 0,009 фосфора, 0,04 хрома, 0,15 никеля, 0,07 мо-

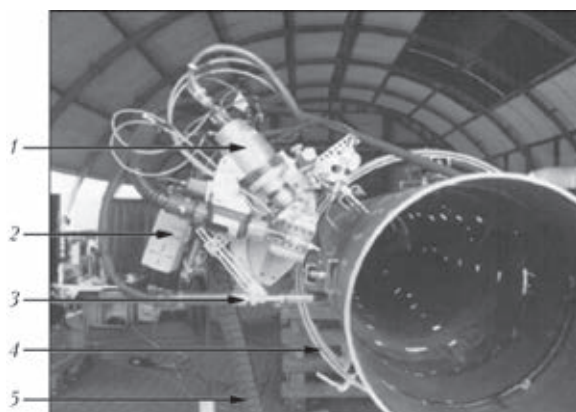


Рис. 6. Сварочный комплекс для гибридной лазерной сварки: 1 — головка для гибридной сварки; 2 — перемещающийся трактор с датчиком управления; 3 — горелка в положении заполнения разделки; 4 — кольцо; 5 — шланг

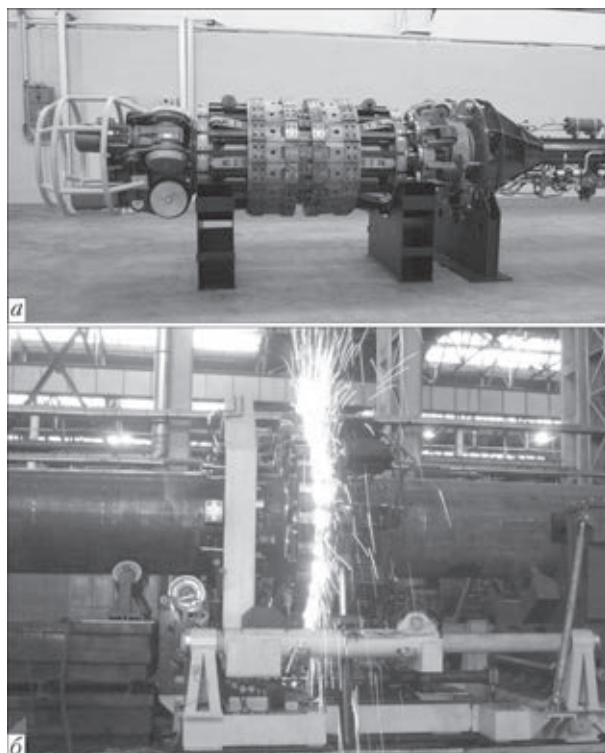


Рис. 7. Комплекс КСС-04: а — внешний вид; б — в процессе работы



Сравнение экономической эффективности внедрения комплекса электроконтактной сварки типа КСС-04 и сварочной колонны CRC Evans

Показатель	CRC Evans	КСС-04
Протяженность трубопровода, км	100 1 420 ≤ 25	
Диаметр трубопровода, мм		
Толщина стенки трубопровода, мм		
Стоимость одного комплекса, дол. США	5 750 000	3 930 000
Общее количество стыков на всем трубопроводе с учетом возможного брака, шт.	9 180	9 116
Численность персонала проекта, чел.	68	16
Себестоимость сварки одного стыка, дол. США	874	579

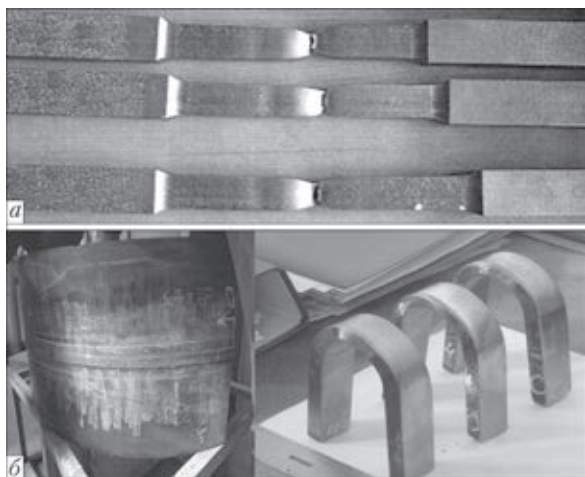


Рис. 8. Внешний вид образцов сварных соединений труб Ду 1220×27 мм после испытаний на растяжение (а) и изгиб (б)

либдена, 0,04 ванадия, 0,037 алюминия, 0,012 титана, 0,02 ниобия, 0,002 бора, 0,03 меди. Ее механические свойства в состоянии поставки следующие: $\sigma_{0,2} = 490$ МПа; $\sigma_b = 553$ МПа; $\delta = 26,5$ %; $KCV_{+20} = 335,8$ Дж/см²; $KCV_{-40} = 334,9$ Дж/см². После испытаний образцов были получены следующие прочностные характеристики, МПа: 538, 545, 541 и 540.

Внешний вид образцов сварных соединений труб Ду 1220×27 мм после испытаний на растяжение и изгиб представлен на рис. 8.

Отметим преимущества КССО:

- процесс выполняется на одном посту;
- обеспечивается высокий темп строительства трубопроводов за счет малого времени сварки одного стыка на одном посту, которое составляет 60...200 с в зависимости от типоразмера свариваемых труб диаметром от 114 до 1420 мм с толщиной стенки до 30 мм. Накоплен большой промышленный опыт применения КССО при строительстве трубопроводов различного назначения в наземных условиях;
- весь процесс от начала до конца выполняется в автоматическом режиме по заданной программе,

что исключает субъективное влияние сварщика на качество соединений;

- в сварных соединениях достигается низкий уровень остаточных напряжений, что существенно повышает коррозионную стойкость такого соединения; механические свойства отвечают требованиям стандартов развитых стран (например, стандарту API-1104, США);

- качество сварных соединений эффективно оценивается посредством компьютеризированной обработки фактических значений параметров режима сварки, созданного на базе реально существующей зависимости «режим сварки – качество соединения», которая обусловлена физическими особенностями процесса КССО; достоверность выявления возможных дефектов практически равна 100 %, в том числе при использовании автоматизированного ультразвукового контроля;

- трубы всех классов прочности сваривают при любой температуре окружающей среды без предварительного подогрева;

- погодные факторы не оказывают влияния на качество сварных соединений;

- повышается скорость строительства трубопроводов;

- снижаются материальные затраты на строительство трубопроводов.

Данные, приведенные в таблице, красноречиво свидетельствуют о преимуществах использования комплекса КСС-04 по сравнению со сварочной колонной CRC. Особенно показательно сопоставление таких факторов, как численность обслуживающего персонала, себестоимость одного сварного соединения, которые в пользу комплекса КСС-04.

Исходя из этого фирмы, например болгарские, занимающиеся реализацией проектов по строительству трубопроводов большого диаметра, в дальнейшем будут ориентироваться на применение комплексов КСС-04.

Поступила в редакцию 01.04.2013



RESIDUAL STRESS MANAGEMENT IN WELDING: MEASUREMENT, FATIGUE ANALYSIS AND IMPROVEMENT TREATMENTS

Yu. KUDRYAVTSEV and J. KLEIMAN

Structural Integrity Technologies Inc. Markham, Ontario, Canada. E-mail: jkleiman@itlinc.com

Residual stress (RS) management is a concept according to which three major stages, i.e. RS determination, RS fatigue analysis and RS beneficial redistribution are considered and evaluated, either experimentally or theoretically to achieve the optimum performance of welded structures. All three stages as well as a number of new engineering tools such as ultrasonic computerized complex for residual stress measurement, UltraMARS, software for analysis of the effect of residual stresses on the fatigue life of welded elements, ReSIST, and new technology and, based on it, compact system for beneficial redistribution of residual stresses by ultrasonic impact treatment, UltraPeen, will be discussed. Examples of industrial applications of the developed engineering tools for residual stress analysis and fatigue life improvement of welded elements and structures will be given. 10 Ref., 8 Figures.

Key words: ultrasonic measurement, residual stress, software, prediction of fatigue life, redistribution of stresses, ultrasonic impact treatment, industrial application

1. Introduction. Residual stress management

Residual stress management is a concept that addresses major aspects of residual stresses in welds and welded structures. According to the concept three major stages, i.e. RS determination, RS analysis and RS redistribution are considered and evaluated, either experimentally or theoretically to achieve the optimum performance of welded structures.

Residual stress can significantly affect engineering properties of materials and structural components, notably, fatigue life, distortion, dimensional stability, corrosion resistance etc. Such effects usually lead to considerable expenditures in repairs and restoration of parts, equipment and structures. For that reason, the residual stress analysis is a compulsory stage in the design of structural elements and in the estimation of their reliability under real service conditions. Systematic studies had shown that welding residual stresses may lead to a drastic reduction in fatigue strength of welded elements. In multi-cycle fatigue ($N > 10^6$ cycles) the effect of residual stresses can be compared with the effect of stress concentration. Even more significant are the effects of residual stresses on the fatigue life of welded elements in the case of relieving harmful tensile residual stresses and introducing beneficial compressive residual stresses in the weld toe zones. The results of fatigue testing of welded specimens in as-welded condition and after application of ultrasonic peening showed that in case of non-load caring fillet welded joint in high strength steel, the redistribution of residual stresses resulted in approximately two-fold increase in the limit stress range [1, 2]. The residual stresses, therefore, are one of the main factors determining the engineering properties of materials, parts and welded elements

and this factor should be taken into account during the design and manufacturing of different products. Although certain progress has been achieved in the development of techniques for residual stress management, a considerable effort is still required to develop efficient and cost-effective methods of residual stress measurement and analysis as well as technologies for the beneficial redistribution of residual stresses.

It is very important to consider the problem of residual stress as a complex problem including, at least, stages of the determination, the fatigue analysis and the beneficial redistribution of residual stresses. The combined consideration of the above-mentioned stages of residual stress analysis gives rise to so called Residual Stress Management (RSM) concept approach. The RSM concept includes the following main stages:

Stage 1: Residual Stress Determination. The stresses can be evaluated directly through measurements either using destructive method or non-destructive method and through computation.

Stage 2: Analysis of the Residual Stress Effects. The effect of residual stresses can be evaluated either through experimental studies or via computational methods.

Stage 3: Residual Stress Modification, if required. The modification of the residual stresses could be performed through changes in the technology of manufacturing/assembly and/or through application of stress-relieving techniques.

A number of new advanced engineering tools for all three stages of RSM were developed recently at Structural Integrity Technologies (SINTEC) Inc. located in Markham, Canada in cooperation with Ukrainian scientists. Short descriptions of the new engineering tools for residual stress management and examples of their practical application are presented below.



2. Residual stress measurement

2.1. Current Situation with Residual Stress Measurements

Over the last few decades, various quantitative and qualitative methods of residual stress measurement have been developed. In general, a distinction is usually made between destructive and non-destructive techniques [2].

The first series of methods is based on destruction of the state of equilibrium of the residual stress after sectioning of the specimen, machining, layer removal or hole drilling. The redistribution of the internal forces leads to local strains that are measured to evaluate the residual stress field. The residual stress is deduced from the measured strain using the elastic theory (analytical approach or finite element calculations). Among the most commonly used methods one can mention a few like:

- *The hole drilling method,*
- *The ring core technique,*
- *The bending deflection method,*
- *The sectioning method, etc.*

The second series of non-destructive methods of residual stress measurement is based on the relationship between the physical and the crystallographic parameters and the residual stress. The most developed methods are:

- *The X-ray and neutron diffraction methods.* These methods are based on the use of the lattice spacing as the strain gauge. It allows studying and separating the three kinds of residual stresses. Currently, the X-ray method is the most widely used non-destructive technique for residual stress measurements.

- *The ultrasonic techniques.* These techniques are based on variations in the velocity of ultrasonic wave propagation in the materials under the action of mechanical stresses.

- *The magnetic methods.* These methods rely on the interaction between magnetization and elastic strain in ferromagnetic materials. Different magnetic properties can be studied: permeability, magnetostriction, hysteresis, and Barkhausen noise.

While there are various destructive and non-destructive methods to detect and quantify the residual

stresses described in technical literature, new industrial problems, new geometrical and material complexities related to them, combined with a general need for fast and economical residual stress measurements create strong demand in new effective techniques and devices that is increasing dramatically. The most desired technology must be reliable and user-friendly, i.e. it should not require guessing and intuition from the engineer/technician and it must be computerized for quick analysis. One such new system for residual stress measurement that is based on using of the ultrasound is described below.

2.2. Ultrasonic Computerized Complex for Residual Stress Measurement

The Ultrasonic Computerized Complex (UCC) was developed for residual stress measurement in laboratory and in field conditions [3-5]. The UCC "UltraMARS" (Ultrasonic Measurement of Applied and Residual Stresses) includes a measurement unit with supporting software and an optional laptop with an advanced database and an Expert System (ES) for analysis of the influence of residual stresses on the fatigue life of welded elements (Figure 1). The UCC allows determining uni- and biaxial applied and residual stresses for a wide range of materials and structures. In addition, the developed ES can be used for calculation of the effect of measured residual stresses on the fatigue life of structural elements, depending on the mechanical properties of the used materials, the type of welded elements and the parameters of cyclic loading.

The supporting software allows controlling the measurement process, storing the ultrasonic measurement data and calculating and plotting the residual stresses distribution. The software allows the use of the designed method and equipment with standard PC's.

The main technical characteristics of the measurement unit:

- The stress can be measured in materials with thicknesses 2–150 mm;
- The error of stress determination (from external load) is 5–10 MPa;
- The error of residual stress determination is ~ 0.1



Figure 1. Ultrasonic Computerized Complex for residual and applied stress measurement: a — UltraMARS® model shown with a laptop and an oscilloscope; b — Next generation UltraMARS® -7 model shown with all transducers, transducer holders and attachments

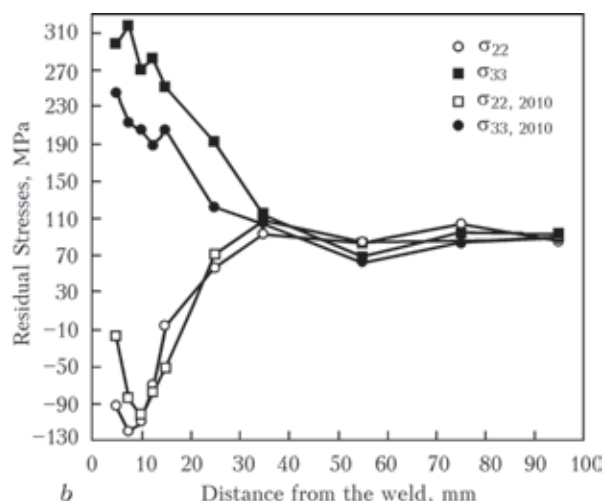
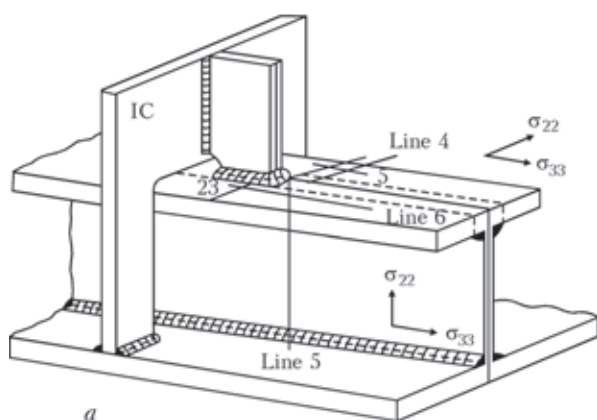


Figure 2. Measurement of residual stresses in a fragment of a real ship structure: a — schematic view of a fragment of the welded panel with details on residual stress measurement zones. The measurements were conducted along lines 4, 5 and 6, b — the distribution of residual stress along the welded stiffener (along line 6) in the welded panel before and after 2010 cycles of loading

σ_y (MPa);

- The stress, strain and force measurement can be performed in fasteners (pins) 25–1000 mm long;
- The system can be powered from an independent power supply (accumulator battery 12 V);
- The overall dimensions of the measurement instrument 300×200×150 mm;
- The weight of the unit with transducers is 6 kg.

