



**УЧРЕДИТЕЛЬ:**

**Издательский центр "Технология машиностроения"**

Издается с января 1930 года

Журнал издается при содействии Министерства промышленности и торговли РФ,  
Министерства образования и науки РФ,  
Российской инженерной академии,  
Российского научно-технического сварочного общества,  
Союза машиностроителей России

**Редакционная коллегия:**

Гл. редактор **В. А. Казаков**

<b>В. К. Драгунов</b>	<b>А. И. Рымкевич</b>
<b>А. С. Зубченко</b>	<b>О. Н. Севрюков</b>
<b>Е. А. Калашников</b>	<b>З. А. Сидлин</b>
<b>В. И. Кулик</b>	<b>Н. В. Смирнов</b>
<b>В. И. Лукин</b>	<b>В. А. Судник</b>
<b>В. П. Лялякин</b>	<b>В. А. Фролов</b>
<b>Г. А. Меньшиков</b>	<b>В. А. Хаванов</b>
<b>В. Н. Панин</b>	<b>Ф. А. Хромченко</b>
<b>И. Н. Пашков</b>	<b>О. А. Цукуров</b>
<b>В. В. Пешков</b>	<b>И. Н. Шиганов</b>

**Редакция:**

**С. В. Богус, Т. П. Маслик**

Электронная верстка: *Т. А. Шацкая*  
Дизайн обложки: *Е. С. Благовидов*  
Редактор-переводчик *Е. О. Егорова*  
Редактор-обозреватель *Ан. А. Суслов*  
Корректор *О. А. Шаповалова*

**Адрес редакции:**

127015, Москва,  
ул. Большая Новодмитровская, 23.

**Для корреспонденции:**

129626, Москва, а/я 01,  
Издательский центр  
"Технология машиностроения".  
Тел.: (495) 796 2491,  
тел./факс: (495) 748 0142.  
Бухгалтерия: 8 910 414 9184.  
E-mail: svarka@ic-tm.ru

Журнал "Сварочное производство" переводится  
на английский язык издательством  
"Taylor & Francis" (Великобритания).

Перепечатка материалов из журнала "Сварочное  
производство" возможна при обязательном пись-  
менном согласовании с редакцией журнала.

При перепечатке материалов ссылка на журнал  
"Сварочное производство" обязательна.

В случае обнаружения полиграфического брака ре-  
дакция журнала просит обращаться в типографию.  
Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по  
делам печати, телерадиовещания и средств массо-  
вых коммуникаций. Свидетельство о регистрации  
ПИ № 77-7778.

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

Цена свободная.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Интервью** с зав. кафедрой "Технология сварочного производства" "МАТИ" —  
РГТУ им. К. Э. Циолковского, д-ром техн. наук **В. А. Фроловым** \_\_\_\_\_ 3

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**Фролов В. А., Никитина Е. В., Троянов И. М.** — Повышение пластичности ме-  
талла шва соединений из вторичных алюминиевых сплавов \_\_\_\_\_ 6

**Сидякин В. А.** — Компьютерная модель температурного поля в пластине при ар-  
гонодуговой сварке неплавящимся электродом \_\_\_\_\_ 9

**Фролов В. А., Иванюхин А. Н., Сабанцев А. Н., Диденко С. А., Конкевич В. Ю.,  
Белоцерковец В. В.** — Сварка трением с перемешиванием — плюсы и ми-  
нусы \_\_\_\_\_ 12

**Бажанов А. В., Фролов В. А., Федоров С. А., Степанов В. В.** — Моделирова-  
ние процесса низкотемпературной светолучевой пайки изделий электронной  
техники \_\_\_\_\_ 19

**Барабанова О. А., Могорычный В. И., Набатчиков С. В.** — Создание слоистых  
композиционных материалов для производства высокоэффективной и ком-  
пактной теплообменной аппаратуры способом диффузионной сварки \_\_\_\_\_ 24

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

**Будкин Ю. В., Сивов Е. Н., Казаков В. А., Подольский А. Я.** — Комплекс техно-  
логических решений при сварке крупногабаритных конструкций из молибдено-  
вых сплавов \_\_\_\_\_ 29

**Меньшиков Г. А., Власенко А. Н., Невровский В. А., Васин В. А.** — Повышение  
работоспособности электродов при точечной контактной сварке сталей \_\_\_\_\_ 32

**Колупаев Ю. Ф.** — Новые материалы и технологии в производстве ювелирных  
изделий \_\_\_\_\_ 35

**Пашков А. И., Герасимов С. П., Пашков И. Н.** — Особенности пайки порошко-  
вым припоём системы медь — марганец — никель \_\_\_\_\_ 37

**Фролов В. А., Рябенко Б. В., Курдюков А. В., Шифрин В. В.** — Газотермиче-  
ские уплотняющие (прирабатываемые) покрытия \_\_\_\_\_ 42

### ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

**Фролов В. А., Федоров С. А.** — Новые подходы к организации образовательной  
системы технологического вуза и направления ее развития \_\_\_\_\_ 44

**Мачнев Е. А., Фролов В. А.** — Особенности компьютерного образования в под-  
готовке инженеров-сварщиков \_\_\_\_\_ 48

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

**Будкин Ю. В.** — Технологичность сварных конструкций на этапах жизненного  
цикла \_\_\_\_\_ 51

\* \* \*

**Рефераты** опубликованных статей \_\_\_\_\_ 55



**FOUNDER:**

**Publishing Centre "Tekhnologiya Mashinostroeniya"**

Published since January 1930

Journal is published in collaboration with RF Ministry of Industry and Trade,  
RF Ministry of Education and Science,  
Russian Engineering Academy,  
Russian Scientific-Technical Welding Society,  
The Union of Machine Engineers of Russia

**Editorial board:**

**V. A. Kazakov** Editor-in-Chief

<b>V. K. Dragunov</b>	<b>A. I. Rymkevich</b>
<b>A. S. Zubchenko</b>	<b>O. N. Sevryukov</b>
<b>E. A. Kalashnikov</b>	<b>Z. A. Sidlin</b>
<b>V. I. Kulik</b>	<b>N. V. Smirnov</b>
<b>V. I. Lukin</b>	<b>V. A. Sudnik</b>
<b>V. P. Lyalyakin</b>	<b>V. A. Frolov</b>
<b>G. A. Menshikov</b>	<b>V. A. Khavanov</b>
<b>V. N. Panin</b>	<b>F. A. Khromchenko</b>
<b>I. N. Pashkov</b>	<b>O. A. Tsukurov</b>
<b>V. V. Peshkov</b>	<b>I. N. Shiganov</b>

**Editorial staff:**

**S. V. Bogus, T. P. Maslik**

Electron galley: *T. A. Shatskaya*  
Cover design: *E. S. Blagovidov*  
Editor-translator *E. O. Egorova*  
Editor-reviewer *An. A. Suslov*  
Proof-reader *O. A. Shapovalova*

*Address of the editorial office:*

B. Novodmitrovskaya, 23, Moscow.

*For correspondence:*

Publishing Centre  
"Tekhnologiya Mashinostroeniya"  
P.O.B.01, Moscow, 129626, Russia.  
Tel.: (495) 796 2491, 748 0142.  
Book-keeping 8 910 414 9184.  
E-mail: svarka@ic-tm.ru

In case of printing waste you should appeal to the printing establishment.

Reprinting of materials from "Svarochnoe Proizvodstvo" journal is possible with writing permission of editorial staff.

Reference to "Svarochnoe Proizvodstvo" at reprint is obligatory.

The "Svarochnoe Proizvodstvo" journal is being translated into English by the publishing house "Taylor & Francis" (Great Britain).

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-and-Broadcasting and Mass Communications Media.

Registration certificate ПИ N 77-7778.

Journal is included into the list of editions certified by RF Supreme Attestation Committee for publication of competitors works for scientific degrees.

## CONTENTS

**An interview** of V. A. Frolov, Dr. Sc (Tech.), head of the "Welding production engineering" department of the "MATI" — K. E. Tsyolkovsky RSTU \_\_\_\_\_ 3

### SCIENTIFIC-TECHNICAL SECTION

**Frolov V. A., Nikitina Ye. V., Troyanov I. M.** — Weld metal higher plasticity of the joints from the recyclable aluminum alloys \_\_\_\_\_ 6

**Sidyakin V. A.** — Computer model of the temperature field in a plate at non-consumable electrode argon-arc welding \_\_\_\_\_ 9

**Frolov V. A., Ivanyukhin A. N., Sabantsev A. N., Didenko S. A., Konkevich V. Yu., Belotserkovets V. V.** — Agitation friction welding: merits and demerits \_\_\_\_\_ 12

**Bazhanov A. V., Frolov V. A., Fiodorov S. A., Stepanov V. V.** — Low-temperature light-beam soldering process modelling for the electronic products \_\_\_\_\_ 19

**Barabanova O. A., Mogorychny V. I., Nabatchikov S. V.** — Sandwiched composite materials creation to manufacture high-performance compact heat exchanging equipment by diffusion welding \_\_\_\_\_ 24

### PRODUCTION SECTION

**Boodkin Yu. V., Sivov Ye. N., Kazakov V. A., Podolsky A. Ya.** — Processing decision complex at welding large-dimension constructions from molybdenum alloys \_\_\_\_\_ 29

**Menshikov G. A., Vlasenko A. N., Nevrovsky V. A., Vasin V. A.** — Higher electrode working capacity at steel resistance-spot welding \_\_\_\_\_ 32

**Kolupayev Yu. F.** — Innovative materials and technology in goldsmithery \_\_\_\_\_ 35

**Pashkov A. I., Gerasimov S. P., Pashkov I. N.** — Powder soldering special features of the copper—manganese—nickel system \_\_\_\_\_ 37

**Frolov V. A., Ryabenko B. V., Kuedyukov A. V., Shifrin V. V.** — Gas-thermal thickening (run-in) coating \_\_\_\_\_ 42

### EDUCATION & PERSONNEL TRAINING

**Frolov V. A., Fiodorov S. A.** — New approach to the educational system organization and trends of its development at an engineering institute of higher education \_\_\_\_\_ 44

**Machnev Ye. A., Frolov V. A.** — Computer education special features at training welding engineers \_\_\_\_\_ 48

### ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

**Boodkin Yu. V.** — Welded structure workability at the life cycle stages \_\_\_\_\_ 51

\* \* \*

**Abstracts** of the published articles \_\_\_\_\_ 56



## Интервью с зав. кафедрой "Технология сварочного производства" "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, д-ром техн. наук В. А. Фроловым

— Кафедре "Технология сварочного производства" "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского исполняется 65 лет со дня основания. Расскажите, пожалуйста, об истории создания кафедры.

— Кафедра была создана в июне 1943 г. как базовая кафедра по подготовке инженеров-технологов авиастроительного производства в области сварки. Первый ее выпуск состоялся в 1947 г. У истоков создания кафедры стояли видные ученые: д-р техн. наук А. А. Алов и дважды лауреат Государственной и лауреат Ленинской премий д-р техн. наук К. В. Любавский. При активной поддержке Министерства авиационной промышленности в 1960 г. была организована отраслевая научно-исследовательская лаборатория во главе с лауреатом Государственной премии канд. техн. наук, проф. В. В. Дьяченко. В 1962 г. впервые в стране началась подготовка специалистов по специализации "Пайка металлов" под руководством канд. техн. наук Ю. С. Долгова.

На кафедре сформировались известные в нашей стране и за рубежом научно-педагогические школы: д-ра техн. наук А. А. Алова, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук Г. Д. Никифорова, канд. техн. наук В. В. Дьяченко, д-ра техн. наук Б. Д. Орлова и канд. техн. наук Ю. С. Долгова. За 65-летнюю историю кафедрой подготовлено более 4150 инженеров-технологов сварочного производства. Из них свыше 260 человек получили диплом с отличием, более 170 выпускников защитили кандидатские диссертации, а 27 — докторские. Многие стали крупными руководителями учебных и производственных организаций и хорошо известны в сварочном мире.

— Что нового в деятельности кафедры в образовательном процессе за прошедшие пять лет?

— На кафедре разработана и реализована система многоуровневого непрерывного профессионального образования и индивидуальной под-

готовки профессиональных кадров по практико-ориентированным образовательным программам и запросам предприятий. Была организована целевая ускоренная подготовка специалистов из выпускников профильных колледжей и технических училищ. Кафедра включилась в систему дистанционного обучения работников машиностроительных предприятий регионов России, в которых отсутствуют высшие учебные заведения, осуществляющие подготовку инженеров-технологов сварочного производства. Был взят курс на внедрение в учебный процесс современных информационных технологий, создание электронных учебно-методических комплексов и виртуального лабораторного практикума, оснащение учебных аудиторий компьютерной техникой и средствами телекоммуникаций, обеспечение свободного доступа студентов к Интернету, внедрение системы балльно-рейтинговой оценки учебной деятельности студентов. Сотрудниками кафедры подготовлены и изданы 11 монографий, учебников и учебных пособий.

— Известно, что высшая школа заметно постарела за последние годы. Средний возраст научно-педагогического коллектива Вашей кафедры сейчас составляет 49 лет. Как Вам удалось привлечь молодежь к преподавательскому процессу и добиться сбалансированности научно-педагогических кадров?

— Секрета нет. На кафедре сложился дружный, сплоченный коллектив единомышленников, поддерживающий ее славные традиции, эффективно действует система наставничества молодых кадров. Старшекурсники, инженеры и аспиранты активно вовлекаются в научно-исследовательскую деятельность, принимают участие в ежегодных студенческих Гагаринских чтениях, выступают с докладами на научно-технических конференциях. Достижения молодых аспирантов и ученых экспонируются на международной специализированной выставке "Weldex/Россварка". В рамках выставки представители кафедры участвуют в конкурсах

мастерства студентов сварочных кафедр и инженеров-сварщиков. Кафедра постоянно совершенствует систему подготовки научно-педагогических кадров через аспирантуру и докторантуру. За последние пять лет по научной тематике кафедры защищены четыре кандидатские и две докторские диссертации. Сохранились не только сложившиеся научные школы, но появились и новые научные направления, которые возглавляют выпускники кафедры.

**— Какие научные направления активно разрабатываются Вашей кафедрой в настоящее время?**

— Как известно, кафедра имеет приоритет в области стыковой сварки дугой низкого давления и светолучевых технологий обработки материалов. По этим направлениям продолжают разрабатываться новые технологии и создаются новые образцы технологического оборудования. К основным научным направлениям кафедры следует отнести развитие металлургических и технологических основ дуговой сварки алюминиевых сплавов, создание технических средств контроля параметров режима контактной сварки и методик оценки качества сварных соединений, разработку новых композиций припоев для пайки высокопрочных конструкций из алюминиевых сплавов и особолегкоплавких припоев для светолучевой пайки узлов электронной техники.

**— Известны публикации сотрудников Вашей кафедры, посвященные проблемам высшей профессиональной технологической школы. Сформулируйте, пожалуйста, Ваше видение направлений реформы системы высшего профессионального образования.**

— По нашему мнению, основной целью реформы высшей профессиональной технологической школы должно стать создание современной образовательной системы, способной оперативно реагировать на изменение социально-экономических условий развития общества. В рамках реформы вузам должна быть предоставлена большая самостоятельность и академическая свобода выбора основных направлений совершенствования образовательной системы по целям, содержанию, методам и формам обучения. Новые подходы к организации образовательной системы должны быть регламентированы в образовательных стандартах высшего профессионального образования нового поколения. Их отличительной особенностью должно стать внедрение в практику подготовки кадров высшей квалификации компетентностного подхода к обучению, принятому в мире. Требуется пересмотр не только основополагающих принципов организации образовательного процесса, но и напол-

нение новым содержанием образовательных программ, иное построение учебного процесса за счет внедрения инновационных технологий в образовательную практику. К стратегическим целям инновационного развития системы высшего профессионального технологического образования следует отнести создание опережающих образовательных программ и актуальных учебных планов по переподготовке кадров и повышению квалификации специалистов производственной сферы по тем направлениям развития науки и технологии, которые будут востребованы экономикой завтрашнего дня.

**— Подготовка специалистов-инноваторов предполагает создание образовательной системы более высокого уровня организации и управления. Каковы, по Вашему мнению, должны быть ее важнейшие составляющие?**

— Важнейшими составляющими системы подготовки специалистов-инноваторов должны стать внедрение в учебные планы востребованных образовательных программ и обеспечение их вариативности, развитие системы дистанционного и открытого образования, диверсификация образовательных услуг, дифференциация и индивидуализация обучения, гибкость и динамичность учебного процесса, адаптивность его не только к социальным запросам и интересам обучаемых, но и потребностям работодателя, активный мониторинг всех направлений деятельности образовательного учреждения.

**— Перед высшей профессиональной школой стоят серьезные задачи. Решение их требует длительного периода времени, о чем свидетельствует опыт ведущих зарубежных технологических университетов. Что Вы думаете по этому поводу?**

— Согласен с Вами, что ведущие зарубежные технологические университеты реализовывали эти подходы не одно десятилетие. Но наше вузовское сообщество должно пройти этот путь за более короткий отрезок времени. При осуществлении реформы высшей профессиональной технологической школы хотелось бы предостеречь от скоропелых и конъюнктурных решений. Необходимо сохранить в максимальной степени все лучшее, накопленное в вузах в сфере подготовки кадров высшей профессиональной квалификации.

**— Выскажите Ваше мнение о роли профессиональных сообществ в подготовке профессиональных кадров.**

— Правовое поле деятельности общественно-профессиональных объединений должно предусматривать их участие в процедурах государственного лицензирования и аккредитации специ-

альностей; в экспертизе и аттестации основных и дополнительных образовательных программ; в формировании набора компетентностей выпускников вузов; в создании единого информационного пространства, объединяющего рынки образовательных услуг и труда, их мониторинге, оценке тенденций; в формировании пакета заказа на индивидуальную целевую подготовку и переподготовку специалистов по конкретным образовательным программам, в сборе, обобщении и анализе отзывов работодателей о качестве подготовки и переподготовки специалистов.

**— Заслуживает внимание мнение некоторых специалистов и экспертов о необходимости укрепления системы непрерывного многоуровневого профессионального образования и организации более тесного и эффективного взаимодействия между образовательными учреждениями различных уровней профессионального образования. В чем суть такого подхода?**

— Системный подход при реализации этой цели, по нашему мнению, основан на разработке интегрированного государственного образовательного стандарта по конкретным специальностям с сопряжением уровней и дифференциацией требований к компетентностям выпускников образовательных учреждений начального, среднего и высшего профессионального образования. Форматы сотрудничества и партнерства образовательных учреждений должны быть направлены не только на достижение текущих результатов, но и на перспективу. Для решения проблем воспроизводства кадров различного уровня профессионального образования мы предлагаем создать на базе ведущих технологических вузов образовательные комплексы различной конфигурации с определенной степенью централизации и автономии входящих в него образовательных учреждений. Перспективным направлением следует считать и расширение форматов рынка образовательных услуг за счет создания региональных корпоративных образовательных центров развития кадрового потенциала.

**— В последние годы много говорят о необходимости подключения бизнеса к образовательному процессу. Какие Вы видите направления взаимодействия бизнес-сообщества и образовательного учреждения в подготовке профессиональных кадров?**

— В современных условиях роль бизнес-сообщества существенно возрастает. Несмотря на некоторую коммерциализацию образовательного процесса за счет введения дополнительных платных образовательных услуг, система профессионального образования нуждается в притоке инвестиций. Но известно, что инвестор готов вкладывать средства на условиях престижности и выгоды их вложения. Поэтому необходимо создать соответствующие организационно-экономические и нормативно-правовые механизмы активизации процесса инвестирования в образовательную сферу, обеспечить финансовую прозрачность деятельности образовательных учреждений и разработать критерии оценки эффективности вложения инвестиций в человеческий ресурс. При решении этих вопросов возрастает роль государства. Профессиональное образование, являющееся важнейшей отраслью социального сектора и одним из основных факторов экономического развития страны, должно стать важным инструментом его политики. Я убежден, что поддержка высокого статуса, профессионального уровня и престижности преподавательского труда, признание необходимости привлечения средств работодателя для совместного с государством финансирования профессионального образования и формирование открытых взаимовыгодных отношений вуза и работодателя будут способствовать притоку в образовательную сферу молодых кадров, способных обеспечить в ней позитивные изменения.

**— Вадим Анатольевич, Вы уже 10 лет возглавляете кафедру. Какие стоят задачи перед коллективом кафедры на перспективу?**

— У нас есть ближние и долгосрочные планы. В ближайший год планируем вывести на защиту две кандидатские и одну докторскую работы. Созданный технологический задел планируем предложить промышленности для внедрения. В более дальней перспективе — обновление технологического и исследовательского оборудования кафедры, издание ряда монографий по основным научным направлениям кафедры. Могу с уверенностью сказать, что коллектив кафедры с оптимизмом смотрит в будущее и ему по силам решать поставленные задачи.

**— Спасибо! Желая Вам удачи во всех начинаниях!**

Интервьюировал  
главный редактор В. А. Казаков

УДК 621.791.55:669.715

**В. А. ФРОЛОВ**, д-р техн. наук, **Е. В. НИКИТИНА**, канд. техн. наук  
 ("МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского),  
**И. М. ТРОЯНОВ**, канд. техн. наук  
 (НПО им. С. А. Лавочкина)

## Повышение пластичности металла шва соединений из вторичных алюминиевых сплавов

Прессованные полуфабрикаты из вторичных алюминиевых сплавов системы Al—Cu—Si характеризуются однородной структурой (рис. 1) и высокими механическими свойствами, в том числе и высокой пластичностью:  $KCU_{деф} = (21,0 \div 31,5)10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. Негативные особенности вторичных сплавов, а именно сложный химический состав, наличие примесей в значительных количествах (напри-

мер, АК5М2: 4—6 % Si, 1,5—3,5 % Cu, 0,2—0,8 % Mg,  $\leq 1$  % Fe,  $\leq 0,5$  % Zn,  $\leq 0,5$  % Ni,  $\Sigma$  примесей  $\leq 1,8$  %; АК4М4: 3—5 % Si, 3,5—5 % Cu, 0,2—0,6 % Mn,  $\leq 1,1$  % Fe,  $\leq 2$  % Zn,  $\leq 0,5$  % Ni,  $\Sigma$  примесей  $\leq 3,8$  %; АВ86: 3—5 % Cu, 3,5—5 % Si, 0,4—0,6 % Mg, 0,2—0,4 % Mn, 1,5 % Fe, 1 % Zn,  $\Sigma$  примесей  $\leq 5,8$  %) приводят к тому, что в неравновесных условиях кристаллизации, характерных для

сварки с местным расплавлением (рис. 2), образуется структура со сплошной сеткой выделений многочисленных фаз, в том числе и неравновесных. Это резко снижает пластичность металла: ударная вязкость металла шва  $KCU_{мш} = (2,6 \div 2,8)10^4$  Дж/м<sup>2</sup> [1]. Кроме того, из-за повышенного содержания в таких сплавах железа (0,7—1,5 %) в структуре появляются выделения фазы неблагоприятной формы — в виде тонких пластин (рис. 3). Подобный характер расположения фаз и их форма приводят к формированию материала с низкой пластичностью и, как следствие, хрупкому межкристаллитному характеру разрушения при испытаниях на разрыв. В связи с этим при изготовлении сварных конструкций возникает проблема повышения свойств металла шва.

Поскольку пластичность материала определяется его структурой, улучшить свойства материала можно следующим образом:

- изменением фазового состава (числа и объемной доли отдельных структурных составляющих) за счет варьирования химического состава по основным легирующим элементам;
- изменением формы частиц отдельных фаз за счет введения малых добавок элементов-модификаторов;
- изменением фазового состава в результате термической обработки сварных соединений.

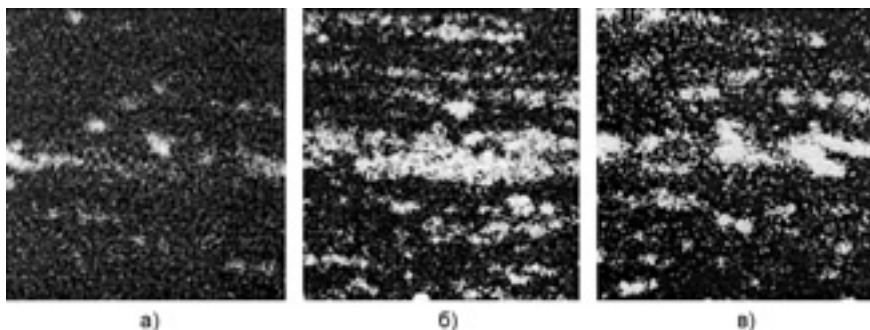


Рис. 1. Распределение меди, железа, кремния в твердом растворе и фазах в полосах, прессованных из слитков сплава АК5М2 (участок шлифа размером 80 × 80 мкм): а —  $K_{\alpha}$ -Cu; б —  $K_{\alpha}$ -Si; в —  $K_{\alpha}$ -Fe

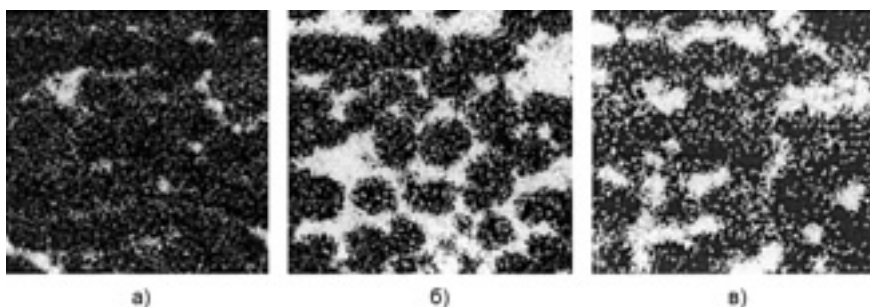


Рис. 2. Распределение меди, железа, кремния в твердом растворе и фазах в металле шва полос, прессованных из слитков сплава АК5М2. ×950 (участок шлифа размером 80 × 80 мкм): а—в — см. рис. 1

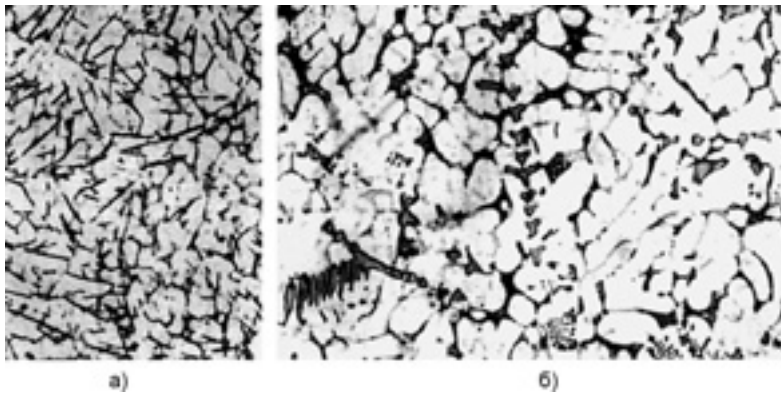


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 340$ ) металла шва опытных вариантов сплавов: а —  $x_1 = -1, x_2 = -1, x_3 = -1, x_4 = -1$  (2 % Cu; Bi, Ce, Mo — нет); б —  $x_1 = -1, x_2 = -1, x_3 = -1, x_4 = 1$  (2 % Cu; 0,2 % Mo; Ce, Bi — нет)

Поскольку изменение системы легирования (даже целесообразное с точки зрения пластичности) влечет за собой изменение всего комплекса свойств, в том числе и коррозионных, были исследованы два последних направления.