One of the main advantages of the developed system UltraMARS® technique and equipment is the possibility to measure the residual and applied stresses in samples and real structure elements. Such measurements were performed for a wide range of materials. An examples of practical application of the developed ultrasonic technique and equipment for residual stress measurement in welded elements is presented below.

Figure 2b shows the distribution of residual stress in large scale welded panel shown schematically in Fig. 2a along the welded stiffener in as-welded condition and after cyclic loading [6]. It can be seen from Fig. 2 that the maximum residual stress near the welds (4–5 mm away from the weld) acting in the direction of longitudinal attachment and applied load reach levels 290–320 MPa that are close to the yield strength of considered material both in speci-

mens and in the panel.

Figure 3 shows two other typical examples of field application of the Ultrasonic Computerized Complex – UltraMARS® on a section of a highway bridge and on a section of a submarine hull.

3. Residual stress in fatigue analysis

despite the fact that the residual stresses have a significant effect on the strength and reliability of parts and welded elements, their influence is not sufficiently reflected in corresponding codes and regulations. This is, mainly, because the influence of residual stresses on the fatigue life of structural elements depends greatly not only on the level of residual stresses, but also on the mechanical properties of used materials, the type of welded joints, the parameters of cyclic loading and on other factors [1,2]. Presently elaborate, time-and labor-consuming fatigue tests of large-scale specimens are required for this type of analysis.

Generally, in modern standards and codes on fatigue design [7] the presented data correspond to the fatigue strength of real welded joints including the effects of welding technology, the type of welded element and the welding residual stresses. Nevertheless, in many cases there is a need to consider the influence



Figure 3. Application of the UltraMARS system for measurement of residual stresses in the zones of welded elements of a highway bridge (a) and a submarine pressure hull (b)

of welding residual stresses on the fatigue life of structural components in greater details. These cases include use of the results of fatigue testing of relatively small welded specimens without high tensile residual stresses, analysis of effects of such factors as overloading, spectra loading, application of the improvement treatments, etc.

An Expert System for



Fatigue Assessment and Optimization of Welded Elements "ReSIsT" was developed to resolve the above-mentioned problem [2]. The ES "ReSIsT" (Residual Stresses and Improvement Treatments) is based on the original predictive model for analysis of the influence of the residual stresses and their redistribution under the effect of cyclic loading and improvement treatments on the fatigue life of welded elements.

The optimization of welded elements is based on their fatigue assessment in the dialog mode. The following important parameters of welded structures are analyzed with the goal to enhance the fatigue performance:

- Material selection,
- Preferred design of welded elements,
- Weld processes and materials,
- Residual stresses,
- Application of improvement treatments,
- Influence of possible repair technologies,
- Realistic service conditions.

The ES includes a package of programs allowing to perform storing, classifying and statistical processing of the fatigue testing results and subsequent comparative analysis of the fatigue life of welded elements in the initial condition (after welding) and after application of improvement treatments. The developed ES includes the possibility to assess through calculations the effect of welding residual stresses and the application of improvement treatments on the fatigue life of welded elements without having to perform the time and labor consuming fatigue tests. The application of heat-treatment, vibration treatment, overloading, ultrasonic peening and other improvement treatments are considered. During fatigue assessment, the mechanical properties of the materials, the type of welded elements and stress concentrations, as well as the cyclic loading parameters are taken into account. A detailed analysis of the influence of residual stresses and their redistribution under the effect of cyclic loading in the zones of stress concentration is performed during such assessment.

The significant increase in the fatigue strength of parts and welded elements can be achieved by beneficial redistribution of residual stresses. To demonstrate this point, the calculated fatigue curves for a transverse loaded butt weld with different levels of initial residual stresses are shown in Figure 4. The fatigue curve of the welded element will be located between lines 1 and 2 in the case of partial removal of tensile residual stresses (i.e. lines 3 and 4). The decrease of the residual stresses from initial high level (line 1) to 100 MPa (line 4) causes, in this case, an increase of the limit stress range at $N = 2 \cdot 10^6$ cycles from 100 to 126 MPa.

The relieving of the residual stresses in welded element to the level of 100 MPa could be achieved, for

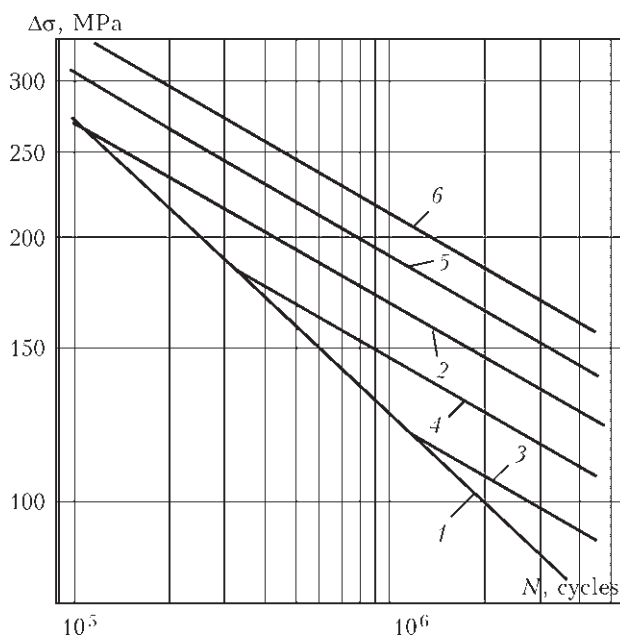


Figure 4. Fatigue curves of transverse loaded butt weld at $R=0$: Line 1 – with high tensile residual stresses; Lines 2...6 – with residual stresses equals to 0 MPa, 200 MPa, 100 MPa, –100 MPa and –200 MPa, respectively

example, by heat treatment or overloading of this welded element at a level of external stresses equal to $0.52\sigma_y$. As a result, this fatigue Class 100 welded element becomes the fatigue Class 125 element [7]. After modification of welding residual stresses, the considered welded element will have an enhanced fatigue performance and, in principle, can be used instead of transverse loaded butt weld ground flush to plate (No. 211) or longitudinal weld (No. 312 and 313) [7]. Introducing of compressive residual stresses into the weld toe zone can increase the fatigue strength of welded elements even to a larger extent (lines 5 and 6 in Figure 4).

4. Residual stress modification

In many cases, the beneficial redistribution of residual stresses can improve drastically the engineering properties of parts and welded elements. The detrimental tensile residual stresses could be removed and beneficial compressive residual stresses could be introduced into the subsurface layers of treated materials by application of heat treatment, overloading, hammer peening, shot peening, laser shock peening, etc. One of the new processes for effective redistribution of residual stresses is Ultrasonic Impact Treatment (UIT) or Ultrasonic Peening (UP) [8-10].

The UIT/UP produces a number of beneficial effects in metals and alloys. Foremost among these is increasing the resistance of materials and welded elements to surface-related failures, such as fatigue, fretting fatigue and stress corrosion cracking. The beneficial effect is achieved mainly by relieving of harmful tensile residual stresses and introducing compressive residual stresses into surface layers of metals and alloys, decreasing of stress concentrations in weld toe zones and the enhancement of the mechanical properties of the surface layers



of the material. The fatigue testing of welded specimens showed that the UIT/UP is the most efficient improvement treatment as compared with traditional techniques such as grinding, TIG-dressing, heat treatment, hammer peening, shot peening etc. [1, 10]. A new advanced system UltraPeen® (Ultrasonic Peening) for UIT/UP of parts and welded elements is shown in Figure 5.

For the effective application of UIT/UP, depending on the above-mentioned factors, a software package for Optimum Application of Ultrasonic Peening was developed that is based on an original predictive model.

In the optimum application, a maximum possible increase in fatigue life of welded elements with minimum labor-and power-consumption is thought. The main functions of the developed software are:

- Determination of the maximum possible increase in fatigue life of welded elements by UIT/UP, depending on the mechanical properties of used material, the type of welded element, the parameters of cyclic loading and other factors;

- Determination of the optimum technological parameters of UIT/UP (maximum possible effect with minimum labor-and power-consumption) for every considered welded element;

- Quality monitoring of UIT/UP process;
- Final fatigue assessment of welded elements or structures after UIT/UP, based on detailed inspection of UIT/UP treated zones and computation.

The developed software allows to assess, through calculations, the influence of residual stress redistribution by UIT/UP on the service life of welded elements without having to perform the time-and labor-consuming fatigue tests and to compare the results of calculations with the effectiveness of other improvement treatments such as heat-treatment, vibration treatment, overloading etc. The results of computation presented in Figure 6 show the effect of application of the UIT/UP for increasing the fatigue life of welded joints in steels of different strength. The data of fatigue testing of non-load-carrying fillet weld specimens in as-welded condition (with high tensile residual stresses) were used as initial fatigue data for calculating the effect of the UIT/UP. These results are in agreement with the existing statement that the fatigue strength of certain welded element in steels of different strength in as-welded condition is represented by a unique fatigue curve [1,7]. Four types of steels



Figure 5. Advanced compact equipment for UIT/UP of materials, parts and welded elements

were considered for fatigue analysis: Steel 1 – ($\sigma_y = 270$ MPa, $\sigma_u = 410$ MPa); Steel 2 – ($\sigma_y = 370$ MPa, $\sigma_u = 470$ MPa); Steel 3 – ($\sigma_y = 615$ MPa, $\sigma_u = 747$ MPa) and Steel 4 – ($\sigma_y = 864$ MPa, $\sigma_u = 897$ MPa). Line 1 in Figure 6 is the unique fatigue curve of considered welded joint for all types of steels in as-welded condition that was determined experimentally. Lines 3, 5, 7 and 9 are the calculated fatigue curves for the welded joint after application of the UIT/UP for Steel 1, Steel 2, Steel 3 and Steel 4, respectively.

As can be seen from Figure 6, the higher the mechanical properties of the material, the higher is the fatigue strength of welded joints after application of the UIT/UP. The increase in the limit stress range at $N = 2 \times 10^6$ cycles under the influence of UIT/UP for welded joint in Steel 1 is 42%, for Steel 2 – 64%, for Steel 3 – 83% and for Steel 4 – 112%. These results show a strong tendency of increasing the fatigue strength of welded elements after application of UIT/UP with the increase in mechanical properties of the material used. In cases of high strength steels, the application of UIT/UP caused a two-fold increase in the limit stress range and over 10 times increase in the fatigue life of the welded elements.

As an example of application of UIT/UP, the results of fatigue testing of a tubular welded joint in as-welded condition and after UIT/UP are presented in Fig. 7. As can be seen from Fig 7, in the considered case of welded T-joint of rectangular hollow section (RHS) member elements (4"×4" to 2"×6" welded tubes as shown in the insert of Fig. 7) the UIT/UP increased the limit stress range of tubular joints by approximately 70% and the fatigue life – by more than 10 times.

Figure 8 shows examples of industrial application of the UP system in treatment of a large grinding mill in an effort to increase the capacity of the load (Fig. 8a) and for redistribution of residual stresses in a critical from the fatigue point of view region of a landing gear (Fig. 8b).

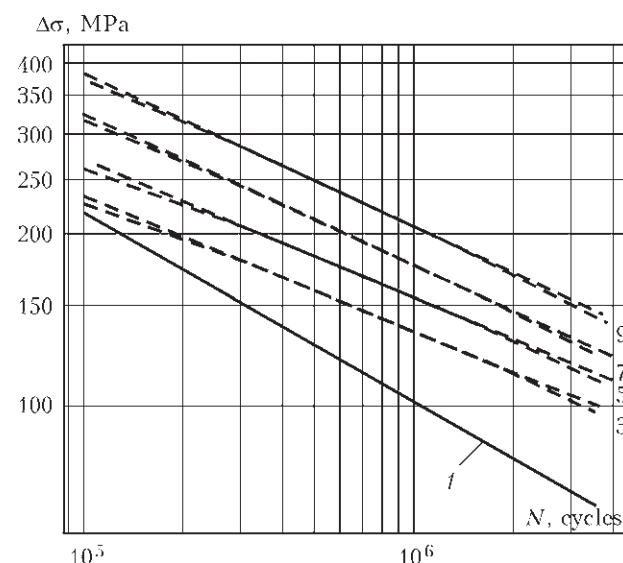


Figure 6. Fatigue curves of non-load-carrying fillet welded joint: 1 – in as-welded condition for all types of steel; 3, 5, 7 and 9 – after application of the UP to Steel 1, Steel 2, Steel 3, and Steel 4

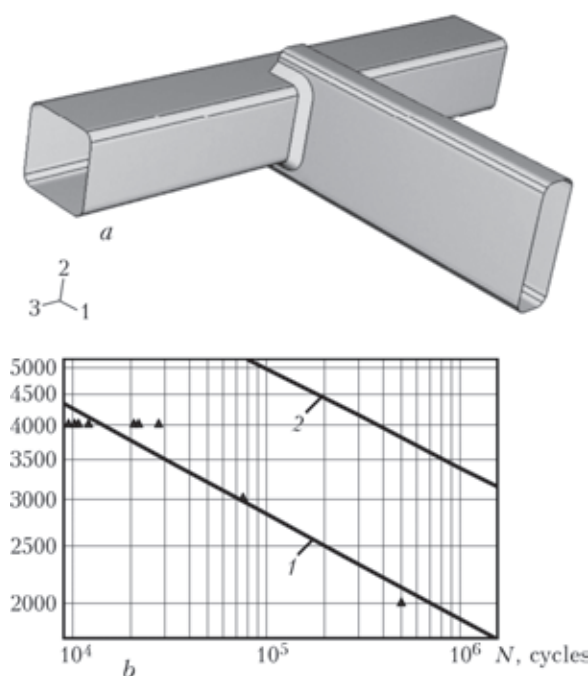


Figure 7. Fatigue curves (tendency) for tubular welded joints (as shown in the insert) showing the beneficial effect of UIT/UP: 1 — as-welded condition, 2 — after UIT/UP

5. CONCLUSIONS

1. Residual stresses play an important role in operating performance of materials, parts and structural elements. Their effect on the engineering properties of materials such as fatigue and fracture, corrosion resistance and dimensional stability can be considerable. The residual stresses, therefore, should be taken into account during design, fatigue assessment and manufacturing of parts and welded elements.

2. Certain progress has been achieved during the past few years in improvement of traditional techniques and development of new methods for residual stress measurement. A number of new engineering tools for residual stress management such as ultrasonic computerized complex for residual stress measurement, technology and equipment for ultrasonic peening and expert system for fatigue assessment and optimization of welded elements and structures were recently developed and verified for different applications.

3. The beneficial redistribution of the residual stresses is one of the efficient ways of improvement of the engineering properties of parts and structural elements. Application of the ultrasonic impact treatment causes a remarkable improvement of the fatigue strength of parts and welded elements in materials of different strength. The higher the mechanical properties of treated materials – the higher the efficiency of ultrasonic peening application. It allows using to



Figure 8. Examples of application of the UltraPeen system for fatigue improvement: a — of grinding mill when over 250 meters of welds were treated, b — of landing gear where critical from the fatigue point of view zone was treated

a greater degree the advantages of the high strength material application in welded elements and structures, subjected to fatigue loading.

1. Trufyakov, V., Mikheev, P., Kudryavtsev, Y. (1995) *Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and improvement treatments*. London: Harwood Academic Publishers GmbH.
2. Kudryavtsev, Y. (2008) *Residual stress*. Springer Handbook On Experimental Solid Mechanics. Springer E SEM, 371-387.
3. Kudryavtsev, Y. (1985) Application of the ultrasonic method for residual stress measurement. In: *Development of fracture toughness requirement for weld joints in steel structures for arctic service*. VTT-MET. B-89, Espoo, Finland, p. 62-76.
4. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. In: *Proc. of Conf. on Structural Materials Technology: An NDT* (Atlantic City, Feb. 28-March 3, 2000), 213-218.
5. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J. (2010) Measurement of residual stresses in welded elements and structures by ultrasonic method. *IIW Doc. XIII2339-10*.
6. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhaeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. In: *Proc. of Int. Conf. on Advances in Experimental Mechanics: Integrating Simulation and Experimentation for Validation (ISEV)* (Edinburgh, 7-9 Sep., 2011), 625-631.
7. (2008) Recommendations for fatigue design of welded joints and components. *IIW Doc. XIII1823-07*.
8. Kudryavtsev, Y., Korshun, V., Kuzmenko, A. (1989) Improvement of fatigue life of welded joints by ultrasonic impact treatment. *The Paton Welding J.*, 7, 24-28.
9. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Iwamura Y. (2009) Fatigue improvement of HSS welded elements by ultrasonic peening. In: *Proc. of Int. Conf. on High Strength Steels for Hydropower Plants* (Takasaki, Japan, July 20-22, 2009).
10. Kudryavtsev, Y., Kleiman J. (2010) Increasing fatigue strength of welded elements and structures by ultrasonic impact treatment. *IIW Doc. XIII-2318-10*.