### Влияние легирования сварочной ванны на свойства металла шва

Статистические данные о влиянии различных добавок на видоизменение формы отдельных структурных составляющих противоречивы и относятся к другим системам легирования. На основании анализа экспериментальных данных выбраны следующие элементы, способствующие видоизменению формы первичных выделений фаз: висмут, церий и молибден. Известно, что церий и висмут значительно влияют на величину поверхностного натяжения, имеются отдельные данные о положительном влиянии этих добавок (вводимых в количествах 0,1—0,3 %) и на механические свойства [2]. Согласно литературным данным, введение в сплав небольших добавок церия или молибдена приводит к нейтрализации вредного влияния железа и кремния.

В качестве структурно-чувствительного показателя, характеризующего пластичность металла шва, использовали ударную вязкость, определяемую по образцам Менаже (не менее шести образцов на каждый вариант). В качестве параметра оптимизации использовали отношение ударной вязкости металла шва  $i$ -го

состава и базового материала — сплава АК5М2 [3]:

$$y_i = \frac{(KCU)_{\text{мши}}}{(KCU)_{\text{мш АК5М2}}} \quad (1)$$

Для получения возможно более полной информации о влиянии легирующих элементов использовали полный факторный эксперимент  $2^4$ ; легирующие элементы (висмут, медь, церий, молибден) взяты в качестве факторов (табл. 1). Содержание остальных элементов принято постоянным и составляло (%): 5,5 Si; 0,65 Mn; 0,5 Mg; 1 Fe; 0,9 Zn; 0,18 Ni; что соответствует верхним уровням их содержания в сплавах АК5М2, АК4М4, АВ86. Кроме того, дополнительно вводили в качестве модификаторов 0,5 % Ti и 0,01 % В.

Фактор	$X_1$ , Bi (%)	$X_2$ , Cu (%)	$X_3$ , Ce (%)	$X_4$ , Mo (%)	Отклик $(KCU)_{\text{мши}}$ $y_i = \frac{(KCU)_{\text{мши}}}{(KCU)_{\text{мш АК5М2}}}$
Верхний уровень (+1) Нижний уровень (-1)	0,3 0	6,0 2,0	0,4 0	0,2 0	

Таблица 1

Состояние	$KCU_{\text{мш}}$ , Дж/м <sup>2</sup> , при содержании, %			
	3,0 Cu, 0,136 Mo, 0,1 Ce	2,0 Cu, 0,15 Mo, 0,085 Ce	1,5 Cu, 0,16 Mo, 0,08 Ce	1,0 Cu, 0,17 Mo, 0,07 Ce
После сварки	$(3,3 \pm 0,4)10^4$	$(3,3 \pm 0,2)10^4$	$(3,4 \pm 0,2)10^4$	$(3,5 \pm 0,3)10^4$
Гомогенизация, закалка, искусственное старение (0,5 ч)	$(6,1 \pm 0,7)10^4$	$(5,0 \pm 0,2)10^4$	$(5,0 \pm 0,2)10^4$	$(4,7 \pm 0,2)10^4$
То же (5 ч)	$(5,8 \pm 0,7)10^4$	$(4,8 \pm 0,1)10^4$	$(4,5 \pm 0,4)10^4$	$(3,7 \pm 0,1)10^4$

Таблица 2

После проведения химического анализа выявлено, что реальное содержание  $\tilde{X}_i$  меди, церия, молибдена и других легирующих элементов (табл. 2) отличается от расчетного. Для исключения систематической ошибки смещены значения интервалов варьирования, а также верхних и нижних уровней факторов. В результате связь между кодированными  $\tilde{X}_i$  и натуральными  $\tilde{X}_i$  значениями факторов описывается формулами [3]:

$$\tilde{x}_1 = \frac{\tilde{X}_1 - 0,15}{0,15}; \quad \tilde{x}_2 = \frac{\tilde{X}_2 - 4,0}{1,8};$$

$$\tilde{x}_3 = \frac{\tilde{X}_3 - 0,1125}{0,0875}; \quad \tilde{x}_4 = \frac{\tilde{X}_4 - 0,12}{0,09} \quad (2)$$

Для оценки характера случайных ошибок произведен расчет коэффициентов парной корреляции  $r_{\varepsilon_i \varepsilon_j}$  между ошибками  $\varepsilon_{iq}, \varepsilon_{jq}$  в уровнях факторов и установлено, что ошибки  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  не коррелируют между собой. В связи с этим значения коэффициентов модели  $b_i$  и дисперсию в определении скорректированных коэффициентов можно рассчитать по формулам

$$\tilde{b}_i = \frac{\sum_{q=1}^N \tilde{x}_{iq} y_q}{N + \sum_{q=1}^N \varepsilon_{iq}^2};$$

$$S^2\{\tilde{b}_i\} = \frac{S^2\{y_i\}}{N + \sum_{q=1}^N \varepsilon_{iq}^2} \quad (3)$$

где  $\tilde{x}_{iq}$  — кодированные выражения факторов после смещения основных уровней.

После проверки значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и адекватности модели по критерию Фишера скорректированная математическая модель влияния легирующих элементов имеет следующий вид:

$$(KCU)_{мш_i} = (0,947 - 0,127x_2 - 0,036x_3 + 0,043x_4)(KCU)_{мш_{AK5M2}} \quad (4)$$

Как следует из анализа полученной модели, введение висмута значимо не сказывается на ударной вязкости металла шва. Введение церия свыше 0,15 % приводит к некоторому увеличению протяженности сетки эвтектик, в результате ударная вязкость металла шва практически не изменяется и составляет  $2,8 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. Как следует из анализа микроструктуры сплавов с различным содержанием меди, увеличение ее содержания от 2 до 6 % приводит к образованию сетки эвтектик по границам зерен и резкому снижению ударной вязкости — до  $2,28 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>.

Наилучшим образом вредное действие железа нейтрализует молибден: при его введении видоизменяется форма первичных выделений железосодержащей фазы: вместо "игл" фазы FeSiAl<sub>5</sub> образуются и глобулы звездчатой формы. Исследование состава отдельных структурных составляющих методом микроспектрального анализа показало, что изменение формы пластинчатых выделений на компактные при введении добавок молибдена связано не с образованием фазы Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>8</sub> вместо FeSiAl<sub>5</sub>, а с формированием вместо фазы FeSiAl<sub>5</sub> фазы, содержащей молибден, причем состав этой фазы приблизительно соответствует формуле: (FeMn<sub>0,71</sub>Mo<sub>0,22</sub>Si<sub>0,42</sub>)Al<sub>x</sub>.

Анализ данных механических испытаний опытов крутого восхождения по поверхности отклика по полученной математической модели из центра плана (рис. 4) показал, что оптимальные свойства металла шва могут быть достигнуты, если содержание меди, церия и молибдена находится в следующем диапазоне (%): 1—2 Cu; 0—0,08 Ce; 0,12—0,25 Mo. Такой состав металла шва при сварке

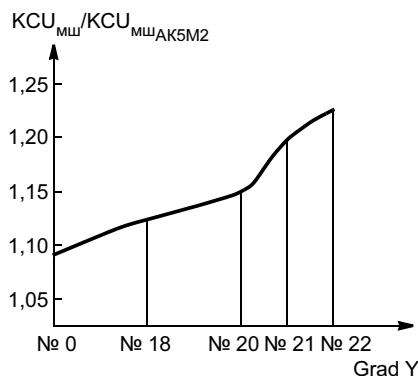


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости металла шва  $KCU_{мш}$  от изменения состава при движении по градиенту

вторичных алюминиевых сплавов, содержащих 2—5 % Cu и 3—6 % Si, может быть достигнут при использовании разработанной присадочной проволоки следующего состава (%): 5,0—6,5 кремния; 0,4—0,8 марганца; 0,15—0,20 титана; 0,03—0,05 бора; 0,2—0,7 молибдена; 0,15—0,35 церия; алюминий — остальное<sup>1</sup>.

Использование присадочной проволоки данного состава при АрДС пластин толщиной 5 мм, полученных литьем в кокиль из наименее пластичного сплава АВ86 (4 % Cu, 4 % Si, 1,5 % Fe, 0,6 % Mg, 0,4 % Mn, 1 % Zn), обеспечивает, несмотря на повышенное (1,2—1,5 %) содержание железа, ударную вязкость металла шва ( $3,2—3,6$ ) $10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. Применение разработанной проволоки позволяет на 20—30 % повысить ударную вязкость металла шва по сравнению со сварными соединениями, выполненными в аналогичных условиях с использованием стандартной проволоки Св-АК5. Временное сопротивление разрыву при использовании разработанной проволоки ( $\sigma_B = 236$  МПа) сохраняется на том же уровне, что и при использовании присадочной проволоки Св-АК5.

Необходимо отметить, что использование разработанной присадочной проволоки при сварке обеспечивает как наиболее высокую пластичность, так и более благоприятный темп кристаллизации (введение молибдена и церия способствует увеличению количества жидкой фазы к концу интервала кристаллизации),

<sup>1</sup> А. с. 963770 (СССР).

что позволило снизить на 24—30 % склонность к образованию горячих трещин (по сравнению с использованием стандартной проволоки Св-АК5).

### Влияние термической обработки на ударную вязкость металла шва

Кроме рассмотренных выше факторов пластичность металла шва зависит и от того, какую форму принимают фазы, выделяющиеся на завершающих этапах кристаллизации:  $\theta$ -фаза, частицы Si и эвтектические колонии (III) (см. рис. 3, б). Анализ состава эвтектической колонии позволил установить наличие в ней следующих элементов: Cu, Si, Mg, соотношения между которыми характерны для фаз: Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>Al<sub>5</sub>; CuAl<sub>2</sub>; Si, причем содержание фазы Si значительно выше остальных. Форма, размеры и расположение фаз зависят от скорости кристаллизации.

В результате анализа данных дифференциального термического анализа металла шва с различным содержанием легирующих элементов, позволившего определить температуру выделения неравновесных эвтектик, предложена ступенчатая гомогенизация (обеспечивающая более полное растворение неравновесных фаз без явления пережога) по следующему режиму:

1 ступень: температура нагрева ниже температуры плавления легкоплавких эвтектик:  $t = 480 \pm 5$  °С, время выдержки 2 ч;

2 ступень: температура нагрева  $510 \pm 5$  °С, время выдержки 3 ч, закалка в воду, подогретую до 60—80 °С, искусственное старение при 148—150 °С в течение 0,5—5 ч.

Необходимо отметить, что длительное старение после гомогенизации и закалки нецелесообразно, так как приводит даже к некоторому снижению ударной вязкости. Это связано с тем, что при старении сплавов системы Al—Fe—Si выделяется кремний (по плоскостям {100} и {111}) и, кроме того, фаза FeAl<sub>3</sub> в виде игл (по плоскостям {110} алюминиевого твердого раствора).

Термическая обработка по указанному режиму (Т5) сварных соединений литых пластин из сплавов показала, что в зависимости от состава металла шва достигается повышение



ударной вязкости в 1,5—2 раза (см. табл. 2). Анализ микроструктуры металла шва после ступенчатой гомогенизации, закалки и искусственного старения (0,5 ч) показал, что повышение пластичности вызвано коагуляцией и сфероидизацией частиц кремния, растворением части меди в  $\alpha$ -твердом растворе, а также округлением частиц  $\theta$ -фазы и разрушением сетки выделений по границам зерен. Форма же железосодержащей фазы в виде иероглифов существенно не изменяется.

В связи с этим для сварных соединений из вторичных алюминиевых сплавов можно рекомендовать ступенчатую гомогенизацию по указанному режиму с последующей закалкой в горячую воду и искусственное старение при  $150 \pm 5$  °С в течение 20—40 мин с охлаждением на воздухе. Ударная вязкость металла шва при этом составляет  $(5—6)10^4$  Дж/м<sup>2</sup>.

Несмотря на существенное повышение пластичности сварных соединений, термическая обработка с экономической точки зрения может быть целесообразна не для всех сварных конструкций, особенно слож-

ных конструкций с большим числом коротких, незамкнутых швов. Поэтому преимущественно аргонодуговая сварка с опытной присадочной проволокой как более универсальная и экономически выгодная может быть рекомендована для сварки вторичных алюминиевых сплавов.

## ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние дополнительного легирования висмутом, церием и молибденом, а также содержания меди на структуру и ударную вязкость сварных соединений сплавов на основе системы Al—Cu—Si. Для сварки сплавов системы Al—Cu—Si с повышенным содержанием железа разработана присадочная проволока, позволяющая на 20—30 % повысить ударную вязкость металла шва и на 20—30 % снизить склонность к образованию горячих трещин.

2. На основании данных дифференциального термического анализа предложен режим ступенчатой гомогенизации, позволяющий повысить ударную вязкость металла шва в 1,5—2 раза. Показано, что повышение пластичности связано с коагуля-

цией и сфероидизацией частиц кремния, растворением и округлением частиц  $\theta$ -фазы и, в меньшей степени, округлением очертаний иероглифов железосодержащей фазы.

3. В присутствии молибдена первичные выделения железосодержащей фазы принимают компактную форму, что способствует повышению ударной вязкости. Установлено, что причиной изменения формы первичных выделений железосодержащей фазы является образование фазы сложного состава, соответствующей формуле  $(\text{FeMn}_{0,71}\text{Mo}_{0,22}\text{Si}_{0,42})\text{Al}_x$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина Е. В. Исследование особенностей АрДЭС алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа и разработка присадочной проволоки // Металлургия и технология современных процессов сварочного производства. М.: ЦРДЗ, 1994. С. 141—145.
2. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
3. Никитина Е. В. Влияние добавок легирующих элементов на структуру и свойства вторичных сплавов Al—Cu—Si, полученных в неравновесных условиях кристаллизации // Металлы. 2005. № 2. С. 101—108.

УДК 621.791.754.621.001.57

**В. А. СИДЯКИН**, канд. техн. наук  
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

# Компьютерная модель температурного поля в пластине при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом

Компьютерная модель "Пластина" предназначена для моделирования температурного поля при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом тонких листов (пластин) и может быть применена в учебном процессе по курсам "Основы теплопередачи при сварке и пайке" и "Математическое моделирование процессов сварки".

Основные особенности компьютерной модели состоят в следующем.

Температурное поле рассматривается двухмерным, т. е. считается, что температура по толщине пластины не изменяется. В модели учитывается зависимость тепловых коэффициентов от температуры, теплоты плавления (кристаллизации) и теплоотдачи с поверхности листа. Электрическая дуга рассматривается как нормально-круговой источник теплоты. Моделируется как непрерывный, так и импульсный режим сварки, а также

температурное поле в пластине конечных размеров при наличии изотермических и адиабатических границ.

Температурное поле рассчитывается непрерывно при перемещении дуги по всей длине пластины, а также на стадии выравнивания температур после выключения дуги.

При моделировании результаты расчета изображаются на экране монитора в виде либо изотерм, движущихся по пластине, либо подвижной сварочной ванны и образующегося сварного шва.

Результаты расчета автоматически записываются в файл на диске, что позволяет в последующем выполнить анализ температурного поля.

При расчете температурного поля применяют численный метод конечных разностей по явной схеме.

При разработке программного обеспечения использован компилятор C++ (GNU Compiler Collection).

Компьютерная модель "Пластина" содержит четыре структурных блока (рис. 1):

- расчет температурного поля;
- анализ температурных полей;
- задание условий сварки;
- задание свойств металла.

Блок "Задание свойств металла" предназначен для задания теплофизических свойств свариваемого металла. Они либо вводятся с клавиатуры, либо загружаются из файла на диске. При вводе новых данных о свойствах свариваемого металла они записываются на диск под определенным именем. Задаются зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной объемной теплоемкости от температуры, температуры солидуса и ликвидуса, удельной объемной теплоты плавления.

Блок "Задание условий сварки" предназначен для задания параметров режима сварки и граничных условий. Параметры режима и граничные условия вводятся с клавиатуры и записываются под определенным именем в файл на диске. Задание условий сварки может также производиться путем чтения необходимого файла с диска.

Задаются следующие параметры режима сварки: сварочный ток; напряжение дуги; эффективный КПД дуги; условный диаметр пятна нагрева; скорость сварки; дли-

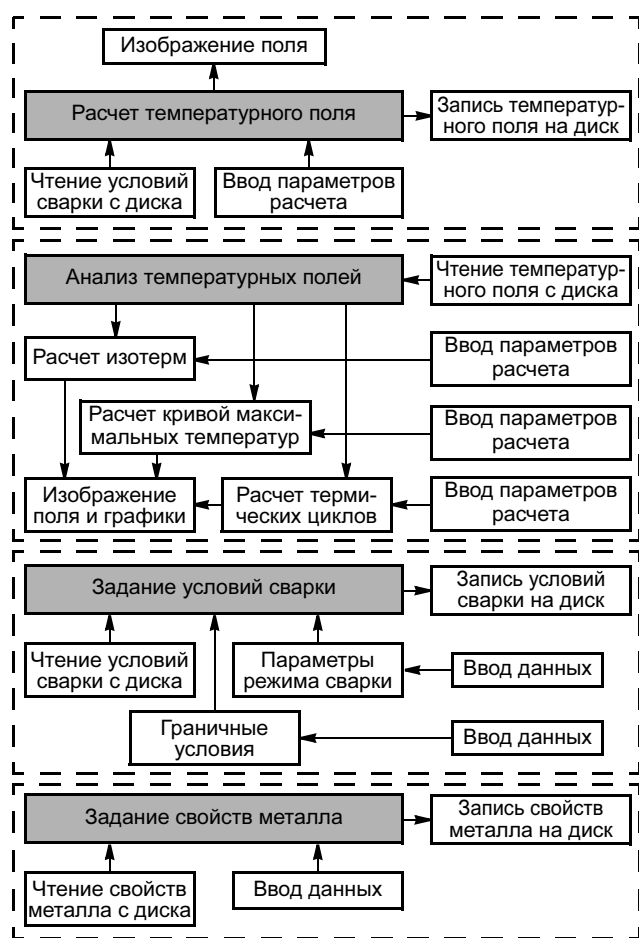


Рис. 1. Структурная схема компьютерной модели "Пластина"

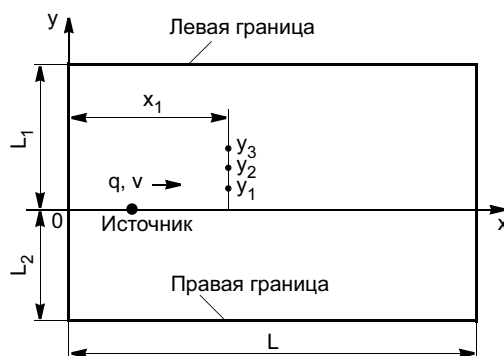


Рис. 2. Параметры расчетной области

тельность импульса; длительность паузы; толщина пластины; металл пластины.

Задаются параметры расчетной области (рис. 2):  $L$  — длина пластины;  $L_1$  — расстояние до левой границы;  $L_2$  — расстояние до правой границы.

На левой ( $y = L_1$ ) и правой ( $y = L_2$ ) границах задаются изотермическое либо адиабатическое граничное условие. Границы  $x = 0$  и  $x = L$  считаются адиабатическими.

В этом же блоке задается зависимость коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины от температуры.

Блок "Расчет температурного поля" предназначен для расчета температуры в узлах сеточной модели. Перед расчетом с диска загружаются условия сварки, которые при необходимости могут корректироваться.

Задаются следующие параметры и условия расчета:

- число изотерм (от 1 до 5) и их температуры;
- абсцисса  $x_1$ , число точек и их ординаты  $y_1$ — $y_3$ , для которых будут рассчитаны термические циклы (см. рис. 2);
- абсцисса  $x_2$ , для которой будет рассчитана кривая максимальных температур;
- размер сетки (расстояние между узлами 0,1, 0,05, 0,02 и 0,01 см);
- тип изображения — изображение изотерм поля или сварного шва.

При включении вычислительного процесса открывается окно с изображением пластины, по которой перемещается температурное поле в виде изотерм, либо сварочная ванна и образующийся шов (рис. 3).

Возможны два варианта проведения вычислительного эксперимента — пробный и полный. При пробном расчете после перемещения дуги по всей длине пластины процесс расчета прекращается.

Если в процессе перемещения дуги нажать клавишу "Пробел", то происходит выключение сварочного тока и протекает процесс выравнивания температуры. Если на экране изображена сварочная ванна, то ее размеры постепенно уменьшаются и можно определить время кристаллизации ванны.

Если проводится полный вычислительный эксперимент, то после перемещения дуги по всей длине пластины происходит выключение сварочного тока и протекает стадия выравнивания температуры. Происходит запись на диск температурного поля в момент времени, соответствующий абсциссе  $x = 0,75L$ , а также регистрация мак-

симальных температур и термических циклов в заданных точках пластины.

Блок "Анализ температурных полей" используется для анализа температурных полей, записанных на диск в процессе проведения вычислительного эксперимента. В этом блоке производятся три вида расчетов: координат изотерм, параметров кривой максимальных температур и параметров термических циклов.

При работе с этим блоком вначале производится чтение необходимого файла температурного поля с диска, а затем выбор вида расчета.

Если выбран вид анализа "Изотермы температурного поля", то на экране изображается поле в виде изотерм для температур, которые были назначены при проведении вычислительного эксперимента. Для расчета других изотерм можно в дополнительном окне ввести число изотерм и значения температур новых изотерм. После этого происходит расчет изотерм и на экране монитора появляется обновленное температурное поле. Предусмотрена возможность производить измерения изотерм, представленных на экране.

При выборе вида анализа "Максимальные температуры" открывается окно с изображением кривой максимальных температур. Для расчета зоны термического

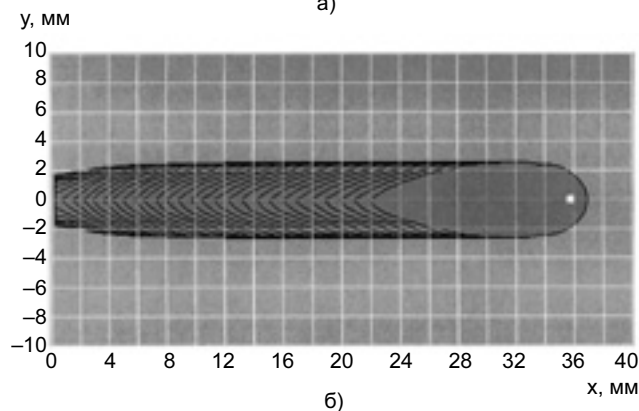
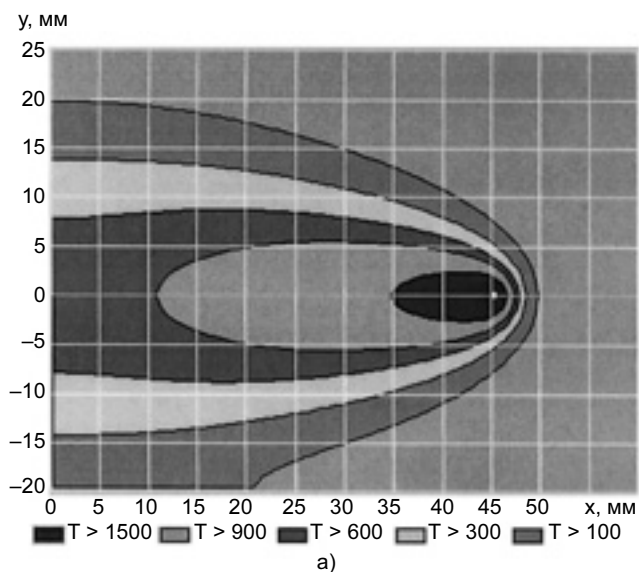


Рис. 3. Изображение на экране монитора в процессе моделирования подвижного температурного поля в виде изотерм (а) и подвижной сварочной ванны (б)

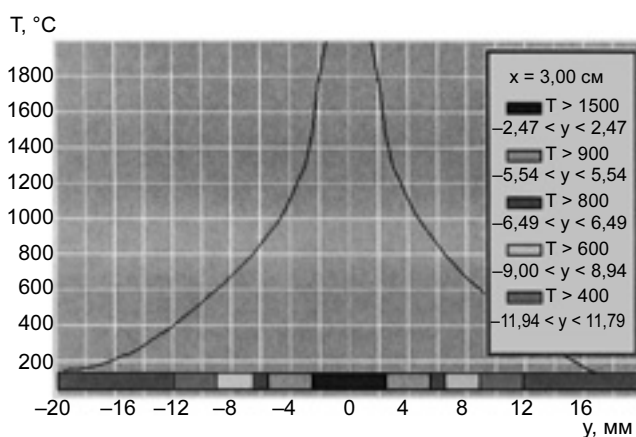


Рис. 4. Кривая максимальных температур

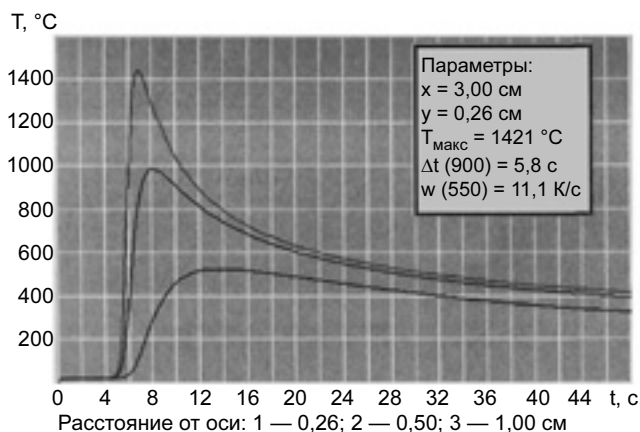


Рис. 5. Кривые термических циклов

воздействия в дополнительном окне указываются число и значения температур превращений, характерных для свариваемого металла.