Received 05.04.2013



СВАРКА, РЕЗКА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖИВЫХ ТКАНЕЙ

**Б. Е. ПАТОН, И. В. КРИВЦУН, Г. С. МАРИНСКИЙ, И. Ю. ХУДЕЦКИЙ,
Ю. Н. ЛАНКИН, А. В. ЧЕРНЕЦ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. Украина. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты исследований и разработок ИЭС им. Е.О. Патона в области высокочастотной сварки и родственных технологий для соединения, коагуляции, резки и термической обработки живых тканей, а также рассмотрены вопросы создания специализированного оборудования и инструментов для реализации указанных процессов. Описан опыт применения разработанных технологий и оборудования в практической хирургии, свидетельствующий об их высокой востребованности – на сегодня освоено более 150 различных хирургических методик и успешно выполнено свыше 100 тыс. хирургических операций в самых разных областях хирургии. Представлены данные исследований особенностей реструктуризации живых тканей и образования сварного соединения при воздействии проходящего через них высокочастотного тока. На основе полученных экспериментальных и клинических данных продемонстрирована возможность ткани, подвергнутой действию высокочастотной сварки, поддерживать свою жизнеспособность, восстанавливать физиологические свойства и функции за счет процессов регенерации. Представлены материалы исследований процесса высокочастотной сварки мягких биологических тканей с автоматическим регулированием, обеспечивающего гарантированное получение сварного соединения в широком диапазоне свойств свариваемой ткани. Рассмотрены перспективы дальнейшего развития технологий и оборудования для высокочастотной сварки и термической обработки живых тканей как за счет дальнейшего расширения хирургических сфер использования, так и за счет создания новых multifunctional аппаратов, сочетающих процессы высокочастотной сварки и конвекционно-инфракрасной обработки живых тканей, в том числе автономных мобильных аппаратов. Библиогр. 39, рис. 18.

Ключевые слова: высокочастотная сварка, коагуляция, резка, гипертермическая обработка, живые биологические ткани, хирургия, электрохирургический инструмент

Кроме традиционных областей использования, таких, как соединение и обработка конструкционных и функциональных материалов, сварка и родственные технологии находят все более широкое применение в медицине. Поэтому использование возможностей, предоставляемых новыми технологиями сварки и обработки различных материалов (в том числе биологических тканей) в целях улучшения здоровья человека, а также среды его обитания, является в настоящее время одним из приоритетных направлений научных исследований ИЭС им. Е. О. Патона. На сегодня эти технологии включают:

- высокочастотную сварку живых тканей для соединения и восстановления жизнедеятельности органов человека и животных;
- гипертермические способы сварки, резки и обработки живых биологических тканей;
- использование материалов с эффектом памяти формы для изготовления имплантатов, протезов и специальных хирургических инструментов;
- микроплазменное напыление биокерамических покрытий на эндопротезы;
- парозазную электронно-лучевую технологию получения композиционных наноматериалов для целенаправленной транспортировки и усиления действия лекарственных препаратов в живом организме;

- пароплазменные технологии переработки медицинских отходов.

В данной работе остановимся на первых двух технологиях и рассмотрим результаты выполненных в последние годы в ИЭС им. Е.О.Патона исследований и разработок оборудования и процессов высокочастотной сварки, а также родственных технологий для соединения, резки, коагуляции и обработки живых биологических тканей.

Высокочастотная сварка живых тканей. Историю электрохирургии обычно связывают с открытием тепловых свойств электричества в начале XVIII века, а также с изобретением Беккерелем электроножа, конец проволоки которого нагревался с последующим прижиганием тканей.

Первые свидетельства применения высокочастотного электро-коагуляционного оборудования в медицине связаны с именами d'Arsonval, Tesla, Cushing, Bovie и насчитывают уже более 100 лет. В течение многих лет выпускалась и совершенствовалась аппаратура, которая позволяла разрушать опухоли, удалять поврежденные ткани, коагулировать поверхности ран и др. В настоящее время на мировом рынке представлены многочисленные высокочастотные электрохирургические аппараты, выпускаемые такими ведущими производителями как «Valleylab», подразделение корпора-



ции «Covidien» (США), «Ethicon», подразделение компании «Johnson & Johnson» (США), KLS Martin Group и ERBE (Германия) и др. [1–4]. Выпускаются подобные аппараты и в Украине, например ЗАО «НИИ прикладной электроники» (Киев) [5]. Однако, решить проблемы получения надежных соединений живых биологических тканей и восстановления жизнедеятельности органов человека и животных способами электрохирургии стало возможным только в последние годы, используя технологии высокочастотной сварки. Сварка живых тканей стала приоритетной в совместной работе специалистов ИЭС им. Е. О. Патона с рядом медицинских учреждений Украины, начатой еще в начале 90-х годов прошлого века.

Способ высокочастотной сварки живых тканей (ВЧ СЖТ), разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона в тесном сотрудничестве с Международной ассоциацией «Сварка», компанией CSMG (США) и ведущими медицинскими организациями Украины, показал свою эффективность и успешно используется в медицинской практике уже более 10 лет.

За это время освоено более 150 различных хирургических методик и успешно выполнено свыше 100 тыс. хирургических операций в таких областях как общая и абдоминальная хирургия, травматология, пульмонология, проктология, урология, маммология, оториноларингология, гинекология, офтальмология и др. По отзывам хирургов [6], данный способ весьма перспективен при трансплантации различных органов. На сегодня, по нашей оценке, в Украине на аппаратах, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона, выполняется в среднем от 15 до 20 тыс. операций в год. Безусловным лидером здесь является Донецкий противоопухолевый центр (руководитель Г. В. Бондарь) [7].

Чрезвычайно перспективно использование новой техники и технологий в ветеринарии как для хирургического лечения и обработки домашних и диких животных (удаление опухолей, кастрация и пр.), так и для санитарной обработки городов (стерилизация бродячих животных) [8].

Способ ВЧ СЖТ обеспечивает:

- бескровное, быстрое, удобное для хирурга и малотравматичное для пациента выполнение оперативных вмешательств, надежный гемостаз;
- снижение кровопотерь более чем на 50 %;
- сокращение продолжительности операций на 20...50 %;
- высокую абластичность проведения операций;
- отсутствие нагноений;
- быструю и полноценную послеоперационную реабилитацию;
- возможность хирургического лечения больных, которые считались неоперабельными.

Преимущества ВЧ СЖТ подтверждены много-

численными отзывами ведущих хирургов, а также неоднократно отмечались в докладах, представленных на конференциях по сварке живых тканей, регулярно проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона [9–11].

Для дальнейшей интенсификации работ в области электросварки живых тканей и в соответствии с совместным решением Главного управления здравоохранения и медицинского обеспечения Киевской городской госсамминистрации, Национальной академии наук Украины, Национальной академии медицинских наук Украины и Национальной медицинской академии последиplomного образования им. П. Л. Шупика в 2011 г. на базе Киевской городской клинической больницы № 1 создан Киевский городской лечебный учебно-научно-исследовательский центр электросварочной хирургии и новых хирургических технологий (руководитель С. Е. Подпрятков) [12].

Область распространения аппаратов конструкции ИЭС им. Е. О. Патона для ВЧ СЖТ (более 150) охватывает практически все регионы Украины, а также некоторые страны ближнего и дальнего зарубежья. Аппараты применяются в Российской Федерации и Болгарии, первая партия аппаратов поставлена в Китай. Интерес к разработкам проявляют такие страны, как США, Индия, Вьетнам, Польша, Македония, страны Балтии и др.

В последние годы западные производители в перечне функциональных возможностей своего оборудования также начали употреблять термин «сварка» [13]. Следует, однако, отметить, что эта функция относится в основном лишь к процедуре перекрытия сосудов, а по количеству и разнообразию хирургических методик с использованием высокочастотной электросварки Украина, безусловно, является мировым лидером [14].

Практической основой для реализации процесса ВЧ СЖТ, как и любой другой технологии, служат соответствующие оборудование и инструменты. Начиная с первых аппаратов, разработанных еще в середине 90-х годов прошлого века, на сегодня в ИЭС им. Е. О. Патона создан широкий спектр специализированной аппаратуры [15].

В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона выпускаются и реализуются аппараты ЕК-300М1 различных модификаций (разработка прошлых



Рис. 1. Универсальный аппарат для сварки живых тканей ЕКВЗ-300 («ПАТОНМЕД»)



Рис. 2. Участок производства аппаратов для ВЧ СЖТ в НТК «ИЭС им. Е. О. Патона»: а – входной контроль и наладка элементов, узлов; б – сборка и программирование аппаратов

лет) и новый аппарат ЕКВЗ-300 «ПАТОНМЕД» (рис. 1) [16].

Универсальный аппарат ЕКВЗ-300 прошел клинические испытания, государственную регистрацию и успешно используется в хирургической практике более чем 20 медицинских учреждений Украины. Эти аппараты поставлены в Китай для оценки и демонстрации нового способа, что послужит основой для совместного производства данной аппаратуры как для китайского рынка, так и рынков других стран.

При разработке аппарата ЕКВЗ-300 собран опыт, накопленный в ходе эксплуатации ранее разработанного оборудования, и, по возможности, учтены рекомендации и предложения хирургов различных специальностей. ЕКВЗ-300 обеспечивает работу в следующих режимах: резание, коагуляция, автоматическая сварка. Имеется возможность выбора алгоритмов работы и рабочих параметров процесса в зависимости от видов операций и требований хирургов. Возможны адапта-

ция, изменение и ввод дополнительных программ по желанию пользователя. Аппарат работает на двух рабочих частотах: 66 и 440 кГц с контролируемой мощностью. Предусмотрено одновременное подключение двух инструментов по выбору хирурга. Аппарат комплектуется базовым набором электрохирургических инструментов (пинцеты и зажимы). Возможна комплектация дополнительными инструментами для открытой и лапароскопической хирургии.

Данный аппарат работает со всеми инструментами для ВЧ СЖТ, созданными в ИЭС им. Е. О. Патона на сегодня. Он успешно испытан при проведении операций в различных областях хирургии, включая общие полостные операции, пульмонологию, урологию, маммологию, офтальмологию и др. Проводятся операции со сваркой (перекрытием) сосудов, резекцией легких и печени, удалением почки, кишечного анастомоза и многие другие.

В научно-техническом комплексе (НТК) «Институт электросварки им. Е. О. Патона» создано производство, позволяющее как полностью удовлетворять потребности Украины в данном виде оборудования, так и поставлять его на экспорт (рис. 2).

Дальнейшая разработка оборудования для сварки живых тканей, состоящего из собственно аппарата (электронного блока) и соответствующего инструментария с соединительными кабелями, связана, прежде всего, с совершенствованием самих аппаратов, повышением их надежности, эргономичности, удобства в работе и обслуживании,

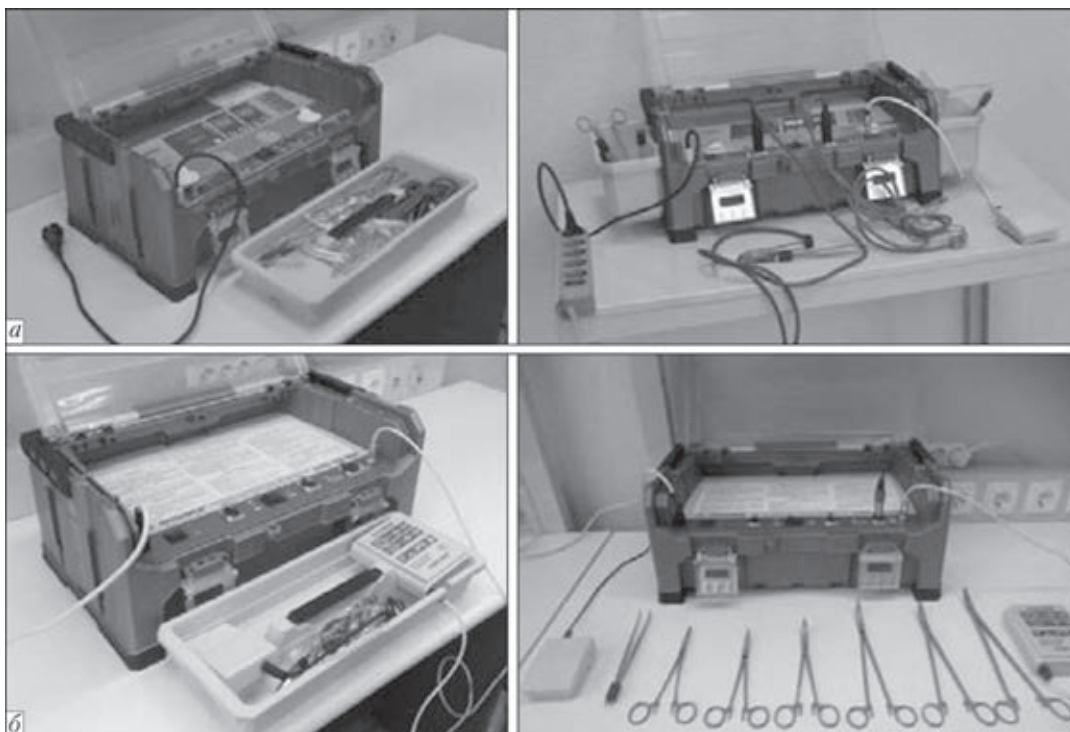


Рис. 3. Универсальные мобильные аппараты для ВЧ СЖТ со встроенным (а) и выносным (б) пультом управления



Рис. 4. Базовые инструменты для ВЧ СЖТ: биполярные электрохирургические зажимы (а) и пинцеты (б)

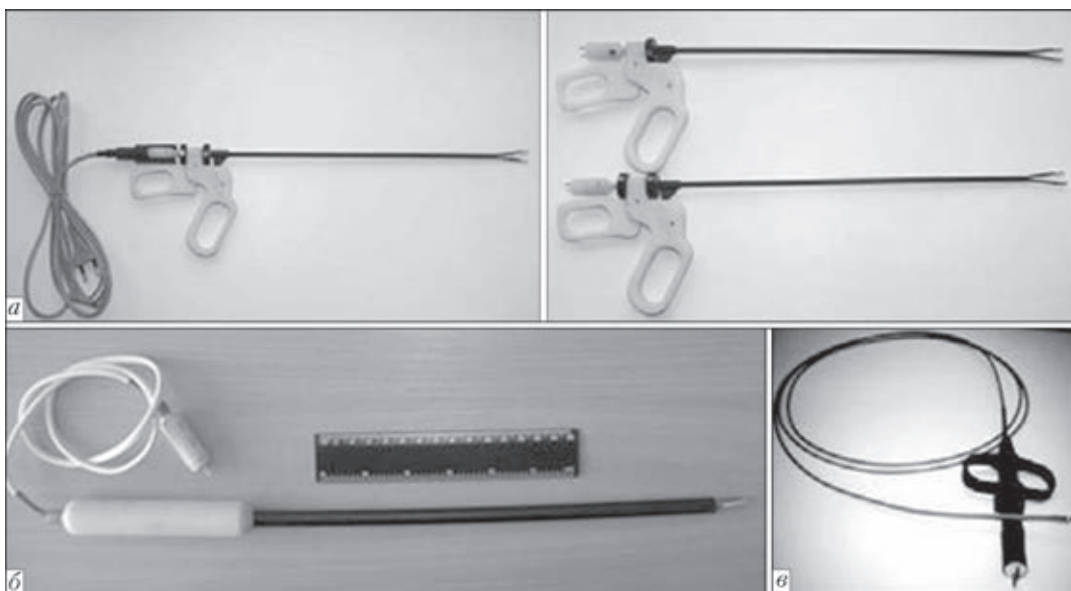


Рис. 5. Биполярные лапароскопические зажимы (а), щуп типа «ложка» (б) и гибкий эндоскопический инструмент (в)

адаптации к потребностям хирургов. На данном этапе необходима разработка нового программного продукта, ориентированного на отдельные хирургические методики и потребности пользователей, а также новых систем автоматического управления процессом. Необходимо также создавать новое специализированное оборудование для отдельных областей хирургии (офтальмология, сердечно-сосудистая хирургия, нейрохирургия и пр.) [15].

Кроме того, настоятельно требуется разработка мобильных систем, предназначенных для автоном-

ной работы (станции скорой помощи, санитарная авиация, медицина катастроф и пр.). Прототипом такого оборудования могут служить новые, созданные на базе ЕКВЗ-300 аппараты ЕКВЗ-300М (рис. 3, а) и ЕКВЗ-300МДУ (рис. 3, б) [15].

Не менее важен для ВЧ СЖТ соответствующий инструментарий. На сегодня разработаны и выпускаются по кооперации многие типы электросварочных хирургических инструментов, в основном базовых (рис. 4). Все шире используются и инструменты различного типа для лапароскопической хирургии (рис. 5).

Кроме базового, на практике применяются и различного вида специализированные инструменты. В качестве примера можно привести многочисленные инструменты, разработанные для нужд отоларингологии (рис. 6) [17].

К сожалению, следует отметить, что, несмотря на определенные успехи, разработка и выпуск нового инструмента нужной номенклатуры и в необходимых объемах все еще не удовлетворяют существующих потребностей.

Одновременно с разработкой оборудования, в ИЭС им. Е. О. Патона при тесном контакте с ведущими медицинскими и научно-техническими учреждениями Украины и других стран непрерывно

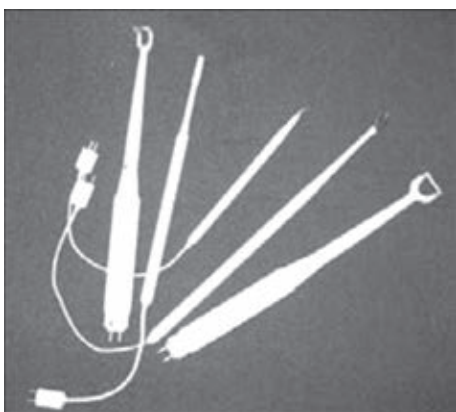


Рис. 6. Инструменты для ВЧ СЖТ в отоларингологии

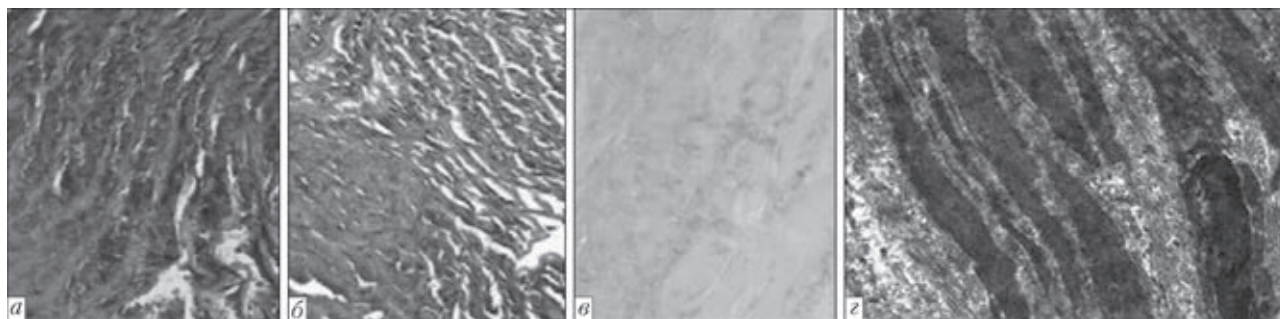


Рис. 7. Изменения структуры, происходящие в стенке артерии при ее перекрытии: *а* — переориентация токопроводящих структур вдоль направления прохождения тока, а токонепроводящих — поперек; *б* — образование щелей и волнистости; *в, з* — сближение и слияние токопроводящих структур с образованием однородной массы — сварного соединения

ведутся работы по исследованию поведения живых тканей различных типов при прохождении через них токов высокой частоты, разработке на основании данных исследований новых алгоритмов работы оборудования и созданию новых хирургических методик.

В результате исследований, проведенных совместно с Киевским центром электросварочной хирургии (С. Е. Подпратов и С. Г. Гичка), впервые установлены особенности реструктуризации живых тканей и образования сварного соединения при воздействии проходящего через них высокочастотного тока [18]. Определены следующие

фазы реструктуризации:

- отделение токопроводящих структур (белков или их комплексов в составе коллагеновых и мышечных волокон, мембран тканей и внутриклеточных органелл) от токонепроводящих (жиров, глюкозаминогликанов как в межтканевом пространстве, так и внутри клетки);
- переориентация токопроводящих структур вдоль направления прохождения тока, а токонепроводящих — поперек;
- образование щелей между токопроводящими структурами одновременно с возникновением их волнистости;

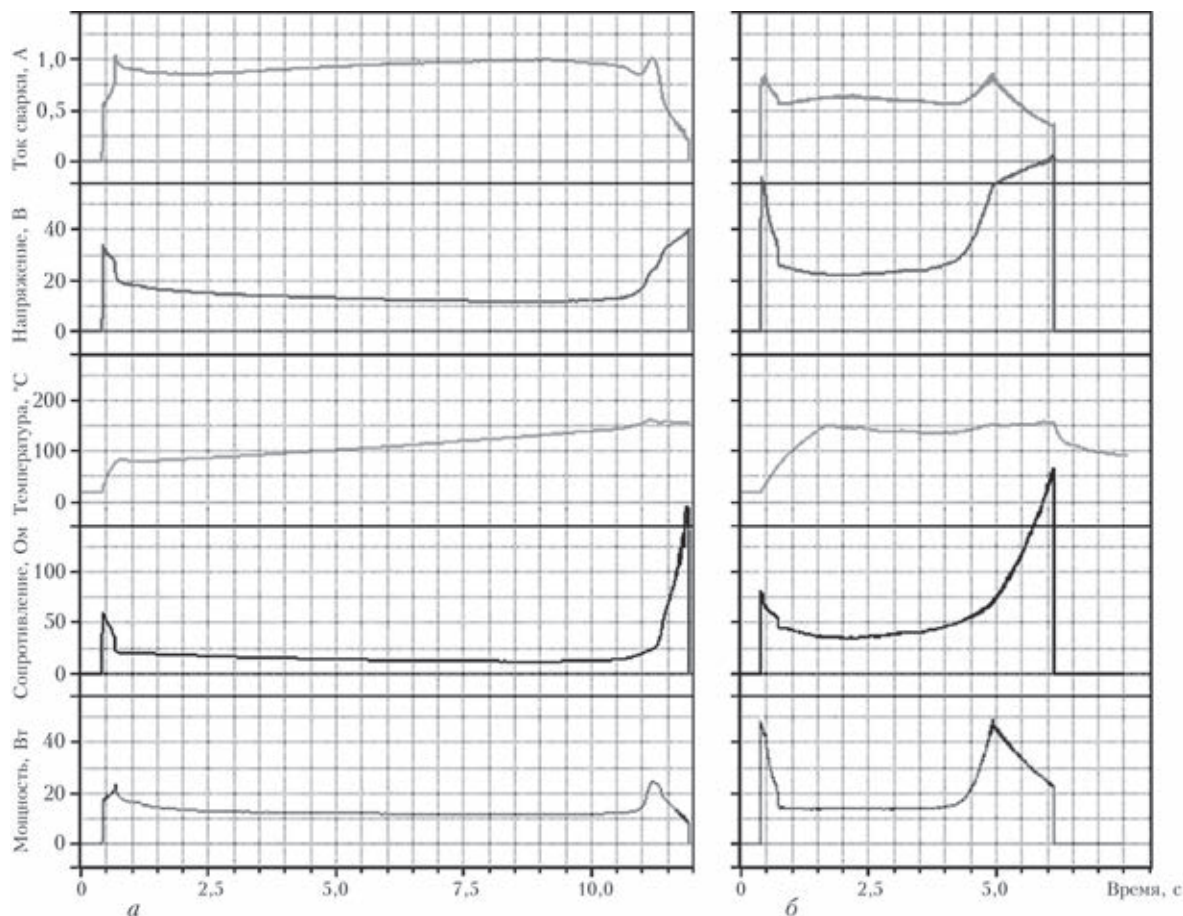


Рис. 8. Осциллограммы средних значений сварочного тока и напряжения, температуры в центре сварного соединения, электрического сопротивления ткани между электродами, мощности, выделяемой в свариваемой ткани: *а* — кишка; *б* — мышечная ткань



■ сближение токопроводящих структур и их слияние друг с другом с образованием однородной массы, которая и является электросварочным швом.

В качестве примера на рис. 7 показаны изменения структуры, происходящие в стенке артерии при ее перекрытии.

Совместно с российскими организациями – Институтом теоретической и экспериментальной биофизики РАН и Институтом биофизики клетки РАН (г. Пущино), а также НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва) способом рентгеновской дифракции с использованием синхротронного излучения проведено исследование влияния высокочастотной электрохирургической сварки на структуры различных биологических тканей. На основе полученных экспериментальных и клинических данных продемонстрирована возможность ткани, подвергнутой действию ВЧ-сварки, поддерживать свою жизнеспособность, восстанавливать физиологические свойства и функции за счет процессов регенерации.

Отработанные в процессе многолетней клинической практики рабочие режимы электросварочного воздействия в физиологическом диапазоне позволили зарегистрировать следующие структурные изменения на молекулярном и наноструктурном уровнях. Показано, что при ВЧ-сварке более лабильные глобулярные белки претерпевают тепловую денатурацию: повышение температуры вызывает структурный переход типа «глобула-клубок», в результате чего формируются клееподобные субстанции. Способ склеивания широко распространен в хирургии. Для этого используют специализированные медицинские клеи или белковые препараты, которыми покрывают места соединения поврежденных структур, как, например, альбумином при лазерной коагуляции. Преимущество способа ВЧ СЖТ (рис. 8) в том, что удается избежать присутствия инородного материала и проблем, связанных с иммунной несовместимостью [19].

В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования процесса высокочастотной сварки мягких биологических тканей как объекта автоматического регулирования. Выполнены мно-

гочисленные эксперименты с записью и компьютерной обработкой электрических и физических параметров процесса ВЧ СЖТ. Показано, что при прохождении электрического тока через ткань между электродами температура ткани в центре сварного соединения быстро повышается до температуры коагуляции белков и денатурации клеток ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$), при этом электрическое сопротивление ткани падает в 2,5...3 раза. Затем температура постепенно повышается до $150\text{...}180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Происходит обезвоживание ткани с увеличением ее сопротивления. Вследствие этого поля электрического сопротивления, электрического тока и температуры становится неоднородными. Ток преимущественно протекает по участкам с более низким на данный момент сопротивлением. Когда вся ткань между электродами полностью обезвоживается, ее интегральное сопротивление резко возрастает, что является признаком гарантированно сформированной сварной точки и сигналом к окончанию сварки. Дальнейший нагрев приводит лишь к нежелательной карбонизации ткани.

На основе полученных представлений о физических процессах, протекающих при сварке, разработана математическая модель сварки мягких биологических тканей. Выявлены физические и соответствующие им электрические показатели, характеризующие окончание формирования качественного сварного соединения. В соответствии с этой моделью разработан алгоритм автоматического регулирования процесса сварки, обеспечивающий гарантированное получение сварного соединения в широком диапазоне изменения свойств свариваемой ткани.

Разработан принципиально новый сварочный аппарат, реализующий этот алгоритм. Параметры режима сварки в нем устанавливаются и поддерживаются автоматически по результатам идентификации системой типа ткани, ее состояния и т.п. По желанию хирург имеет возможность устанавливать интенсивность режима сварки – «жесткий» или «мягкий» режим.

Эти и другие исследования легли в основу разработки новых алгоритмов работы аппаратов для сварки живых тканей, один из которых схематически представлен на рис. 9. В результате использования предложенного алгоритма достигается оптимальное воздействие ВЧ-тока на оперируемую ткань, что в конечном результате приводит к получению высококачественного соединения [20]. Конкретные параметры назначаются исходя из конкретных условий проведения хирургических вмешательств.

Как конкретный результат применения новых алгоритмов работы можно отметить следующее. Вместе с врачами Киевского центра электросва-

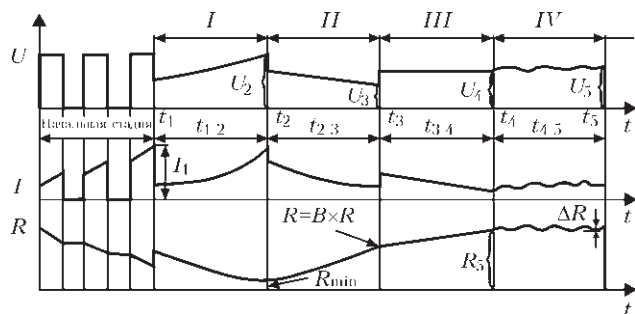


Рис. 9. Типовой алгоритм сварки живой ткани [20]



рочной хирургии с использованием стандартных аппарата ЕКВЗ-300 («ПАТОНМЕД») и инструмента в клинике достигнуто перекрытие артерий диаметром до 8 мм и вен диаметром до 11 мм [12]. Впервые достигнуто формирование электросварного шва паренхимы печени. Получены позитивные результаты при лечении сахарного диабета хирургическим путем с использованием технологии электросварки живых тканей в открытом и лапароскопическом вариантах. Отработана и успешно применяется на практике новая технология позадилобковой простатэктомии при хирургическом лечении аденомы простаты [21]. Данная технология обладает целым рядом преимуществ по сравнению с существующей, что позволяет охарактеризовать ее как одну из наиболее перспективных при лечении данного, весьма распространенного заболевания.

Перспективным представляется применение способов высокочастотной электросварки в кардиохирургии. Для расширения возможностей применения ВЧ-сварки в указанной области хирургии и создания соответствующего оборудования был создан Межведомственный центр «Сердечно-сосудистой инженерии», в который вошли специалисты ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, Национального института сердечно-сосудистой хирургии (НИССХ) им. Н. М. Амосова АМНУ и Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».

В рамках этого центра ведутся работы по созданию специализированной аппаратуры, инструментария и технологий: кардиохирургического инструмента для трансмуральной абляции проводящих путей сердца, диатермокоагуляции тканей и остановки кровотечений, инструмента для проведения кардиохирургических операций с одновременным резанием и коагуляцией и другие [22]. Разработаны опытные образцы указанного инструмента, которые успешно прошли предварительные испытания (рис. 10) [23].

Планируются работы по дальнейшему совершенствованию аппаратуры и инструмента в соответствии со спецификой сердечно-сосудистой хирургии, а также разработка и внедрение новых методик операционных вмешательств на базе НИССХ им. Н. М. Амосова и других кардиохирургических учреждений Украины.

Следует отдельно отметить работы по сварке живых тканей в офтальмологии, проводимые совместно со специалистами Института глазных болезней и тканевой терапии им. В. П. Филатова АМНУ (г. Одесса). Так, совместно созданная технология приваривания сетчатки в настоящее время является одной из наиболее эффективных. На сегодняшний день в офтальмохирургической

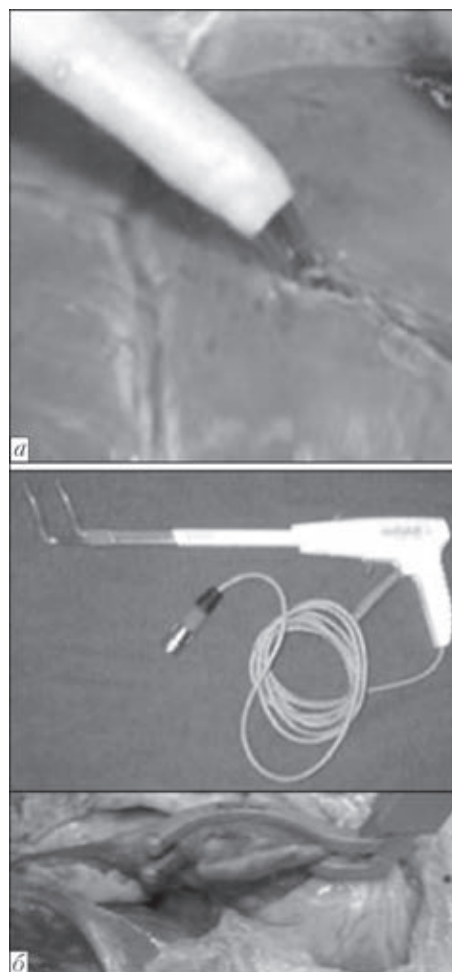


Рис. 10. Опытные образцы инструмента для проведения кардиохирургических операций: а — биполярный ВЧ-электрод для проведения операций с одновременным резанием ткани и коагуляцией; б — биполярный зажим для трансмуральной абляции проводящих путей сердца

практике указанного института ВЧ-электросварка применяется достаточно широко [24–26].