После этого происходит расчет положения участков характерных структурных изменений и на экране монитора появляется кривая максимальных температур с изображением этих участков, а в дополнительном окне указываются их координаты (рис. 4).

При выборе вида анализа "Термические циклы" открывается окно с изображением термических циклов. В нижней части графика указаны расстояния точек от оси шва.

Для расчета параметров термического цикла следует в дополнительном открывшемся окне указать номер точки, для которой производится расчет, и значения двух температур —  $T_1$  и  $T_2$ . Они используются для расчета следующих параметров термического цикла:  $\Delta t(T_1)$  — длительности пребывания металла выше температуры  $T_1$ ;  $w(T_2)$  — скорости охлаждения металла при температуре  $T_2$ .

Далее производится расчет параметров термического цикла для указанной точки и на экране монитора появляется изображение термических циклов с дополнительным окном, в котором указаны координаты точки и параметры ее термического цикла (рис. 5).

Результаты моделирования, представленные на экране монитора, могут быть записаны на диск в графических файлах с расширением "bmp".

**В. А. ФРОЛОВ, д-р техн. наук, А. Н. ИВАНЮХИН, инж.**  
 ("МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского),  
**А. Н. САБАНЦЕВ, канд. техн. наук, С. А. ДИДЕНКО, инж.**  
 (РКЗ ГКНПЦ им. М. В. Хруничева),  
**В. Ю. КОНКЕВИЧ, д-р техн. наук, В. В. БЕЛОЦЕРКОВЕЦ, канд. техн. наук**  
 (Всероссийский институт легких сплавов)

## Сварка трением с перемешиванием — плюсы и минусы

### ВВЕДЕНИЕ

Конец XX века ознаменовался серьезными достижениями в области технологии сварки. В большой степени причиной этого явилось значительное расширение внедрения сварки плавлением в автомобилестроении, при этом обозначилась необходимость совершенствования технологии сварки в плане повышения ее экономической эффективности. В последние годы увеличился объем сварных конструкций, выполненных лазерной сваркой, получил промышленное внедрение отличающийся высокой производительностью способ гибридной сварки, совмещающий воздействие двух источников нагрева — дуги и лазерного луча. Да и в других отраслях машиностроения (судостроении, вагоностроении) широкое внедрение получили усовершенствованные способы дуговой сварки, отличающиеся повышенной производительностью процесса. Появились комплексно-автоматизированные производства с широким использованием компьютерного адаптивного управления процессом сварки. Но, несмотря на эти многочисленные высокоэффективные разработки, безусловно, самым ярким технологическим прорывом в области сварки стала разработка и внедрение в промышленность способа сварки трением с перемешиванием (Friction Stir Welding — FSW). Запатентованный в конце 1991 г. Британским институтом сварки (TWI) этот способ уже в середине 90-х годов получил промышленное внедрение, т. е. было создано промышленное оборудование, которое было использовано для промышленного производства изделий космического назначения, в судостроении, транспортном машиностроении.

Сварка трением с перемешиванием является очень наглядным примером того, каким образом должны продвигаться на современный рынок научные достижения. Ведь сама по себе идея этого способа сварки не являлась чем-то абсолютно новым, еще в 1967 г. в СССР было выдано авторское свидетельство № 195846 на способ сварки трением, подобный Friction Stir Welding, но как это, к сожалению, часто встречается в истории развития российской техники, новый способ сварки не получил развития. А вот история FSW является, по мнению авторов, ярким образцом того, что успеха на рынке научная идея может достичь только в сочетании с грамотным менеджментом и маркетингом.

Идея сварки трением с перемешиванием является удивительно простой и привлекательной — соединение металлических заготовок производится перемешивани-

ем металла свариваемых кромок специальным вращающимся инструментом, внедренным вглубь металла и движущимся вдоль стыка. Поскольку металл при этом находится в нерасплавленном пластичном состоянии, то преимущества способа сварки трением становятся очевидными: никаких горячих трещин, никаких пор, можно соединять разнородные сплавы и сплавы, которые традиционно считались несвариваемыми сваркой плавлением. А если прибавить к этому великолепные экологические показатели — отсутствие электромагнитного и радиационного излучения дуги, сварочного аэрозоля, защитных газов, то становится понятным, почему сварщики всего мира буквально "набросились" на этот способ сварки.

Широкие, на первый взгляд, возможности сварки трением с перемешиванием (СТП) предопределили огромный интерес к использованию данного способа сварки для создания уникальных сварных конструкций, таких как сотовые панели холодильных установок [1, 2], самолетные конструкции и топливные баки ракет серии Delta фирмой BOEING (США) [3], в производстве самолета бизнес-класса Eclipse 500 авиационной компанией Eclipse Aviation [4, 5], при изготовлении конструкций полов самолета C130 компанией BOEING совместно с компанией Lockheed-Martin [6], при соединении алюминиевых труб при монтаже газопровода [7], в производстве подвижного состава железнодорожного транспорта [8, 9], в судостроении, при изготовлении пространственных рам кузовов наземного транспорта [8], деталей шасси, корпусов автобусов и других транспортных средств. Появились сообщения об использовании СТП для создания заготовок при изготовлении автомобиля Audi A8, изготовленных из листов различной толщины, которые после сварки подвергаются штамповке.

Но так ли все благополучно на самом деле? Оправдал ли ожидания способ сварки трением? Сейчас в мире накоплено уже достаточно много данных по использованию FSW, авторы также провели исследования сварки различных сплавов, и, пожалуй, можно подвести некоторые предварительные итоги. Этому и посвящена данная работа.

Простая, на первый взгляд, технологическая схема сварки трением с перемешиванием оказалась в действительности сложной при ее реализации на практике. Если сравнивать процесс создания сварной конструкции СТП с дуговой сваркой, то определенные технологические проблемы начинаются со сборки деталей под сварку. Про-

цесс сварки трением перемешиванием требует очень жесткой фиксации свариваемых кромок на опорной подкладке. Если для сварки обычных прямолинейных швов эта задача реализуется относительно просто, то для сварки кольцевых, круговых пространственных соединений необходима разработка сложной технологической оснастки, процесс сборки под сварку становится очень трудоемким. Как показал опыт сварки емкостей с кольцевыми швами (рис. 1), использование очень сложной оснастки приводит к тому, что трудоемкость сборки под сварку значительно превышает трудоемкость сборки аналогичной емкости при дуговой сварке и, таким образом, в целом цикл сварки оказывается значительно более длительным, чем при сварке плавлением.

Что касается выбора режимов сварки, то и в данном случае залогом получения качественных сварных соединений является оптимальный выбор целого комплекса технологических параметров, в число которых входят частота вращения инструмента, скорость перемещения вдоль стыка (скорость сварки), усилие прижима инструмента, угол наклона инструмента и многочисленные характеристики инструмента (теплофизические свойства материала инструмента, форма, размер инструмента, размер и шаг винтовой нарезки и т. д.).

От выбора режимов сварки зависит и качество соединения металла в зоне стыка и имеющее не менее важное значение тепловое вложение. При этом существует такое важное понятие, как взаимосвязь параметров. Экспериментально выявлены параметры, при согласованном изменении которых теплота в зоне сварки практически не изменится. Так, например, с увеличением частоты вращения и соответствующем увеличении скорости сварки температура нагрева в определенных границах может остаться практически неизменной, при этом увеличение линейной скорости даст возможность увеличить производительность процесса.

Температурные характеристики процесса в большой степени зависят от формы, диаметра нажимных плечиков инструмента (shoulder), а качество перемешивания определяется в основном резьбовым стержнем (pin), хотя формирование соединения в верхней части шва зависит также и от формы поверхности нажимных плечиков.

При традиционной форме инструмента одной из серьезных проблем является формирование качественного соединения в нижней части шва, которое зависит от

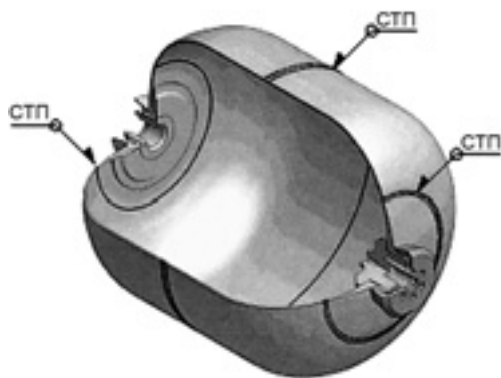


Рис. 1. Емкость высокого давления, сваренная СТП

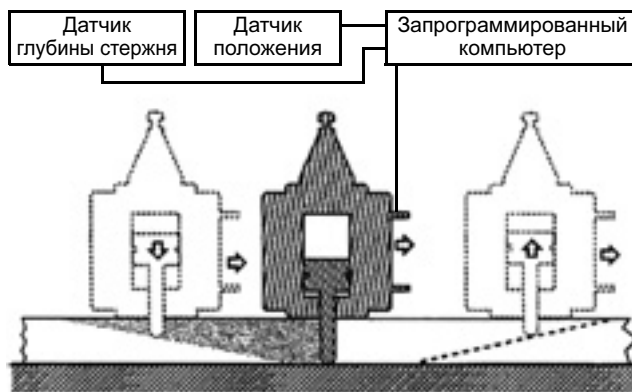


Рис. 2. Компьютерное управление положением инструмента

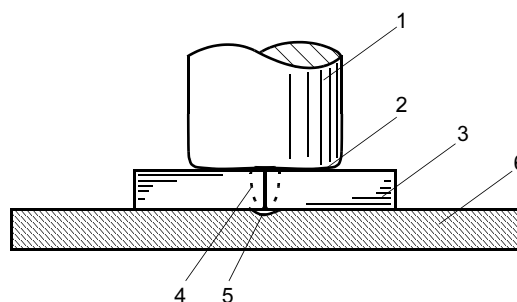


Рис. 3. Сварка на подкладке с канавкой для принудительного формирования корня шва: 1 — пуансон; 2 — кромка пуансона; 3 — свариваемое изделие; 4 — рабочий стержень; 5 — канавка; 6 — подкладка

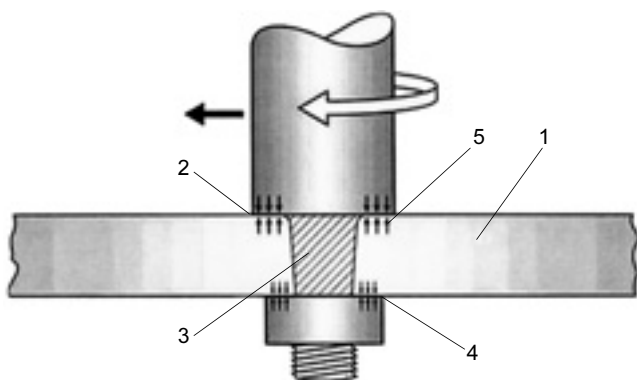
длины стержня и величины заглупления. Эксперименты по сварке тонколистовой емкости из сплава АМг6 показали, что при отклонении величины заглупления от номинального значения всего на 0,02 мм в корне шва может возникнуть дефект типа непровара. Учитывая, что колебание толщины заготовок в виде катаных полуфабрикатов может превышать этот допуск, необходимо обеспечивать обратную связь между конкретными условиями сварки и сварочными режимами. Поэтому, например<sup>1</sup>, предлагается обеспечивать компьютерное управление величиной заглупления инструмента (рис. 2).

Нижняя торцевая часть стержня также влияет на качество проплавления корня шва. Как показали эксперименты, нанесение крестообразной насечки на нижнюю плоскость стержня способствует лучшему перемешиванию металла в корне шва. Тем не менее, для обеспечения надежного гарантированного качества сварного соединения сварку лучше производить на подкладке с формирующей корень шва канавкой (рис. 3) [10].

Конструкция инструмента является одним из самых исследуемых параметров технологии, над которым работали и продолжают работать исследователи в различных странах. Это связано и с генерирующейся теплотой, и с течением металла при перемешивании. В результате на сегодняшний день разработано огромное множество различных профилей стержня.

В настоящее время конструкция инструмента по сравнению с начальным этапом освоения процесса СТП

<sup>1</sup> Патент 005713507А (US).