В частности, ВЧ СЖТ применяется во время энуклеации (удалении глазного яблока) у больных с внутриглазными новообразованиями, злокачественной вторичной неоваскулярной глаукоме и др. В режиме «Резка» выполняется отсечение прямых мышц глазного яблока от склеры, пересечение сосудисто-нервного пучка, в режиме «Сварка» — адаптация краев конъюнктивального разреза.



Рис. 11. Инструмент для ВЧ-сварки в офтальмологии

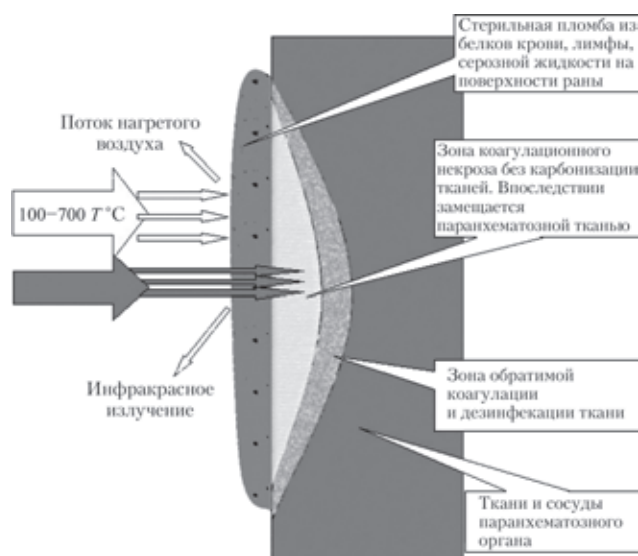


Рис. 12. Основные эффекты бесконтактного взаимодействия КИ-потоков тепла и живых тканей

В хирургии сетчатки и стекловидного тела электросварка применяется у больных с отслоением сетчатки, диабетической ретинопатией (одно из наиболее тяжелых осложнений сахарного диабета) и внутриглазными новообразованиями.

При операциях используются оригинальные параметры модифицированных для офтальмологии аппаратов, сконструированных в ИЭС им. Е. О. Патона и совместно разработанные оригинальные инструменты (рис. 11).

Кроме того, выполняются экспериментальные исследования по следующим направлениям:

девитализация злокачественных новообразований сосудистой оболочки. Новый способ позволит повысить эффективность лечения больных злокачественными внутриглазными новообразованиями за счет повышения качества абластики;

трабектомия. Электросварка позволит повысить эффективность лечения больных вторичной неоваскулярной глаукомой за счет повышения качества гемостаза при пересечении трабекулы;

хирургия роговицы (послойная кератопластика). ВЧ СЖТ позволит повысить качество послойной пересадки роговицы за счет бесшовной фиксации роговичного трансплантата.

Одновременно в ИЭС им. Е. О. Патона успешно проводились и продолжают работы по другим направлениям использования ВЧ СЖТ и родственных технологий в медицине. К их числу относят способы бесконтактной термохирургии. Представим эти работы более подробно.

Гипертермические способы сварки, резки и обработки живых тканей. В 2001 г. КБ «Южное» и ИЭС им. Е.О.Патона совместно разработали плазменный хирургический комплекс «Плазма-мед» [27]. Тем самым было положено начало развитию в Украине новой отрасли медицины — бесконтактной гипертермической хирургии.

На первом этапе была создана аппаратура, которая с помощью струи низкотемпературной аргоновой плазмы осуществляет резку паранехиматозных тканей и остановку внутрираневого кровотечения. Получена положительная медико-техническая оценка этой аппаратуры и разработана методика плазменной сварки живых тканей кишечника и желудка, а также способ соединения краев ран паранехиматозных органов.

В развитие этих исследований ИЭС им. Е.О.Патона совместно с Национальным институтом хирургии и трансплантологии им. А.А.Шалимова разработали способ и аппаратуру для конвекционно-инфракрасной (КИ) обработки и сварки живых тканей. Этот способ отличается простотой, доступностью созданной для него аппаратуры, а также использованием вместо аргона окружающего воздуха. Новизна разработок подтверждена патентами Украины [28–31]. Данный способ обеспечивает надежный гемостаз, возможность формирования пленок коагулированной крови на поверхности ткани, отсутствие термического поражения паранехимы органа, возможность безопасной работы в области крупных сосудов и полых органов (рис. 12).

Проведены проверки основных конструктивных и программных решений этой аппаратуры. Созданы и испытаны опытные образцы аппаратов КИ-обработки живых тканей и инструментов к ним. Для использования в полевых условиях разработана линейка аппаратов: полнофункциональный ТПБ-65, бюджетный ТПБ-65Б, автомобильный ТПБ-65Авт, беспроводной ТПБ-65Ак (рис. 13). Для стационарных операционных разработаны аппараты: полнофункциональный ТПБ-180, полнофункциональный со встроенным блоком бесперебойного питания ТПБ-180^{UPS}, бюджетный ТПБ-180Б (рис. 14).

Большинство аппаратов могут работать автономно и использовать в качестве источников питания бортовую сеть автомобиля, полевые электростанции, а аппарат ТПБ-200ВЧ может также выполнять манипуляции высокочастотной резки и коагуляции живых тканей.

Доклинические исследования КИ-аппаратуры и методик ее применения проведены на базе Национального института хирургии и трансплантологии им. А.А.Шалимова с участием специалистов Украинской военно-медицинской академии и хирургов Узловой больницы 1 ГТОО ЮЗЖД.

Исследования в области КИ-обработки живых тканей в хирургии показали перспективность этого способа, особенно в условиях инфекционно-осложненных оперативных вмешательств. Данный способ был модифицирован для остановки кровотечения и профилактики развития инфекции при огнестрельных ранениях (рис. 15) [32].

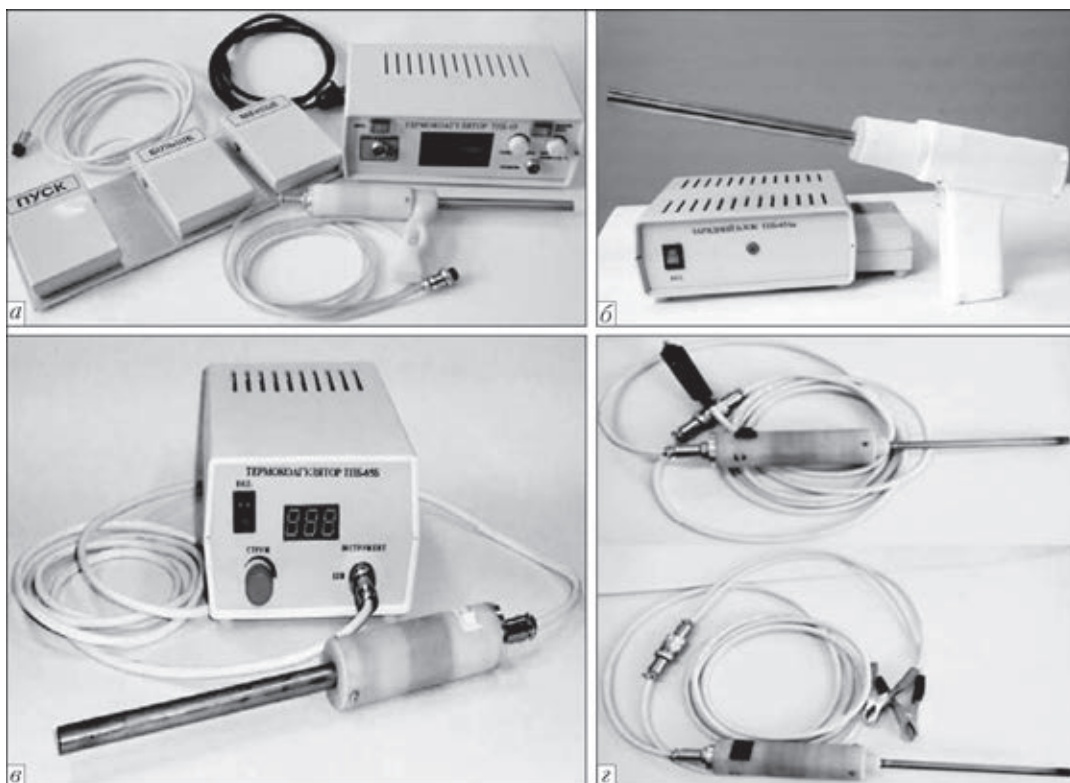


Рис. 13. Аппараты КИ-обработки живых тканей: а — ТПБ-65; б — ТПБ-65Ак; в — ТПБ-65Б; г — ТПБ-65Авт

Установлена высокая эффективность способа независимо от конкретной аппаратной реализации при остановке кровотечения из сосудов диаметром до 3 мм, при кровотечениях из поврежденных паренхиматозных органов, губчатых костей,

санации инфицированных и хронических гнойных ран [33, 34].

В качестве материала для инфицирования в опытах на лабораторных животных (крысы, кролики, свиньи) применялась смесь устойчивых к

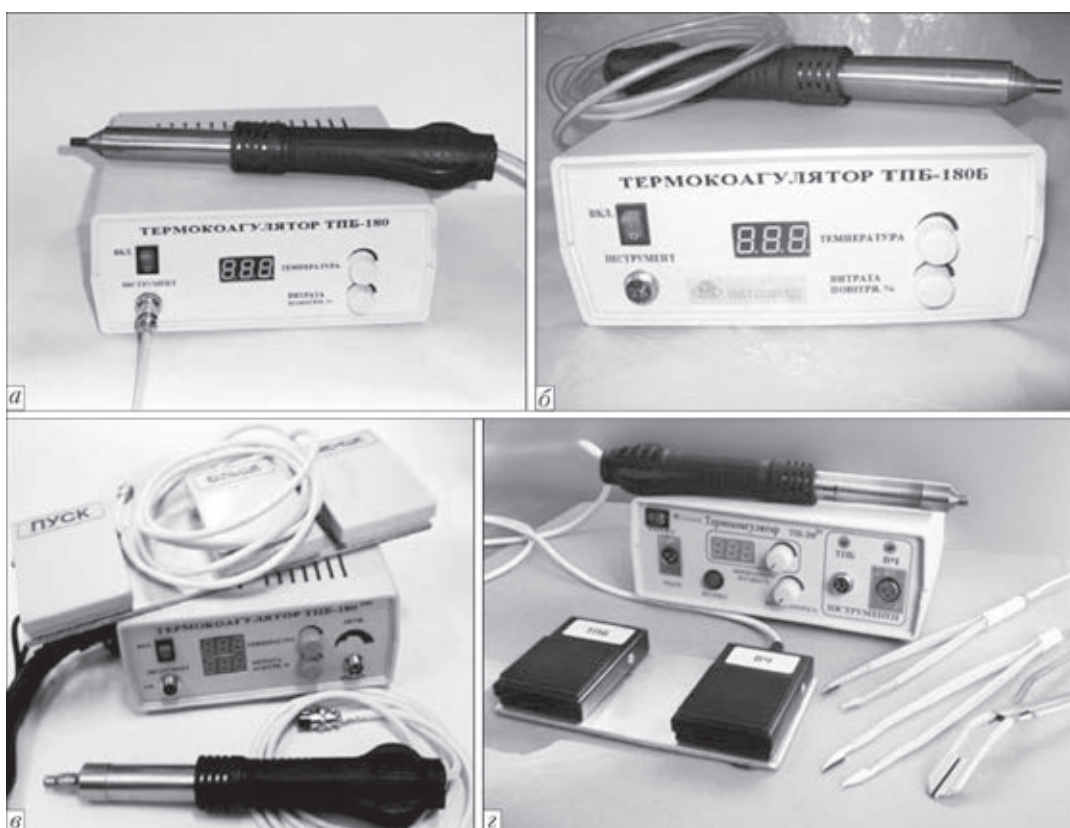


Рис. 14. Аппараты КИ-обработки живых тканей для стационарных операций: а — ТПБ-180; б — ТПБ-180Б; в — ТПБ-180УР; г — ТПБ-200ВЧ



Рис. 15. Хирургическая обработка инфицированной огнестрельной раны КИ-потоком

антибиотикам культур микроорганизмов (клинических штаммов), состоящая из кишечной палочки, пневмонийной клебсиелы, синегнойной палочки, золотистого стафилококка, фекального энтерококка, грибка Кандида. КИ-способ обработки ран успешно прошел доклинические испытания и, по мнению многих ведущих хирургов, целесообразно его широкое внедрение в хирургическую практику. В настоящее время выполнено более 200 оперативных вмешательств с использованием способа КИ-обработки ран и остановки паренхиматозных кровотечений.

С помощью такой аппаратуры возможно оказание первой врачебной помощи пострадавшим в авариях и катастрофах как в полевых условиях, в непосредственной близости от места получения травмы, так и в стационарах. КИ-аппаратура существенно повышает эффективность специализированной и высокоспециализированной хирургической помощи, особенно при политравме и инфекционно-осложненных хирургических вмешательствах [35, 36]. КИ-технология позволяет провести остановку кровотечения из паренхиматозных органов, губчатых костей и сосудов диаметром 1...3 мм, санацию инфицированных и хронических гнойных ран, профилактику гнойной инфекции при боевых травмах, сварку тканей ор-



Рис. 16. Остановка кровотечения КИ-коагулятором и санация инфицированной раны после ампутации фаланги пальца

ганов желудочно-кишечного тракта, коагуляцию тканей для проведения бескровного рассечения, профилактику рецидивов и развития метастазов при удалении опухолей (рис. 16).

Наряду с указанными применениями КИ-способа сварки и обработки живых тканей начата разработка гипертермического метода для уничтожения злокачественных опухолей и метастазов, что является актуальным и перспективным направлением исследований.

Создание многофункциональных аппаратов, сочетающих процессы высокочастотной сварки и КИ-обработки живых тканей, является одной из важных задач при разработке и внедрении нового поколения электротермохирургического оборудования. Первые макетные образцы такого оборудования на базе ЕК-300М1 (рис. 17) проходят сейчас всесторонние клинические испытания. Разработаны макетные образцы КИ-инструментов для аппаратов ЕКВЗ-300 «ПАТОНМЕД». Таким образом, в перспективе большинство высокочастотных аппаратов для сварки живых тканей будут иметь функции КИ — обработки тканей. По отзывам хирургов, сочетание указанных процессов в одном многофункциональном аппарате позволяет выполнять с его помощью до 80 % стандартных хирургических манипуляций [37, 38].

Отдельным высокоперспективным направлением работ ИЭС им. Е. О. Патона является разработка комплексных медицинских технологий, направленных на решение некоторых медицинских



Рис. 17. Многофункциональные аппараты для высокочастотной сварки и КИ-обработки живых тканей на базе ЕК-300М1



проблем. Таких как реконструктивно-восстановительная хирургия, кардио-сосудистая хирургия, офтальмология [39]. Решение этих проблем требует привлечения специалистов различных направлений, отделов и даже других институтов.

Проблема реконструктивно-восстановительной хирургии охватывает материалы, технологии, аппаратуру, хирургические методики, используемые в ортопедии, травматологии, челюстно-лицевой хирургии, стоматологии для повышения эффективности оперативных вмешательств, сокращения сроков восстановления целостности и функций опорно-двигательного аппарата. Отдельные направления касаются также протезирования, онкологии, нейрохирургии и вертебрологии (в части восстановления целостности костей, межпозвоночных дисков, обеспечения подвижности позвоночника).

Например, в ходе оперативного вмешательства по поводу открытых переломов, для получения операционного доступа, остановки кровотечения из крупных сосудов, сваривания отдельных элементов мягких тканей используют высокочастотную сварку живых тканей. Санацию первично инфицированной раны и остановку кровотечения из губчатых костей проводят КИ-коагулятором. Для остеосинтеза используют композиты титана, элементы из биоактивной керамики – биосилата, гидроксиапатитов, β -трикальцийфосфата. Они образует костно-керамический блок, который постепенно замещается полноценной костью. Специальные технологии заполнения дефектов кости гидроксиапатитами с остеокондуктивными и остеоиндуктивными добавками, полученными с использованием нанотехнологий, позволяют существенно ускорить процесс восстановления кости в зоне перелома.

Комплексное использование термохирургических технологий и новых материалов для остеосинтеза и протезирования позволяет проводить одноэтапные реконструктивные операции без извлечения элементов остеосинтеза после восстановления кости.

Перечисленные преимущества и достоинства новых процессов сварки, резки и термической обработки живых биологических тканей позволяют прогнозировать их широкое применение. В перспективе, по мнению авторов, аппараты для высокочастотной сварки и КИ-обработки живых тканей должны стать неизменным атрибутом каждой операционной, каждого операционного стола.

1. <http://valleylab.com/product/es/>.
2. <http://www.ethicon.com/emea/ua/healthcare-professionals/>.
3. <http://www.klsmartin.com/products/electrosurgery/>.
4. <http://www.erbe-med.com/de/medical-technology/public/Products/Electrosurgery>.
5. <http://nii-prikladnoj-elektroniki.uaprom.net/>.

6. *Первый опыт применения высокочастотной электросварочной технологии в трансплантации почки* / А. С. Николенко, С. Н. Завгородний, Н. Н. Поляков и др. // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 27.
7. *Бондарь Г. В. Расширение показаний к применению электросварочного комплекса мягких тканей в онкохирургии* // Сварка мягких живых тканей. Современное состояние и перспективы развития: Материалы Шестого междунар. семинара, Киев, 2-3 дек. 2011 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2011. — С. 58.
8. *Тарнавский Д. В., Чуников А. А. Эффективность использования ВЧ-электросваривания при кастрации козлов, баранов и бычков в условиях УНПК ЮФ НУБиП Украины «КАТУ»* // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 51.
9. *Новые направления исследований в области сварки живых мягких тканей: Материалы Пятого междунар. семинара, 26-27 нояб. 2010 г., г. Киев* / Под ред. О. Н. Ивановой. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2010. — 62 с.
10. *Сварка мягких живых тканей. Современное состояние и перспективы развития: Материалы Шестого междунар. семинара* / Под ред. О. Н. Ивановой. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2011. — 60 с.
11. *Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., 30 нояб. 2012 г., г. Киев* / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — 52 с.
12. <http://www.zvarka.org/>.
13. <http://www.erbe.ru/produksiya/vessel-sealing/>.
14. *Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия. Атлас* / Под ред. Б. Е. Патона и О. Н. Ивановой. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2009 — 200 с.
15. *Новое оборудование ИЭС им. Е.О. Патона для сварки живых тканей* / Г. С. Маринский, А. В. Чернец, В. А. Ткаченко, С. Е. Подпратов // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 42.
16. *Пат. 72577U Україна, МПК А 61 В 18/12. Электрокоагулятор высокочастотный зварювальний ЕКВЗ-300* / Б. Е. Патон, Г. С. Маринский, С. Е. Подпратов та ін. — Заявл. 24.01.2012; Опубл. 27.08.2012, Бул. № 16.
17. *Косаковский А. Л., Косаковская И. А., Семенов Р. Г. Биполярные электроинструменты для высокочастотной электросварки биологических тканей ЛОР-органов* // Новые направления исследований в области сварки живых мягких тканей: Материалы Пятого междунар. семинара, Киев, 26-27 нояб. 2010 г. / Под ред. О. Н. Ивановой. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2010. — С. 56.
18. *Структура электроварного шва как основа нового развития хирургии* / С. Е. Подпратов, С. Г. Гичка, С. С. Подпратов та ін. // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 45.
19. *Влияние высокочастотной электрохирургической сварки на функциональную устойчивость структуры биологических тканей* / А. А. Вазина, Н. Ф. Ланина, Г. С. Маринский и др. // Сварка мягких живых тканей. Современное состояние и перспективы развития: Материалы Шестого междунар. семинара, Киев, 2-3 дек. 2011 г. / Под ред. О. Н. Ивановой — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2011. — С. 53.
20. *Заявка 201209185. Спосіб з'єднання біологічних тканин людей і тварин з використанням високочастотного струму* / Б. Е. Патон, В. А. Ткаченко, Г. С. Маринский та ін. — Опубл. 26.07.2012.



21. *Эффективность* выполнения позадилобковой простатэктомии / А. В. Витренко, С. Е. Подпратов, С. Г. Гичка и др. // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 36.
22. *Деякі перспективи використання височастотного електрозварювання в кардіохірургії* / І. В. Кривцун, Г. С. Маринський, О. В. Чернець та ін. // Міжнар. мед. форум 2012: Наук.-практ. конф. «Результати впровадження в медичну практику технологій загального і локального термічного впливу на організм людини», Київ, 25 верес. 2012 р. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2012. — С. 239.
23. *Пат. 80729U Україна. Біполярний електрохірургічний інструмент (електроніж) для височастотної електрохірургії* / В. А. Васильченко, Г. С. Маринський, О. В. Чернець та ін. — Заявл. 14.12.2012; Опубл. 10.06.2012, Бюл. № 11.
24. *Пасечникова Н. В., Науменко В. А., Уманец Н. Н.* Экспериментальное обоснование возможности применения высокочастотной электросварки биологических тканей в витреоретинальной хирургии // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 22.
25. *Ультроструктурные изменения в тканях орбиты при энуклеации глазного яблока с использованием высокочастотной электросварки биологических тканей* / Н. В. Пасечникова, В. А. Науменко, А. П. Малецкий и др. // Там же. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 44.
26. *Пасечникова Н. В., Науменко В. А., Уманец Н. Н.* Наш опыт применения способа высокочастотной электросварки биологических тканей в ходе эндовитреальных вмешательств // Сварка мягких живых тканей. Современное состояние и перспективы развития: Материалы Шестого междунар. семинара, Киев, 2-3 дек. 2011 г. / Под ред. О. Н. Ивановой — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2011. — С. 24.
27. *Пат. 23204 Україна, МПК А 61 В 17/00.* Спосіб безлігатурного з'єднання дефектів м'яких живих тканин / Б. Є. Патон, І. В. Кривцун, В. С. Гвоздецький та ін. — Заявл. 28.12.2006; Опубл. 10.06.2007, Бюл. № 6.
28. *Пат. 32900 Україна, МПК А 61 В 17/22.* Спосіб санації гнійно-септичних вогнищ підшлункової залози / Ю. О. Фурманов, І. В. Хомяк, В. С. Гвоздецький та ін. — Заявл. 28.12.2006; Опубл. 10.06.2007, Бюл. № 6.
29. *Пат. 20479/ЗУ/11 Україна, МПК А 61 М 11/00, А 61 N 5/00.* Термоструменевий хірургічний інструмент / Б. Є. Патон, І. В. Кривцун, І. Ю. Худецький та ін. — Заявл. 23.05.2011; Опубл. 07.11.2011.
30. *Пат. 70151 Україна, МПК А 61 М 11/00.* Спосіб здійснення хірургічних операцій / І. А. Сухін, І. В. Кривцун, І. Ю. Худецький та ін. — Заявл. 29.11.2011; Опубл. 25.05.2012.
31. *Пат. 30372 Україна, МПК А 61 В 18/04.* Спосіб лікування вогнепальних ран / Б. Є. Патон, В. С. Гвоздецький, Ю. О. Фурманов та ін. — Заявл. 25.10.2007; Опубл. 25.02.2008, Бюл. № 4.
32. *Usage of portable thermo-spray device for treatment of wounds contaminated by microbes* / I. Khudetsky, I. Krivtsun, V. Gvozdetsky, J. Furmanov // Counteraction to chemical and biological terrorism in east european countries. — Dordrecht: Springer, 2009. — P.303–308.
33. *Подальший розвиток апаратури для зупинки кровотечі, обробки і лікування інфікованих ран високотемпературним потоком* / І. Ю. Худецький, І. В. Кривцун, В. Г. Терехов та ін. // Клінічна хірургія. — 2010. — № 7. — С. 53–55.
34. *Дослідження впливу на паренхіматозні органи високотемпературних способів розсічення та коагуляції тканин в експерименті* / І. А. Сухін, І. Ю. Худецький, С. Г. Качан, О. М. Билиловець // Там само. — 2012. — № 1. — С. 76–78.
35. *Contactless convection-infrared technology to thermal surgery* / I. Khudetsky, I. Krivtsun, J. Furmanov, I. Suchin // Proc. of the special forum & exhibition on best of east-for eastern partnership: Challenges and opportunities for collaboration European Union–Poland–Eastern Europe Countries, Warsaw, 28-30 Nov. 2011; Poland and 4th Intern. science and technology days Poland-East, Bialowieza, 12-14 Apr. 2011. — Bialystok: ORGMASZ, 2012. — P. 37–47.
36. *Моноблочное использование аппаратов высокочастотной электрической сварки биологических тканей и пневмо-термокоагуляции в хирургии* / И. А. Сухин, С. Г. Качан, А. Н. Билиловец и др. // Клінічна хірургія. — 2011. — № 5. — С. 48.
37. *Перспективы дальнейшего развития многофункциональной и специализированной термохирургической аппаратуры* / И. В. Кривцун, И. Ю. Худецкий, И. А. Сухин и др. // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского. — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 48.
38. *Creating innovative equipment and technology for the specialized care in cardiology, orthopedics, dentistry and maxillofacial surgery* / I. Krivtsun, I. Khudetsky, R. Kamalov et al. // Materials 6th Intern. forum on innovative technologies for medicine ITMED 2012, Bialystok, 21-23 Nov. 2012. — Bialystok: Innovative Eastern Poland assoc., 2012. — P. 39.
39. *Комплексні електротермохірургічні технології, апаратура та інструменти для стоматології та щелепно-лицевої хірургії* / І. Ю. Худецький, Р. Х. Камалов, В. О. Пономаренко та ін. // Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы: Материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., Киев, 30 нояб. 2012 г. / Под ред. Г. С. Маринского — Киев: Междунар. ассоциация «Сварка», 2012. — С. 49.

Поступила в редакцию 10.06.2013



RECRUITING AND PREPARING SKILLED PERSONNEL FOR LEADERSHIP ROLES IN WELDING AND BRAZING

N. Cole, J. Weber, M. Pfarr, D. Hernandez

The American Welding Society, Doral, FL, USA. E-mail: nccenqr@gmail.com

A shortage of welders and welding professionals is felt globally, and it will worsen as the current skilled and educated leave the workforce. Thus, many countries are actively designing programs to improve the image of welding and to train and educate persons to meet those needs. Virtual welding, by means of computer simulation, is one method of introducing and exciting the young about welding. Some companies are even using the virtual welder as to test or even give basic training to new employees. Females are 50% of the population, yet too few choose welding. We have good role models in the many different areas of welding and they are highlighted here. Once persons are interested in welding, they need to be properly trained and educated. Weld-Ed is a program in the USA that has 1) a model curriculum for 2-year colleges; 2) a program to update and upgrade instructors; 3) a method of pairing industry with schools and colleges to offer necessary skills and knowledge for available jobs. New technology is being used by several countries in a variety of ways to enhance training and education. Several types, including online learning and electronic devices, will be described. As persons become skilled and educated, they need a way to prove their competence. A cost-effective means of demonstrating their competence is a Certification Program. Bright young persons are needed in welding science and technology to meet national and global challenges. Our future, structures, and infrastructure depend on them. 2 Ref., 17 Figures.

Key words: educating, computer simulation, virtual welding, Weld-Ed program, Certification Programs

1. Introduction

At present, there is a worldwide shortage of welders and welding professionals. Persons around the world emphasize that we need to attract and train more persons to enter and contribute to welding and brazing. Of the half-million or so welders presently working in the United States, the average age is in the upper 50s, and some 50,000 of these skilled craft-people retire each year. At the same time, there is a growing need for professional welding personnel in national infrastructure, energy production, petrochemical and many other industries. If this need is not met, the U.S. welder shortage could reach a quarter million by 2019.

However, the need is for skilled and educated welding professionals. Since 2009, the unemployment rate has risen dramatically in the United States. Data from the Bureau of Labor and Statistics indicate that this spike in unemployment has disproportionately affected «blue collar» workers. Yet, the high unemployment rate affecting the manufacturing industry is inconsistent with manufacturing job market. While the manufacturing industry is experiencing high unemployment rates, it also reports a large number of unfilled, high-paying jobs. This separation between the larger numbers of unemployed workers and open positions can be attributed to the «skill gap» existing in the workforce. This «skill gap» is formed by the separation between the skill or knowledge base needed to compete in the global marketplace and the skill or knowledge base currently held by the workforce.

A skills gap study looked for a means of determining the nature of the skill and talent gap in the manufacturing industry in the United States [1]. The survey was answered by more than 1,100 executives from all fifty states in the USA. The Skill Gap Report indicated that 67% of manufacturers in the United States describe a moderate to severe shortage of «available, qualified workers». In addition, the survey indicates that 5% of current jobs (approximately 600,000 jobs) at responding manufacturers are unfilled due to a lack of qualified workers.

This skill gap is further complicated by the necessary evolution occurring in the welding industry. The American Welding Society's Vision for Welding Industry report states: «Until recently, welding itself was a skill that craft people could learn without a real understanding of the science behind it. The scientific and engineering principles behind welding must replace the art of welding for it to achieve its potential as a preferred state-of-the-art manufacturing process [2].»

Thus we have a need, but we must attract persons to the field by effective means, and we also must overcome a pervasive incorrect image and then provide the necessary training and education.

2. Attracting persons to the welding and brazing profession

2.1. Welding Offers Numerous and Varied Job Opportunities

The skilled worker problem is exacerbated by the fact that welding has long had an image problem. Many students, parents and guidance counselors hold an out-of-date perception of welding as an unpleasant and dangerous occupation suitable only for those who

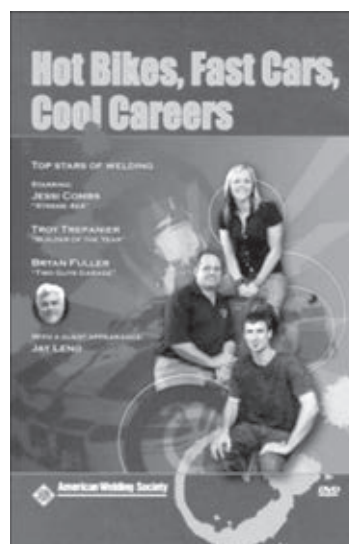


cannot, or do not wish to, pursue university educations. In fact, welding as a profession offers many opportunities at all levels of employment in energy, defense, manufacturing, construction, aerospace, shipbuilding, utilities, repair, environmental applications — in short, wherever metals are permanently joined. Job opportunities start with the welder, but also include engineer, inspector, educator, researcher, business owner, equipment sales, computer programming and more. Workplace environments include manufacturing facilities and construction sites in just about every industry imaginable. And, potential income is high, often significantly higher than that achieved by university graduates in other fields. The average starting salary for graduates of the Tulsa Welding School in Jacksonville, Florida, is \$42,800USD (32,400EUR) and it increases rapidly as new skills are developed. Pipeliners on Alaska's North Slope oil fields have earned as much as \$1000USD (757EUR) a day.

2.2. Spreading the Word through Print Publications and Videos

One of the first steps taken by AWS was publishing a guide to available careers in welding, as well as establishing a Web site devoted to explaining employment opportunities in the field. This was followed by a special edition of an Iron Man comic book commissioned by AWS with the Marvel Comics Group. Aimed at a younger audience (9-15 years of age), the comic used the action hero's print medium to tell a story of career opportunities in welding.

This was followed by establishing links with several television personalities in the United States starring in reality shows that feature welding. These included Troy Trepanier, named hot rod «Builder of the Year»; Brian Fuller, of «Two Guys Garage»; and female welder Jessi Combs of «Extreme 4X4.» AWS also visited well-known television talk show host and automobile collector Jay Leno, who recorded a video segment testifying to the importance of welding and the well-paying job opportunities in the field. AWS then produced a DVD — «Hot Bikes, Fast Cars, Cool Careers» — featuring all four personalities and dis-



AWS Produced DVD

tributed thousands of copies through schools, trade shows, career days, and the society's 160 member Sections throughout North America. Of course, the entire contents of the video were also posted on the AWS Web site.