**Рис. 4. Инструмент и принцип Bobbin stir welding:** 1 — детали; 2 — верхние плечики; 3 — рабочий стержень; 4 — нижние плечики; 5 — реактивные силы

значительно усложнилась. Проведенные исследования показывают, что не может быть универсального инструмента для всех сплавов. Различие в контактном взаимодействии инструмента и сплавов различных систем и различного уровня легирования, обусловленное особенностями пластического течения, различиями адгезионного поведения, существенными различиями физико-механических свойств, может потребовать при сварке ответственных сварных изделий оптимизации конструкции инструмента применительно к конкретному сплаву, толщине и типу соединения. Большое значение для обеспечения стабильного качества сварного шва имеет также жесткость инструмента, которая должна быть такой, чтобы упругие деформации от действующих в процессе сварки нагрузок были минимальны.

Большой интерес представляет "Bobbin tool" инструмент (рис. 4) [11], позволяющий решить проблему формирования корня шва и обеспечивающий в отличие от обычного инструмента симметричное формирование ядра.

По мнению авторов, пока еще не найден оптимальный для изготовления инструмента материал, который обладал бы таким комплексом свойств, как высокие жаропрочность, теплопроводность, жесткость и износостойкость, низкая чувствительность к концентраторам напряжений и т. п.

Что касается комплекса остальных параметров сварки, то кроме того, что само оборудование должно быть достаточно жестким, чтобы при приложении усилий сварки упругая деформация элементов сварочной установки была минимальна, оборудование должно обеспечивать плавное регулирование и высокую точность линейной скорости сварки и скорости вращения инструмента. Очень важно, особенно для сварки тонколистовых конст-

рукций, обеспечивать высокую точность позиционирования рабочего положения инструмента.

Достаточно много исследований процесса СТП проводили с использованием фрезерных станков, которые переделывали для сварки. Безусловно, на таком оборудовании можно изучать некоторые металлургические аспекты процесса, но оно, как правило, не позволяет в полной мере соблюсти ряд важных технологических параметров, среди которых важнейшими являются:

- обеспечение необходимого осевого усилия на инструмент;
- плавная регулировка скорости вращения инструмента, по крайней мере, в диапазоне 500—1500 об/мин;
- точность отслеживания рабочего положения инструмента  $\pm 0,02$  мм;
- надежная фиксация свариваемых кромок.

При всей сложности технологического процесса СТП необходимо отметить, что, несмотря на многообразие различных параметров, определяющих качество сварных соединений, данный способ сварки поддается математическому моделированию, поэтому построение надежной адекватной компьютерной модели, над которой сейчас работают специалисты многих компаний, создание необходимой базы данных могут существенно облегчить расширение внедрения СТП в различные отрасли промышленности.

### Свариваемые деформируемые сплавы

Несмотря на то, что, казалось бы, способ СТП особенно привлекателен для сварки традиционно несвариваемых сплавов, нетрудно заметить, что для создания сложных конструкций в авиакосмической отрасли, судостроении и вагоностроении в основном используются свариваемые сплавы, которые можно сварить и дуговой сваркой. Однако, как показывают исследования, сварка трением с перемешиванием даже такого технологичного при сварке плавлением сплава, как АМг6, позволяет не только решить характерную для сплавов системы Al—Mg проблему пористости сварных швов, но и заметно улучшить прочностные свойства сварного соединения. Например, применение СТП позволило на 30—40 % увеличить давление до разрушения приведенных на рис. 1 емкостей по сравнению с емкостями, сваренными аргонодуговой сваркой.

В таблице приведены свойства сварных соединений листов из сплава АМг6, полученных АДС и СТП.

Вместе с тем, учитывая более длительный цикл сварки конструкции, вопрос о целесообразности использования процесса СТП взамен традиционных способов применительно к хорошо свариваемым сваркой плавлением сплавов должен решаться исходя из целого ряда важней-

Способ соединения	Температура испытания, °С	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\alpha$ , градус	KCV, кДж/м <sup>2</sup>	Место разрушения
АДС	20	$\frac{295-320}{310}$	$\frac{162-176}{165}$	$\frac{80-115}{90}$	$\frac{300-410}{350}$	Шов
СТП	20	$\frac{320-345}{328}$	$\frac{172-190}{175}$	$\frac{90-120}{100}$	$\frac{300-410}{350}$	ЗТВ

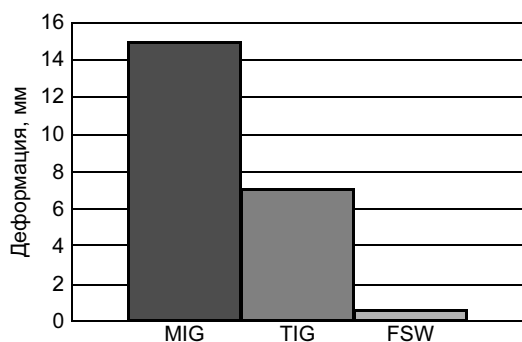


Рис. 5. Деформация плит, полученных аргодуговой сваркой плавящимся (MIG) и неплавящимся (TIG) электродами, сваркой трением с перемешиванием (FSW)

ших факторов, среди которых прочность сварного соединения может и не быть решающей. Если не учитывать известные экологические и экономические преимущества процесса СТП, одним из главных факторов, предопределяющим выбор СТП, будет являться существенное снижение деформаций и напряжений сварной конструкции (рис. 5) [12].

### Литейные алюминиевые сплавы

В последние годы достаточно большое внимание уделяется созданию литосварных конструкций. Работы А. Г. Братухина, Е. И. Глотова, В. И. Лукина, В. И. Рязанцева, Е. В. Никитиной и других специалистов показали, что создание литосварных, литоштампосварных конструкций позволяет заменять сложные сборки на конструкции из меньшего количества элементов, сложные (нетехнологичные) штампованные изделия на литые; получать изделия из литых и штампованных частей. Использование литосварных конструкций выдвигает ряд жестких требований как к технологии фасонного литья, так и технологии сварки, при этом эффект от применения литосварных конструкций может быть достигнут лишь при условии, что уровень свойств отливок и сварных соединений будет соответствовать уровню свойств сварных конструкций из свариваемых деформируемых сплавов.

Широкое внедрение литосварных конструкций в изделиях машиностроения сдерживается трудностью обеспечения высокого качества сварных соединений. Результаты исследований показали, что оплавление границ зерен в высокотемпературной ЗТВ вызывает образование рыхлот, приводит к охрупчиванию и потере герметичности. Серьезной проблемой, особенно при сварке отливок, полученных литьем в землю, является пористость. Исходя из этого способ сварки трением с перемешиванием кажется очень привлекательным для сварки литых деталей.

Проведенные исследования сварки сплава ВАЛ16 показали, что действительно при сварке трением в зоне сварного соединения (включающей ядро и зону термомеханического влияния) формируется очень плотный металл, приобретающий фактически свойства деформируемого, о чем свидетельствует его высокая твердость (рис. 6), значительно превышающая твердость основного, литого металла. При этом интенсивная пластическая

деформация металла в зоне соединения приводит к измельчению первичных интерметаллидов, если они имелись в отливке (рис. 7).

Положительное влияние СТП на свойства сварного соединения литейного сплава А360 (аналог отечественного сплава АЛ9) отмечено в работе [13].

Предел прочности при растяжении соединения составил 269 МПа, в то время как предел прочности основного металла — 232 МПа. Повышение прочности и пластичности авторы объясняют измельчением эвтектических фаз. В то же время сравнительный анализ микроструктуры ядра и основного металла показал (рис. 8), что в данном случае речь может идти не просто об измельчении эвтектического кремния, а о формировании своеобразной, псевдоэвтектической структуры. Следует иметь в виду, что в процессе перемешивания происходит смешивание эвтектики  $\alpha + Si$  и  $\alpha$ -твердого раствора. В результате формируется структура, представляющая смесь двух фаз: эвтектической фазы Si и  $\alpha$ -твердого раствора. Внешне данная структура представляет (см. рис. 8, а) эвтектику, однако объемная доля  $\alpha$ -фазы в данном случае превышает объемную долю  $\alpha$ -фазы в эвтектике, которая образуется при кристаллизации сплава.

Таким образом, исходя из этих данных, можно было бы сделать вывод, что сварка трением с перемешиванием полностью решает проблему сварки литых деталей из алюминиевых сплавов любого качества. Однако анализ структуры сварного соединения показывает, что при

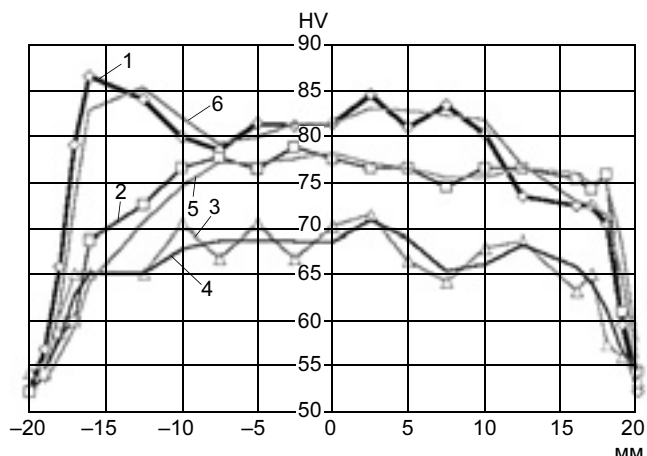


Рис. 6. Твердость образцов, выполненных СТП: 1—3 — верхняя линия, линия середины, нижняя линия соответственно; 4—6 — 2-й линейный фильтр — нижняя линия, линия середины, верхняя линия соответственно

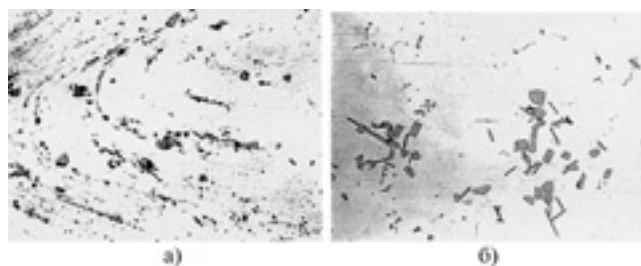


Рис. 7. Микроструктура сварного соединения сплава ВАЛ16, выполненного СТП: а, б —  $\times 50$

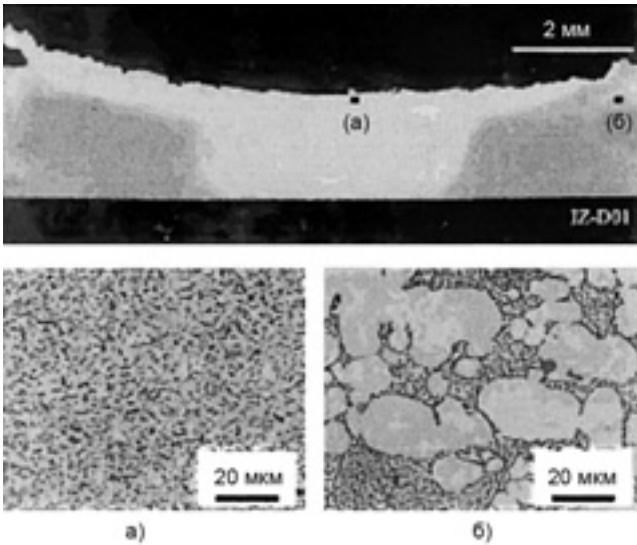


Рис. 8. Макро- и микроструктура сварного соединения сплава А360: а — структура ядра; б — основной металл

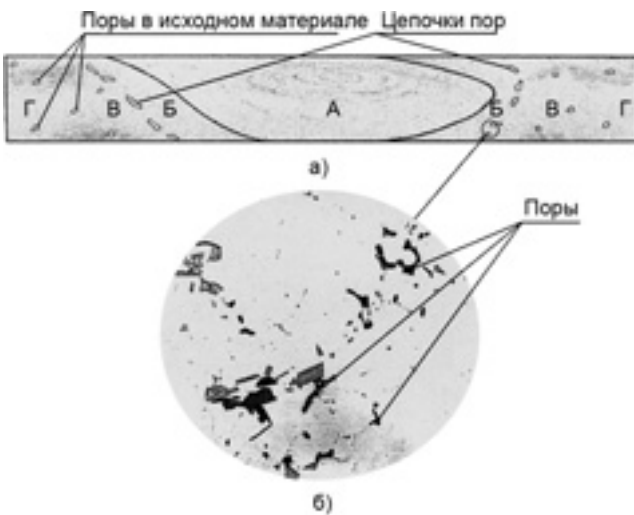


Рис. 9. Схема формирования цепочки пор (а) и микроструктура (б.  $\times 50$ ) на границе ядра и зоны термомеханического влияния (А — ядро; Б — зона термомеханического влияния; В — ЗТВ; Г — основной материал)

сварке очень пористого металла на границе между зоной термомеханического влияния и ЗТВ может сформироваться цепочка пор вследствие выдавливания под действием пластической деформации молекулярного газа из центральной зоны шва (рис. 9).

Поскольку поры располагаются цепочкой, то это может серьезно ослабить прочность сварного соединения. Поэтому в определенной степени пористость свариваемых трением отливок должна все-таки регламентироваться.

Тем не менее, исходя из полученных результатов исследований можно сделать вывод, что сварка трением с перемешиванием открывает возможность для получения совершенно нового качества сварных соединений литых деталей из алюминиевых сплавов.

Весьма перспективным в этой связи представляется не только СТП литых деталей, но и предварительная об-

работка свариваемых кромок литых деталей с помощью так называемого Friction Stir Process, представляющего "холостой" проход металла вращающимся инструментом, т. е. фактическое превращение литой структуры в деформированную. После такой обработки литую деталь можно варить обычной сваркой плавлением с обеспечением самых высоких свойств сварного соединения.