For those individuals who gained a basic interest in welding, AWS established a Welding School Locator on its Web site that lists thousands of schools across the country that can provide quality welding education. The Society also launched a separate Web site, www.jobsinwelding.com that brought together trained welding personnel and potential employers. That valuable tool contains over 88% of the welding jobs posted anywhere on the internet.

2.3. Publicity through Outside Media

AWS has also successfully sought media publicity about the shortfall of needed welding personnel. This has resulted in major stories on the subject in the New York Times, U.S.A. Today, Atlantic Monthly and many other publications. Television and radio networks have also broadcast stories on the need for welding workforce development. One of the most widely heard of these was a radio interview with AWS Marketing/Communications Director Ross Hancock on the BBC World News.



Career In Welding BrochureIronman Comic Book CoverIronman Comic Book Inside Page



2.4. The Careers in Welding Road Show

Another method of putting the word out about welding careers was to plan a road tour where interested parties could actually get the feel of welding. Through the inspiration of 2012 AWS President William Rice, and with a large donation from The Lincoln Electric Company, AWS designed and built a 53-ft (16m), over-the-road tractor trailer with over 650 sq.ft. (60 sq.m.) of exhibit space to travel throughout the U.S. and Canada promoting career opportunities in welding.



AWS Trailer Containing Virtual Welders and Welding Exhibits

Lincoln Electric donated five VRTEX 360 virtual welding simulators to give trailer visitors a realistic sense of the welding experience. The simulators also provide a score for each person using them to help measure aptitude for the profession. The trailer was previewed in late 2011 at the Future Farmers of America National Convention, where it attracted more than 5,000 young people interested in welding. It has since been featured twice at the FABTECH show in the U.S., at FABTECH Canada, at several State Fairs, at the Indianapolis 500 auto race, and at other specialty events with a focus on welding. It reached over 35,000 individuals in its first year and is designed to excite young people about the many career opportunities available in the welding industry.

2.5. Image of Welding Awards

Yet another important step AWS has undertaken to improve the public perception of welding is establishing the annual Image of Welding Awards. These prestigious awards are presented each year at the FABTECH show to honor individuals, companies and AWS Sections that have shown outstanding achievement in promoting welding careers and creating a positive image for the profession. The awards include presentation of a handsome trophy, and the winners receive media recognition in numerous trade publications and local media.

2.6. Boy Scouts of America Welding Merit Badge

To further interest youth in welding careers, AWS has worked with the Boy Scouts of America (BSA) in establishing a Welding Merit Badge, officially launched in 2012. Boy Scouts earn the badge by studying welding technique and completing a welding project. To help them prepare, many AWS volunteers



Boy Scouts of America Welding Merit Badge

actively work to train and counsel the scouts attempting to earn the badge.

2.7. Social Media Involvement

A recent effort by AWS to publicize welding careers has been to become strongly involved in Facebook, Twitter and other social media. AWS has launched a Facebook page that actively promotes careers in welding. The Society has also hired a permanent staff expert in social media.

2.8. Women in Welding and Brazing

The above efforts target the general population worldwide and youth in particular. However we need to target another specific audience. Women make up about 50% of the population at large, but their percentage in welding and brazing is much lower. In fact in the USA, the Department of Labor estimates that women in welding make up no more than 6% and female welders are probably no more than 2%. That population provides a great opportunity to increase the numbers of welding professionals. In the USA during World War II, women stepped into the workforce to meet the country's need. Rosie the Riveter was advertised, but there was also Wendy the Welder and Barbara the Brazer. Women can do it again and in fact we have plenty of female role models, we just have to let them be known. Below are several women who are effective role models.

Callie Jones Hughes is a welder at P&H Mine Pro in Wyoming. She has a family history of welders. Her great grandmother welded during World War II, and her grandfather on the other side of her family welded in a shipyard. She says, «I would love to inspire other women to be welders. I think it is very neat that I had past family members who were welders on both sides.»

Another welder is Melissa Hall, who has been welding since the 9th grade. She has an Associate Degree in Welding and Fabrication from Triangle Tech in Sunbury, Pennsylvania, and is a member of Local 520 of the Plumbers and Pipefitters Union. She does welding for nuclear and shale gas companies.

Chris Monroe is a welding trainer at Hobart Brothers, Troy, Ohio. She sums up the opportunity well: «There's an opportunity in this industry to have a



Welder Callie Jones-Hughes



Trainer Chris Monroe

career for life. You can work on the manufacturing floor or in the field as a welder, or as an ironworker building a stadium. You can become an engineer and develop welding products or travel around the country as a Certified Welding Inspector

Other role models are members of AWS Board of Directors. Nan Samanich is District Director 21 and is an AWS Certified Welding Inspector (CWI) and Welding & Metals Technology Instructor at Desert Rose High School and Career Center, Las Vegas, Nevada. 2014 Incoming District 20 Director, Pierrette Gorman, has a B.S. in Welding Engineering Degree from The Ohio State University (OSU), Columbus, Ohio, and she's a laser and soldering specialist at Sandia National Lab, Albuquerque, New Mexico. She went to OSU at the age of 40 to get that degree.

Robin Gourley is a Materials Engineer at Cur-



Welder Melissa Hall

tiss-Wright, Cheswick, Pennsylvania. She's responsible for metal brazing processes of pumps and motors for commercial and naval products. She has been an active member of the AWS Brazing and Soldering Committee for over 15 years and has presented papers and been responsible for helping organize the successful International Brazing and Soldering Conference for many years. She also writes for the Brazing Handbooks.

Hui Zhao of Creative Thermal Solutions, Urbana, Illinois, is one of the few females who has a PhD and is working in the joining field. Her undergraduate work was in China and she earned her PhD in Mechanical Engineering at the University of Kentucky. She is pictured in front of her lab furnace where she is able to observe the brazing of micro channel heat exchangers. An enlargement of the heat exchanger is also shown.

Deanna Postlethwaite of Lincoln Electric Co., Cleveland, Ohio, is in Technical Marketing. She says, «I am enjoying the opportunity to provide solutions to companies to keep productive manufacturing in the



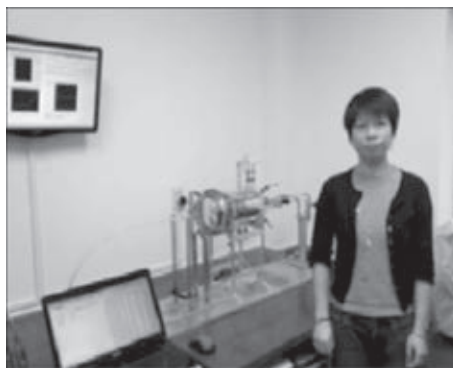
CWI Nan Samanich



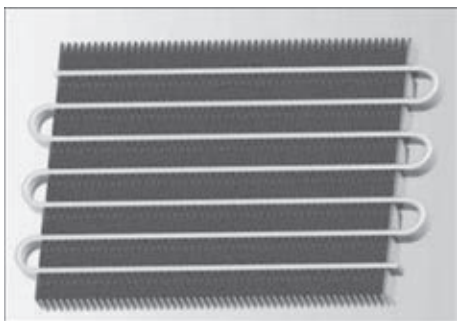
Welding Engineer Pierrette Gorman



Materials Engineer Robin Gourley



Brazing Engineer Hui Zhao



Microchannel Heat Exchanger (Enlarged)

USA. I am also actively involved in the development and marketing for our virtual reality welding solution.“

Claudia Bottenfield, former AWS District Director from Maryland was a single mother raising two sons and welding sales provided the income she needed.



Welding Class at Floresville High School, South Carolina

She says, «Four years after starting at Arc Welders, I was asked if I wanted to sell our products to end users. I jumped at the possibility since I would be the first woman in the Baltimore area to ever have accomplished this feat.

Karen M. Gilgenbach has many credentials, CWI, CWS, CRAW-T, WTC-WI, B.S. Engineer. She is also a Weld Process Specialist with Airgas, Inc., and the Past Chair, AWS Milwaukee Section. She is also known as a very good welder.

These women are only a few of the female role models working in welding and brazing, so we do have role models who are leading the way. However, because their percentage is currently small, females need to be encouraged in all possible ways. They need mentors and need to be given opportunities.

The general public needs to know that welding and brazing is a great field for both men and women with many opportunities in a variety of occupations. Hopefully, in the future we will see more instances like the welding class in Floresville High School with a ratio closer to the world's population of 50/50 of women to men.

2.9. Obtaining National Science Foundation Funding

In 2007, AWS teamed with Ohio State University, Lorain County (Ohio) Community College and other educational institutions and created the National Center for Welding Education and Training (Weld-Ed) using a financial grant from the National Science Foundation. Operational partners for Weld-Ed include AWS through its Foundation, Lockheed Martin, The Lincoln Electric Co., and a number of schools – all committed to increasing the number and quality of welding and materials joining technicians to meet industry demands. In addition, Weld-Ed's network has grown to include over eighty education and industry affiliates who participate in the Center's programming and utilize its resources.

One important result of this partnership was a joint AWS/Weld-Ed publication designed to promote careers in welding. Titled «In Demand – Careers in



Karen Gilgenbach with other AWS members



Tech Marketer Deanna Postlethwaite



Welding Sales Claudia Bottenfield



In Demand – Careers in Welding Publication

Welding,“ the magazine contains articles promoting welding as a dynamic field with a strong future, personnel profiles with realistic salary figures, technical facts about welding, and more. So far, more than 50,000 copies of the magazine have been distributed, and an on-line version www.careersinwelding.com, has proven equally popular. The site contains useful information for students, parents, educators, and counselors, as well as welding professionals.

3. PROVIDING PROPER TRAINING AND EDUCATION

Attracting persons to the welding profession is not enough. It's the skilled and educated welding professional that is in high demand. Therefore, several means of delivering the necessary skills and education have been devised locally and internationally. Canada has a case study of a modern welding education facility that uses technology to enable multiple students to see the instructor and activity clearly and is used to illustrate a variety of application technologies. The IIW has designed a system that ensures that qualified students can be admitted to welding training and education courses in a wide range of personnel categories. These students benefit by taking courses that are harmonized across national boundaries and their diplomas can be recognized as equivalent. This system has proven advantages in closely related economies such as the European Union. Sweden has adopted that method and now has welding as a specialization that is available in upper secondary schools. Sweden is considered to be a role model for that method of providing a welding education.

In the USA, we are pursuing other models. Schools, colleges and universities teach welding in the traditional way in a classroom and lab setting, but their curriculum may vary depending on the school and location. We tend to measure outcomes – the skills the student has obtained and what has he/she learned, which is the basis of the certification programs, rather than where the person received their training. However, different means of providing the skills and education are being developed.

3.1. Weld-Ed

Weld-Ed strives to improve the quality of education and training services to address the hiring and professional development needs of the welding industry. Weld-Ed has three overarching goals that drive its activities.

1. Increase the number of welding technicians to meet workforce needs. This goal is accomplished in partnership with the American Welding Society and involves several initiatives. The first is the development and distribution of recruiting materials for middle school, high school, and college age students, covered above. Additional, very successful resources have been developed, including a DVD — Improving their Competitive Edge: Students in Welding. AWS and Weld-Ed also collaborated on a resource for secondary educators to use in their math and science classrooms. Engineering Your Future explores the ever-increasing relationships among science, technology, and society. The goal of the program is to excite students about some of the natural laws of physics and their application in the technological world in which we live, while perhaps guiding them to consider science-based careers. In the first six months since its introduction, over 4,900 free copies were distributed.

2. The second initiative involves disseminating the message that careers in welding are abundant, highly skilled, and utilize advanced technology. The Careers in Welding trailer, described earlier, reached over 35,000 individuals in its first year. This mobile exhibit features the five arc welding simulators as well as interactive exhibits designed to excite young people about the many career opportunities available in the welding industry.

3. The third initiative includes research on welding industry trends. In 2010, Weld-Ed released The State of the Welding Industry report, a comprehensive examination of the welding industry, including industry and workforce data by region, figures for new and replacement workers needed, and recommendations on filling the gap in the welding education pipeline. The employment projection data is continuously updated and currently shows a need for over 310,000 welders, inspectors, technicians, and engineers by 2019.

3.1.1. The comprehensive reform of welding technician education

In 2011, the Weld-Ed Center published a national core curriculum model. This core curriculum, appropriate for all postsecondary Welding Technician education programs, provides a validated listing of the core of what students should know and be able to do after completing a welding technician program. A student learning outcome specifies what a student should learn as a result of their education experience in the classroom and laboratory. That experience might also include internships or other industry experiences. An



outcome reflects the consequences or results of what the student learns, not what the instructor teaches. The student learning outcomes listed in the model are not intended to describe every conceivable student learning outcome that a postsecondary welding technician program might include. In fact, it is expected that most programs should include additional student learning outcomes that are germane to the specific location where students may be employed.

3.1.2. Enhance faculty professional development and continuing education

Weld-Ed has developed a series of professional development modules for secondary and post-secondary educators. These modules incorporate the list of student learning outcomes from the national core curriculum model and thus prepare educators for successful instruction in a welding technician program. The core professional development program includes four modules, typically offered in the summer months, with each module consisting of one week of instruction.

3.1.2.1. Welding Metallurgy and Weldability of Commercial Alloys

This course covers the concepts and fundamentals of atomic structure, grain structure, heat flow, phase transformations, welding metallurgy, and the weldability of ferrous and non-ferrous commercial alloys. Laboratory work consists of welding metallurgy investigation on welded samples and weldability testing for specific applications.

3.1.2.2. Cutting and Joining Processes

This course covers the basics and principles of major joining and cutting processes. Advantages, disadvantages, equipment, consumables, techniques and variables for each process are discussed. Applications, criteria for consumable selection, and how to establish process parameters are emphasized. Laboratory work involves equipment set up and operating of the welding and cutting equipment for specific applications.

3.1.2.3. Design for Welding, Fabrication, Assembly and Robotic Welding

This course covers the concepts and fundamentals of the design for welding, fabrication, assembly and robotic welding. Laboratory work consists of case studies using standard design equations to determine the behavior of welded materials, part processing and optimization of fabrication, design considerations for work holding and manipulating equipment, and the programming and operating of robots for GMAW welding.

3.1.2.4. Weld Quality and Inspection, Welding Codes, Specifications and Safety

This course covers the concepts and fundamentals of weld quality and inspection methods, welding codes, specifications, and safety. Laboratory work

consists of setting up and operating the instruments and equipment for identification and characterization of weld discontinuities and defects.

These four professional development modules have been offered for three summers to over 275 educators. The success of these core modules led the Weld-Ed team to develop two additional one-week modules to be offered for the first time in summer 2013. These include the following:

3.1.2.5. Laser Welding

This course covers the concepts and fundamentals of laser welding technology including basic optics, laser welding systems and welding process optimization, and metallurgy of laser welds. Laboratory work consists of case studies that involve optimization of laser welding equipment and identification and characterization of weld discontinuities and defects.

3.1.2.6. Efficient and Effective Welding Technician Instruction

This course covers the foundations of welding technician education; program needs assessment and program development, developing program and course objectives, a survey of learning theory, laboratory development, teaching methods, and classroom management techniques.

In addition, Weld-Ed offers an annual Educators Conference in conjunction with the FABTECH show. This one-day conference is open to educators and industry trainers and features updates on Weld-Ed offerings, best practices from educators, and presentations and free resources from Weld-Ed industry partners. More than 200 individuals have taken advantage of this outstanding programming over the past few years.

As Weld-Ed looks to the future, plans include continuous improvement of the existing professional development modules; expansion of professional development opportunities to include the advanced needs of industry; investigation into new delivery approaches for education and training such as on-line and blended delivery; growth of offerings to include consulting in needs assessment, program design, program improvement; identification of future strategies to sustain the existence of the Center.

3.2. AWO — American Welding On-Line

AWS statistics of the welding industry in the United States show an abundance of school programs dedicated to the entry-level and advanced-level welding, but precious few programs dedicated to welding supervision, inspection, or engineering. As the welding certification body in the United States, AWS provides some training in the bodies of knowledge for each of these fields, but that training has historically been limited to survey courses helping students review prior to examination. These courses are not designed to instruct on fundamentals, nor are they meant to teach the subject to individuals interested in entering those



career fields. Rather, these courses are developed for individuals already functioning in those roles to fill in knowledge gaps in preparation for examination. Individuals seeking to enter into one of welding careers fields with little or no prior knowledge are most commonly left to rely on self-study. Recognizing this shortcoming, the American Welding Society is utilizing American Welding Online as a means of establishing profession pathways for individuals seeking to advance their careers. Instead of teaching only the advanced knowledge needed for test preparation, American Welding Online courses span the gamut of knowledge levels from those who are looking to break into the field, to those who are well established. With the development of AWO, individuals will no longer need to seek out specialized schools or training programs to learn the variety of skills needed to obtain an AWS Certification. Clear, interconnected curriculums provide the learner with career pathways that can take them from entry level to certification.

AWS recognizes that in order to close the widening skill gap in the welding industry new means of training welding personnel are required. In an effort to address these issues, the American Welding Society developed American Welding Online (awo.aws.org). American Welding Online, or AWO, is a virtual educational community dedicated to training the welders and welding personnel of the future. The foundation of AWO is a simple principle: To provide welding education to anyone, anywhere, and at any time. In order to fulfill this mission, AWS has adopted a modular approach to American Welding Online.

The cornerstone of American Welding Online is the library of e-learning courses and virtual conferences offered by AWS. These seminars are offered asynchronously, allowing students from around the world to access the course content on their own schedule and complete the program at their own pace. The American Welding Society offers multiple levels of training and testing, from entry level certificate training to advanced certifications. Through American Welding Online, AWS currently offers several online courses including the Certified Welding Sales Representative Program, Welding Fundamentals, Safety in Welding, Math for Welders Level I, Understanding Welding Symbols, Welding Metallurgy, and the soon to be released The Science of Non-Destructive Testing, Welding Economics, and Lean Management for Welding Shops courses.

All American Welding Online courses are built to teach the necessary knowledge base while focusing on STEM (Science, Technology, Engineering, and Math) education. Unlike most welding education currently in the marketplace, AWO courses do not focus on the physical act of welding, but rather the theoretical base; the scientific and engineering principles;

critical thinking; and problem solving. Courses, such as the AWS Welding Fundamentals seminar, provide science-based education on six of the most common welding processes: Oxyfuel Welding, Shielded Metal Arc Welding, Gas Tungsten Arc Welding, Gas Metal Arc Welding, Flux Cored Arc Welding, and Submerged Arc Welding. The seminar provides in-depth study of these welding processes through the use of diagrams, animations, high-definition videos, and synchronized audio narration. The seminar study material is presented in a thoughtful way that challenges participants to think critically about the topics. For example, when reviewing Shielded Metal Arc Welding, the course does not simply review the basics of how the process works, instead it examines the practical application of SMAW, the science of the welding arc, and how various welding variables, such as travel speed or amperage affect the final weld. The seminar also integrates education on higher knowledge skills such as welding electrical theory, welding metallurgy, and welding discontinuities. The participants receive constant feedback and reinforcement in form of interactive elements, practice problems, quizzes, and in some courses, workbook practice. The combination of interactive instruction and constant feedback provides participants the opportunity to use high-level thinking skills and critical thought to understand deeper connections in the instruction material.

Almost as important as offering professional pathways, American Welding Online allows learners to take ownership of the educational process, customizing the experience to their individual needs. The on-demand training offered through AWO allows the user to determine which courses in the professional pathways are suitable for their knowledge level. This customized curriculum provides learners with the most time- and cost-efficient means of gaining the knowledge necessary to advance in their careers.

As of February 2013, American Welding Online began offering synchronous learning opportunities in the form of monthly webinars. These live training opportunities offer the individual the opportunity to learn from experts in a variety of fields from anywhere in the world. In addition to the ability to access this training from any computer in the world with an internet connection, these webinars allow the learner to ask direct questions to a live instructor/ expert, network with like-minded participants, and contribute their own experiences to the educational process. In order to reach the largest number of individuals possible, AWO will also host recordings of these webinars on American Welding Online so that those individuals who could not attend can still access the information.

Aside from the asynchronous and synchronous learning opportunities offered through American Welding Online, AWS continually offers informal



learning opportunities such as the Professional Program Podcast. This complimentary podcast can be downloaded to any portable device through the AWO Podcast page on iTunes (<https://itunes.apple.com/us/podcast/american-welding-online/id505523313>) or watched directly through the AWO website. AWO will also be launching a series of phone and tablet apps geared towards allowing individuals to learn in informal environments. The AWS app library will consist of apps designed to help prepare individuals for the Certified Welding Inspector exam (both D1.1 and API 1104 versions), as well as virtual welding apps with both educational and entertaining aspects meant to draw interest to the welding field while educating the user through the use of a game.

With the advent of American Welding Online, the American Welding Society is realizing its goal of bringing welding education to anyone, anywhere, and at any time. This multifaceted response to the growing gap of skills and knowledge needed to compete in a global economy will ensure that all levels of the welding industry, whether the entry-level student or the professional, are provided the opportunity to obtain the education required for the technologically advanced jobs of tomorrow and today.

4. CONCLUSIONS

The worldwide need for skilled and educated welding professionals is recognized by those working in the field, but people who could potentially fill that gap must be reached. Therefore a concerted effort is underway to improve the image of welding and

to reach the general public, as well as targeted populations, such as youth and women. Media such as publications, brochures, videos, DVDs, and TV personalities are targeting the general population. Youth are also targeted through Iron Man Comic Books, the virtual welders, BSA merit badge and social media. Women in welding are highlighted as role models to interest females and their parents.

Once persons are interested they need to be properly trained and educated. A variety of means of delivering those skills and education are underway depending on the location in the world. Most countries have schools, colleges and universities that teach welding. AWS in co-operation with Weld-Ed has programs to reach youth and to provide a model welding technology curriculum and courses for faculty professional development and continuing education. AWS has launched American Welding On-Line to provide a welding education to anyone, anywhere, at any time and dedicated to training the welders and welding personnel of the future.

These projects as well as others are focused on successfully educating the population on the needs and opportunities, then providing the training and education necessary for welding professionals to properly build our infrastructures and provide the workforce for energy production and many other industries.

1. (2011) *The Manufacturing Institute and Deloitte Consulting LLP Skills Gap Study*, July-August.
2. American Welding Society & The United States Department of Energy 2009. *Vision for Welding Industry*.

Received 09.09.2013

ПОДПИСКА — 2014 на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	2700 руб.	5400 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайтах:
www.patonpublishinghouse.com; <http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf.

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив,
включающий все выпуски за 2009–2012 гг. и текущие выпуски 2013 г.

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
- Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
- Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
- Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
- 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0

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

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию
- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 10.07.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 18,02. Усл.-отт. 19,0. Уч.-изд. л. 20,10 + 10 цв. вклеек.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

Я. И. МИКИТИНУ — 70



Ярослав Иванович Микитин — председатель правления Публичного акционерного общества «Каховский завод электросварочного оборудования», Герой Украины, академик Академии инженерных наук Украины и Американской академии бизнеса, заслуженный машиностроитель, член

Высшего научно-экономического Совета Украинского фонда научно-экономического и юридического сотрудничества.

Я. И. Микитин родился 22 октября 1943 г. в селе Дорогичевка, Залещицкого района, Тернопольской области.

В 1968 г. закончил Кишиневский политехнический институт, получил специальность инженера-механика. В 1969–1973 гг. работал в Каховском тресте совхозов Херсонской области на должности инженера и главного инженера.

С 1973 г. и по настоящее время работает на Каховском заводе электросварочного оборудования, где прошел путь от начальника конструкторского бюро до директора завода (1990) и председателя правления ПАО «Каховский завод электросварочного оборудования» (1996).

Высокий профессионализм позволил Ярославу Ивановичу успешно реализовать проектно-конструкторские и технологические разработки по созданию и внедрению в производство первых образцов комплексов «Дуга», «Стык» для развития Ямбургского газоконденсатного месторождения. В чрезвычайно сложных условиях перехода страны на принципы рыночной экономики Я. И. Микитин обеспечил стабильные финансово-экономические показатели работы завода.

Сегодня КЗЭСО — наибольшее в СНГ предприятие по выпуску универсального и специализированного оборудования для дуговой и контактной сварки. Среди них автоматы и полуавтоматы для дуговой сварки А-1416, АД-231, ПДГ-603М, источники питания КИУ-501, ГАРТ-160, контакт-

ные точечные и шовные машины КТ-007, КТ-009, МТ-2202 и др.

Большая заслуга Я. И. Микитина в развитии и укреплении тесного научно-технического сотрудничества завода с ИЭС им. Е. О. Патона, продолжающегося вот уже 40 лет. Это позволило создать ряд рельсосварочных машин нового поколения, превышающих по своим характеристикам зарубежные аналоги. На предприятии организовано серийное производство современного рельсосварочного оборудования — машины К 920, К 922, К 924, К 945, К 1000, К 1100 и мобильных комплексов КРС-1, КСМ-005. Это оборудование успешно конкурирует с лучшими образцами техники ведущих зарубежных фирм и эксплуатируется в 76 странах мира, в частности в США, Австрии, Китае, Южной Америке, Канаде, Австралии, Индии.

В последнее время завод совершенствует продукцию, последовательно расширяя перечень оборудования. Благодаря личным качествам Я. И. Микитина — эрудиции, технической дальнзоркости, творческому подходу при решении проблем — неуклонно поддерживается процесс обновления и модернизации продукции с использованием последних достижений науки и передовых технологий.

За эффективную организаторскую работу, высокий профессионализм, весомый вклад в создание производственно-технического и интеллектуального потенциала компании КЗЭСО, которая вошла в число мировых лидеров электросварочной техники, Я. И. Микитин удостоен ряда наград и званий: премии Совета Министров СССР в области науки и техники (1987), звания «Заслуженный машиностроитель Украины» (1995), почетной грамоты Кабинета Министров Украины (1999), 1-й Золотой медали «За эффективное управление» по решению Международной кадровой академии (2000), Почетной грамотой Верховного Совета Украины (2004), звания «Герой Украины» (2004) с вручением ордена Государства.

Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему доброго здоровья, долгих лет жизни, вдохновения в дальнейшем плодотворном труде на благо Украины.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия журнала

СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Крым, Большая Ялта,
Дом творчества ученых «Кацивели» НАНУ, 22 – 26 сентября 2014 г.



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

*Конференция посвящена памяти
академика НАНУ В.И. Махненко*

Тематика конференции

Математическое моделирование:

- ♦ физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловложений при сварочном нагреве;
- ♦ процесса переноса металла при сварке;
- ♦ образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- ♦ кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- ♦ кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- ♦ зависимости химический состав — микроструктура — механические свойства;
- ♦ кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин и условий их предупреждения;

- ♦ термдеформационных процессов при сварке давлением с учетом больших деформаций;
- ♦ транспорта водорода в сварных соединениях;
- ♦ оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- ♦ остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- ♦ деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- ♦ процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний.

**Информационные технологии в сварке,
наплавке и нанесении покрытий.**

- ♦ Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский.
- ♦ Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 3 июня 2014 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.
- ♦ Требования к оформлению тезисов. Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кель 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 03.06.2014 г. Рассылка второго информационного сообщения до 17.06.2014 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 15.07.2014 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com



ЦЕНТРАЛЬНАЯ ФИЛЬТРОВЕНТИЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА AIRTECH — ГАРАНТИЯ ЧИСТОГО ВОЗДУХА НА ПРОИЗВОДСТВЕ*

Вы не справляетесь с устранением загрязненного воздуха на вашем предприятии? Мы предлагаем Вам решение данной проблемы и представляем Вашему вниманию центральную систему AIRTECH от немецкой компании ТЕКА — ведущего производителя фильтровентиляционного оборудования в Германии!

Система AIRTECH, тип Stand Alone



Система AIRTECH – Stand Alone предназначена для снижения концентрации вредных примесей в воздухе путем забора загрязненного воздуха, его фильтрации и затем возвращения очищенного воздуха в цех. Удаление дымов и аэрозолей в помещении происходит благодаря постоянной фильтрации загрязненного воздуха фильтр-картриджами с автоматической системой очистки POWERSPRÜH-System. Система AIRTECH – Stand Alone обеспечивает удаление до 99 % вредных частиц и имеет допуск для удаления и фильтрации дыма класса W3 (высоколегированная сталь). Эффективность AIRTECH – Stand Alone подтверждена сертификатом Немецкого института по охране труда IFA.

Для разбавления вредных примесей в воздухе цеха диффузоры системы AIRTECH – Stand Alone располагаются на высоте 4-7 метров и распространяют очищенный воздух там, где собирается самая высокая концентрация дымов, а высокопроизводительная вентиляционная система обеспечивает перемещение воздуха до 40 000 куб.м/ч на дальность до 50 метров.

Еще одним преимуществом системы AIRTECH – Stand Alone является ее гибкость. Система компактно сконструирована, а отсутствие необходимости прокладывать воздуховоды предоставляет возможность свободного выбора места монтажа. Система эффективна и с точки

зрения экономии энергоносителей, так как теплый воздух, находящийся в области потолка, опускается вниз потоками чистого воздуха, что позволяет значительно снизить затраты на отопление.

Технические характеристики:

Производительность 18000 – 40000 куб.м/ч

Мощность вентилятора 11,0 – 30,0 кВт

Степень очистки $\geq 99\%$

Уровень звукового давления 65 дБ

Система AIRTECH, тип PUSH-PULL

Фильтровентиляционная система PUSH-PULL построена на принципе втягивания («PULL») загрязненного воздуха цеха через систему воздуховодов, смонтированных в

* Статья на правах рекламы



цехе на высоте максимальной концентрации сварочных дымов, очистки воздуха высокоэффективными фильтр-картриджами и выдувания («PUSH») обратно в цех очищенного воздуха через решетки воздухопроводов с другой стороны системы.

Таким образом в цехе создается циркуляция воздуха, сварочные дымы постоянно и эффективно разбавляются, что снижает фоновую концентрацию вредных примесей в воздухе.

Система PUSH-PULL вносит существенный вклад в улучшение экологической безопасности производства, что подтверждено сертификатом Немецкого института по охране труда IFA.

Система AIRTECH, тип BlowTec



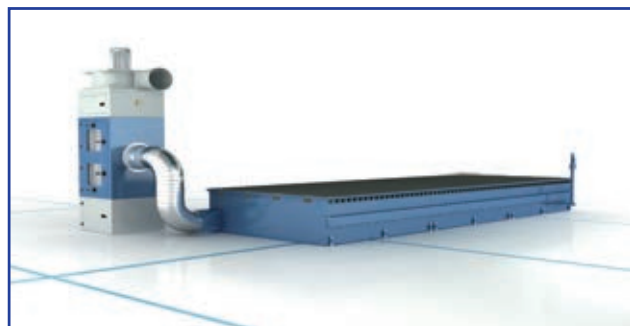
Энергоэффективность и универсальность — это особенности фильтровентиляционной системы AIRTECH – BlowTec. Модульная конструкция позволяет применять AIRTECH – BlowTec в тех производственных помещениях, в которых невозможно размещение любой другой вентиляции. Стандартные элементы системы могут быть размещены в любом порядке, что позволяет установить ее в ограниченном пространстве и в помещениях с низкими потолками.

ТЕКА — сделано в Германии!

Испытанное немецкое качество — оптимальная функциональность. Все установки выполняют требования безопасности. На нас Вы можете положиться!

Компания «ДельтаСвар» является официальным дистрибьютором ТЕКА в России. Наши специалисты проконсультируют Вас по всем вопросам относительно фильтровентиляционного оборудования, организации рабочего места сварщика и средств индивидуальной защиты.

Мы подберем для Вас необходимое оборудование, осуществим доставку и монтаж оборудования, оснастим Ваше сварочное производство «под ключ».



Белозеров Дмитрий Юрьевич,
руководитель отдела продаж ООО «ДельтаСвар»

ООО «ДельтаСвар»

620141, г. Екатеринбург, ул. Завокзальная, 29

тел.: +7 (343) 384-71-72 многоканальный

тел./факс: +7 (343) 287-41-52

E-mail: info@deltasvar.ru, www.DeltaSVAR.ru