### Несвариваемые алюминиевые сплавы

В основном к классу несвариваемых алюминиевых сплавов относятся сплавы, склонные при сварке плавлением к образованию горячих трещин, либо те сплавы, коррозионная стойкость сварных соединений которых чрезвычайно низкая. К числу несвариваемых алюминиевых сплавов, широко используемых в авиакосмической промышленности, можно отнести, например, сплав Д16 системы Al—Cu—Mg, сплавы типа В95 и В96 системы Al—Zn—Mg—Cu. Поскольку эти сплавы обладают высокой прочностью, высоким комплексом конструктивных характеристик, их использование в сварных конструкциях представляется целесообразным. Поэтому проблема сварки данных сплавов посвящено большое количество исследований. В работах [14, 15] показано, что применение СТП позволяет получить высокий уровень прочности при выполнении сварки алюминиевых сплавов серии 7000 (системы Al—Zn—Mg—Cu).

Проведенные исследования структуры сварных соединений прессованных полос и листов из сплава системы Al—Zn—Mg—Cu, сваренных СТП после полной термической обработки (закалка + искусственное старение), показали, что СТП позволяет получить плотные, без пор и горячих трещин сварные соединения (рис. 10).

Исследование механических свойств при статическом растяжении показало, что уровень прочности сварных соединений высок и составляет 485—490 МПа, однако коэффициент прочности соединения, учитывая высокую исходную прочность основного металла (585—590 МПа), относительно низкий, около 82 %. Еще большее разупрочнение имеет место при определении предела текучести сварного образца, коэффициент прочности составляет около 60 %. Разрушение всех образцов происходило по ЗТВ (рис. 11). Таким образом, несмотря на то, что

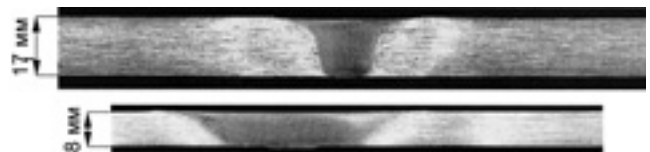


Рис. 10. Макроструктура сварных соединений прессованных полос из сплава системы Al—Zn—Mg—Cu, выполненных СТП

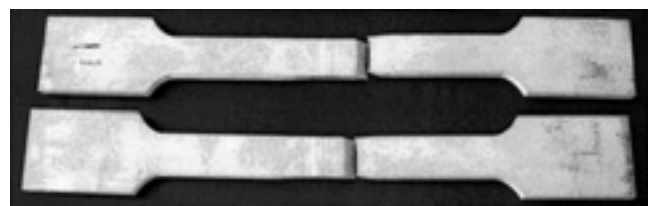
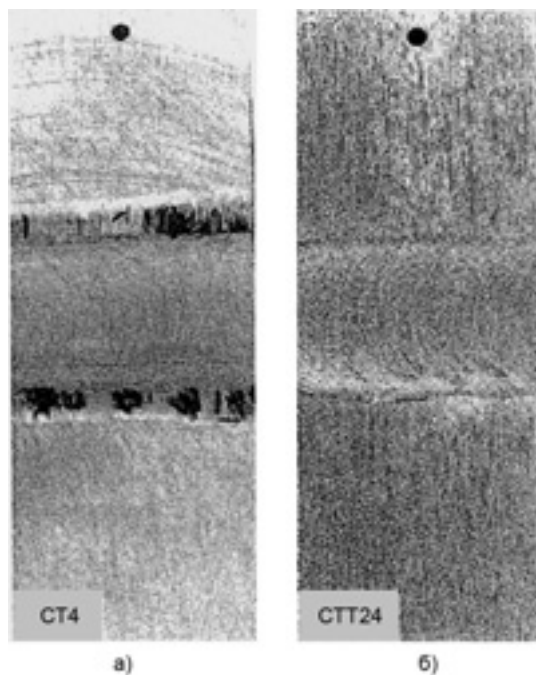


Рис. 11. Образцы после испытаний на статическое растяжение





**Рис. 12.** Внешний вид сварных образцов после испытаний на расслаивающую коррозию: а — термическая обработка T2 + СТП; б — то же + искусственное старение

процесс формирования соединения происходит при относительно низкой температуре без расплавления металла, для СТП характерны те же проблемы, что и при сварке плавлением свариваемых термически упрочняемых сплавов — прочность сварного соединения определяется свойствами металла в ЗТВ.

Результаты исследований коррозионных свойств сварных соединений показали, что структурное состояние ЗТВ и в этом случае играет решающую роль. При значении порогового напряжения основного металла 350 МПа при испытании на коррозию под напряжением на базе 40 сут. уровень сопротивления коррозионному растрескиванию сварных соединений после СТП составил всего 150 МПа, а при напряжении 250 МПа сварные образцы выдержали чуть более суток. Искусственное старение после сварки кардинально поменяло коррозионную стойкость образцов. Сварные образцы показали нечувствительность к коррозионному растрескиванию ( $\sigma_b > 250$  МПа), при этом также увеличилось сопротивление расслаивающей коррозии. Если образцы в состоянии после сварки были чувствительны к расслаивающей коррозии в ЗТВ (балл 7—8, зона поражения локализовалась вдоль шва в виде относительно узкой полосы) (рис. 12, а), то в состоянии сварка + искусственное старение сварное соединение показало нечувствительность к расслаивающей коррозии — балл 4—5 (у основного металла — балл 4).

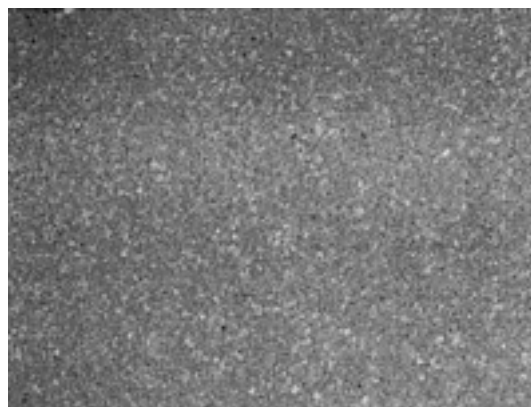
Таким образом, с одной стороны, СТП действительно позволила сформировать плотное, практически бездефектное сварное соединение, с другой — термический цикл сварки, характерный для СТП, создает в ЗТВ практически те же проблемы, как и при сварке плавлением термически упрочняемых сплавов. Поэтому управление термическим циклом при СТП имеет важнейшее значе-

ние для обеспечения оптимального комплекса свойств сварных соединений. Именно поэтому в терминологии специалистов, занимающихся СТП, появились термины "холодная" и "горячая" сварка [16], характеризующие комплекс параметров сварки (скорость вращения инструмента и скорость перемещения инструмента вдоль стыка), обеспечивающих различное термическое воздействие на ЗТВ и, как следствие, влияющих на механические свойства соединения.

Если структурные изменения металла в ЗТВ принципиально не отличаются от тех, которые имеют место при сварке плавлением, то структура металла шва при СТП не имеет аналогов среди соединений, полученных различными способами сварки плавлением и давлением.

В ядре сварного соединения формируется очень мелкая структура из равноосных зерен (рис. 13), которая, по мнению большинства исследователей, является результатом динамической рекристаллизации.

Твердость металла ядра в той или иной степени уступает твердости основного металла при сварке деформируемых сплавов, но зато значительно превосходит, как показано выше, твердость литой структуры литейных сплавов. В процессе формирования соединения под действием вращающегося инструмента металл подвергается интенсивному термомеханическому воздействию, в результате которого и происходит формирование межатомных связей. Более того, результаты исследований электропроводности различных зон сварного соединения сплава системы Al—Zn—Mg—Cu показали, что в ядре сварного соединения формируется структура пересыщенного твердого раствора легирующих компонентов в алюминии, т. е. фактически формируется структура закалки. После сварочное старение приводит к распаду твердого раствора, в результате твердость металла ядра становится близкой к твердости основного металла. Анализ термического цикла сварки в зоне ядра показывает, что формирование структуры пересыщенного твердого раствора не может быть объяснено обычной закалкой в результате быстрого охлаждения шва. Очевидно, что в данном случае процессы, происходящие в зоне шва, можно сравнить с процессами, происходящими при получении материалов методом механического легирования. В этом случае в результате обработки металлов в аттри-



**Рис. 13.** Микроструктура ( $\times 50$ ) ядра сварного соединения сплава системы Al—Zn—Mg—Cu

торе за счет высокоэнергетического воздействия происходит формирование сплавов с содержанием в твердом растворе легирующих компонентов в количестве, значительно превышающем их равновесную растворимость. Можно предположить, что аналогичное высокоэнергетическое воздействие происходит в микрообъемах металла в местах его контакта с инструментом. При этом нельзя исключить, что в этих микрообъемах может даже происходить локальное расплавление металла.

Очевидно, что процессы формирования ядра являются чрезвычайно тонкими, чувствительными к изменению параметров сварки. Они не носят универсального характера и для каждой группы сплавов могут иметь место свои особенности и закономерности. Но в целом можно констатировать, что структура и свойства сварного ядра не являются "слабым местом" сварного соединения, ударная вязкость металла ядра достаточно высокая.

Проблемой сварного соединения при СТП может быть граница между ядром и зоной термомеханического влияния (ЗТМВ). В отличие от сварки плавлением, когда зерна металла сварочной ванны начинают кристаллизоваться от оплавленных зерен основного металла по зоне сплавления, при СТП отсутствует прямая кристаллическая связь между металлом ядра и металлом ЗТМВ. Резкий переход от одного типа структуры к другому может вызвать катастрофическое снижение ударной вязкости по границе. Следует отметить, что в зависимости от режимов сварки характер границы может меняться. Приведенная на рис. 14, а структура, в которой на границе ЗТМВ сформировались рекристаллизованные зерна,

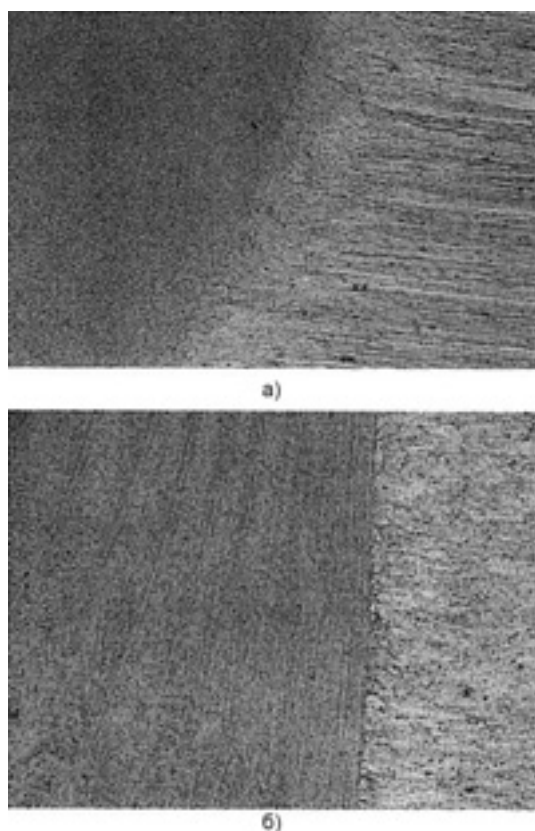


Рис. 14. Микроструктура границы ядра и ЗТМВ сплава системы Al—Zn—Mg—Cu: а — размытая граница; б — резкий переход

прилегающие к зернам ядра, более благоприятна, чем структура на рис. 14, б.

Таким образом, управление структурой за счет изменения параметров сварки является важнейшей задачей, от решения которой зависит расширение использования СТП.

## ВЫВОДЫ

1. Сварка трением с перемешиванием (СТП) является технологически сложным процессом, требующим оптимального сочетания большого комплекса параметров и соблюдения специальных требований к сборке. В настоящее время в результате исследований, проведенных специалистами разных стран, достигнуто понимание влияния технологических факторов на формирование соединений, разработаны конструкции инструмента, сформулированы требования к сборке деталей, что в итоге позволяет получить качественное формирование соединений без дефектов в виде непровара, трещин и пор.

2. Применение сварки трением с перемешиванием открывает новые возможности для создания литосварных конструкций, обеспечивая уровень свойств сварных соединений на уровне свойств, достигаемых при сварке деформируемых свариваемых сплавов.

3. Целесообразность применения сварки трением с перемешиванием термически неупрочняемых свариваемых сплавов должна определяться исходя из задач, которые должны быть решены при создании сварной конструкции. Несмотря на очевидные экологические преимущества, снижение затрат на вспомогательные материалы, снижение деформаций по сравнению с дуговой сваркой, низкая стойкость инструмента, длительный цикл сварки создают процессу СТП серьезную конкуренцию со стороны других прогрессивных способов сварки плавлением, например, лазерной и гибридной.

4. Решение проблемы образования горячих трещин, подавление образования пористости в сварном шве и даже получение высоких прочностных свойств сварных соединений (~500 МПа) отнюдь не свидетельствуют о том, что традиционно несвариваемые сплавы системы Al—Zn—Mg—Cu можно без проблем использовать для изготовления сварных конструкций. Характер термического воздействия на зону термического влияния при СТП в целом аналогичен сварке плавлением, что вызывает снижение прочности и коррозионной стойкости. Применение рациональной послесварочной термической обработки позволяет обеспечить высокий комплекс свойств сварного соединения. СТП позволяет расширить номенклатуру алюминиевых сплавов, применяемых для создания сварных конструкций.

5. Несмотря на многочисленные исследования, до настоящего времени в полной мере не изучен процесс формирования структуры в ядре сварного шва. Резкий переход от одного типа структуры в ядре к другому неблагоприятен для обеспечения ударных и динамических характеристик соединения. Учитывая, что в настоящее время принципиально решена проблема получения бездефектного сварного соединения, актуальной задачей СТП является управление структурой и термическим циклом сварки за счет рационального выбора технологических параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andersson A., Norlin A., Backlund J. Adventure Technology and Process. Stuttgart, Germany, 1997. P. 105.
2. Midling O. Friction stir welding aluminium — process and applications // 7<sup>th</sup> INALCO Conference Cambridge, 1998.
3. Johnsen M. R. Friction Stir welding takes off at Boeing // Welding Journal. 1999. № 2. P. 35—39.
4. Friction stir welding system development for thin gauge aerospace structures / B. Christner, M. Hansen, M. Skinner, G. Sylva // 4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
5. Christner B., McCoury J., Higgins S. Development and testing of friction stir welding as a joining method for primary aircraft structure // 4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
6. Froes F. H. Fourth international symposium on FSW (review) // Light metal Age. 2003. N 40. P. 38—40.
7. Gerhard Engelhard Orbital friction stir welding of aluminium pipes // 3<sup>rd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
8. Nicholas E. D., Kalle, Stephan W. Friction Stir Welding — a decade on // IIV Asian Pacific International Congress, Sydney, 2000.
9. Midling O. T., Kvale J. S., Oma S. Application of prefabricated friction stir welded panels in catamaran building // 4<sup>th</sup> International Forum on aluminium ships. New Orleans, 2000.
10. Colligan C. J. Метод сварки корня шва. EP0810 054 A1.
11. Friction stir welding — variants and process techniques / W. M. Thomas, I. M. Norris, D. G. Staines et al. // Соединение алюминиевых конструкций. М., 2007.
12. Taban E., Kaluc E. Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy.
13. Okamoto K., Hirano S., Inagaki M. Joining Dissimilar Aluminium Alloys // Welding Journal. 2006. № 4. P. 38.
14. Light Metal Industries, Ltd, Hiroaki Sato / Masaki Kumagai, Sunao Tanaka, Hidenori Hatta and Hideo Yoshida Sumitomo // Integral wing panel for airplanes produced by friction stir welded extrusion. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
15. Marie F. EADS Corporate Research Center France "Development of Friction Stir Welding of 7000 serie extrusions for central wing box application" // 3<sup>rd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
16. Friction Stir Welding and Hybrid Laser Welding Applied to 6056 Aluminium Alloy / J. Verwimp, J. Gedopt, W. Van Haver et al. // Соединение алюминиевых конструкций. М., 2007.

УДК 621.701.07.621.001.57

**А. В. БАЖАНОВ, инж., В. А. ФРОЛОВ, д-р техн. наук,  
С. А. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук, В. В. СТЕПАНОВ, канд. техн. наук  
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского**

## Моделирование процесса низкотемпературной светолучевой пайки изделий электронной техники

Современное производство изделий электронной техники (ИЭТ) характеризуется малыми размерами, большим разнообразием типов конструкций, методов монтажа и способов получения неразъемных соединений, различным пространственным положением соединяемых элементов.

В основном при сборке применяют низкотемпературную пайку, которая имеет следующие преимущества:

- возможность получения нескольких соединений одновременно;
- возможность поэтапного присоединения элементов к конструкции (ступенчатая пайка);
- широкие возможности по механизации и автоматизации технологического процесса и др.

При выборе способа низкотемпературной пайки необходимо произвести конструктивно-технологический анализ конструкции паяемых изделий, который включает анализ эле-

ментов, входящих в состав узлов (наличие термочувствительных элементов, барьерных и технологических покрытий), типов соединений, плотности монтажа элементов и т. д. Чаще всего при пайке элементов РЭА применяют пайку волной припоя, а также печную пайку в конвекционных и инфракрасных печах. Однако в ряде случаев конструкция изделия не допускает использования общего нагрева и контактного ввода энергии. Для пайки таких конструкций обычно используют лазерный или световой луч [1].

Для получения качественных соединений таких изделий необходим правильный выбор параметров режима, таких как длительность процесса нагрева и температура нагрева, при выборе которых проводят трудоемкие эксперименты по пайке натуральных образцов или осуществляют расчетную оценку параметров, используя

математические модели процесса нагрева. Применение последних при обеспечении соответствующей адекватности является более рациональным способом решения задачи, которая может быть выполнена при минимальных затратах.

На кафедре "Технология сварочного производства" института проводятся исследования по разработке технологии низкотемпературной светолучевой пайки (СЛП) узлов ИЭТ. В состав этих изделий входят термочувствительные электронно-оптические элементы (суперлюминесцентные и лазерные диоды), теряющие свои излучающие свойства при нагреве до температуры свыше 125 °С, поэтому для монтажа таких элементов требуется локальный дозированный ввод энергии. Наличие электронно-оптических элементов исключает возможность применения флюсов, в связи с чем для обеспечения удовле-

творительной смачиваемости на паяемые элементы наносится технологическое золотое покрытие.

Для реализации процесса низкотемпературной светолучевой пайки в данной работе предложено использовать в качестве припоя сплав на основе индия, который имеет низкую склонность к растворению золотого покрытия и обеспечивает удовлетворительные характеристики смачивания и растекания припоя без использования флюса. В качестве источника теплоты использовали малогабаритную светолучевую установку "Луч-3М". Основой установки светолучевого нагрева является модуль лучистого нагрева (МЛН), который состоит из излучателя, фокусирующей оптической системы (ФОС), элементов токоподвода и юстировочной системы. В состав МЛН установки "Луч-3М" входят ФОС на основе эллипсоидного отражателя и лампа серии ДКсШ мощностью от 100 до 500 Вт.

Основными параметрами процесса СЛП являются ток лампы и длительность процесса нагрева [2, 3]. Для определения этих параметров разработана математическая модель процесса нагрева паяемых деталей сфокусированным световым лучом и течения припоя по зазору под действием капиллярных сил и силы тяжести.

Данная математическая модель представляет программу "Ray-1", написанную на языке Visual Basic и состоящую из двух модулей, позволяющих произвести расчет выходных энергетических характеристик МЛН, а также тепловых полей, которые формируются в результате взаимодействия лучистого потока с поверхностью паяемых деталей, и длительности процесса нагрева изделия на номинальном режиме работы лампы.

В зависимости от конструкции МЛН и паяемых деталей модули программы могут изменяться.

Расчет энергетических характеристик МЛН производили по методике, предложенной в работе [4]. Согласно этой методике, для расчета плотности лучистого потока в пятне нагрева светящееся тело дуги лампы разбивается на пять равноярких фиктивных источников излучения. Исходя

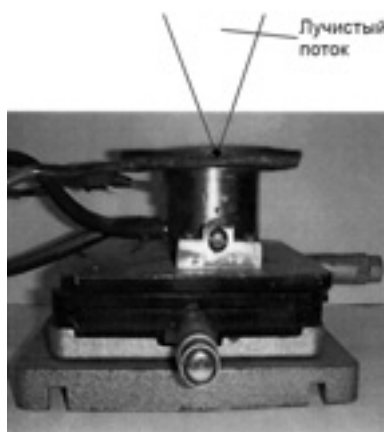


Рис. 1. Внешний вид стержневого радиометра

ными данными для расчета являются геометрические и оптические характеристики отражателя МЛН, а также светотехнические характеристики лампы. Для расчета плотности лучистого потока использовали следующее выражение:

$$E_2(r) = 2\pi \int_{\varphi_0}^{\varphi_m} \int_0^l [B(\varphi, l) \rho \xi(r) \sin(\beta(\varphi)) \times \cos(\beta(\varphi))] d\beta(\varphi), \quad (1)$$

где  $E_2(r)$  — плотность лучистого потока в пятне нагрева на расстоянии  $r$  от оси оптической системы;  $B(\varphi, l)$  — энергетическая яркость  $l$ -го фиктивного источника света под углом наблюдения  $\varphi$ ;  $\rho$  — коэффициент отражения зеркальной поверхности отражателя;  $\beta(\varphi)$  — угол падения на поверхность обрабатываемой детали светового луча, отраженного от элементарной кольцевой зоны отражателя, расположенной под углом  $\varphi$  к оси последнего;  $\xi(r)$  — коэффициент заполнения, учитывающий долю участия элементарного отображения фиктивного источника света от произвольной точки кольцевой зоны отражателя, лежащей под углом  $\varphi$  к оси последней, в формировании плотности лучистого потока в пятне нагрева.

Предложенная методика расчета реализована путем интегрирования численным методом уравнения (1):

$$E_2(r) = 2\pi \sum_{\varphi=0}^{\varphi_m} \sum_{i=1}^5 B_i(\varphi) \rho \xi(r) \times \sin(\beta) \cos(\beta) \Delta\beta. \quad (2)$$

Компьютерная программа позволяет исходя из распределения плотности мощности лучистого потока

по радиус-вектору выбрать оптимальный тип отражателя и лампы в зависимости от решаемой технологической задачи.

Для проверки адекватности результатов моделирования проводили экспериментальные исследования распределения плотности мощности лучистого потока в пятне нагрева. Исследования проводили с использованием малогабаритной светолучевой установки "Луч-3М" с МЛН на основе эллипсоидного отражателя диаметром 115 мм, с осевым увеличением  $M_0 = 5,6$ . В качестве источников излучения использовали лампы серии ДКсШ мощностью 0,12—0,5 кВт.

Распределение плотности мощности лучистого потока определяли при помощи специально разработанного радиометра стержневого типа. Внешний вид радиометра приведен на рис. 1.

В стержневом радиометре приемником излучения служит зачерненная поверхность торца медного стержня диаметром 1 мм, другой конец которого охлаждается водой. Плотность лучистого потока рассчитывают по разности температур между двумя точками стержня, которую измеряют при помощи дифференциальной термпары, образованной тонкими константановыми проводниками и участком медного стержня. Сравнительно низкая тепловая инерционность радиометра (2 с) позволяет непрерывно записывать кривые распределения плотности лучистого потока при перемещении радиометра в плоскости пятна нагрева при помощи двухкоординатного столика.

Измерения плотности мощности лучистого потока в горизонтальной плоскости производили при радиус-векторе, равном 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 и 2,5 мм (дальнейшее увеличение радиус-вектора нецелесообразно, так как диаметр пятна нагрева в рабочем фокусе рассматриваемой ФОС не превышает 5 мм). Точность перемещения составляла 0,01 мм. Регистрацию данных производили при помощи аналогово-цифрового преобразователя и ПЭВМ. На рис. 2 приведено графическое сопоставление экспериментальных и расчетных данных распределения плотности мощности лучистого потока в пятне нагрева. Проверка результатов моде-

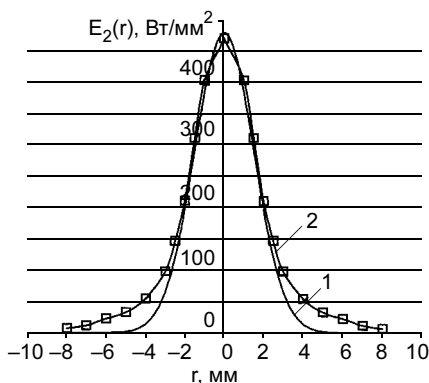


Рис. 2. Распределение плотности мощности лучистого потока в пятне нагрева ( $M_0 = 5,6$ , лампа ДКсШ-500,  $I_n = 25$  А,  $U_n = 20$  В): 1 — расчетная кривая; 2 — экспериментальная

лирования с использованием критерия Фишера [5] подтвердила их воспроизводимость с погрешностью 5 %.

На рис. 2 видно, что наибольшее расхождение расчетных и экспериментальных данных наблюдается при значениях радиус-вектора более 3 мм. Это можно объяснить тем, что при расчетах ввиду малой значимости не учитывается вклад в формирование пятна нагрева излучения анода лампы. Также следует отметить, что для рассматриваемых технологических задач диаметр пятна нагрева не должен превышать 7 мм и периферийный лучистый поток обычно отсекается диафрагмой.

Второй модуль программы позволяет рассчитать тепловые поля, формирующиеся в результате взаимодействия сфокусированного светового луча с поверхностью паяемых деталей. С помощью этого модуля программы выполнены расчеты тепловых полей при пайке элементов стыковочного узла волоконно-оптического датчика и пайки печатных плат (ПП) с электрорадиоэлементами (ЭРЭ) штырькового типа.

Схема нагрева элементов стыковочного узла волоконно-оптического датчика приведена на рис. 3, а.

Стыковочный узел датчика предназначен для размещения и фиксации взаимного расположения (юстировки) оптических элементов датчика. Юстировка стыковочного узла производится вручную путем нагрева паяного соединения выше температуры плавления металла паяного шва и перемещения основания оп-

тической системы относительно контактной пластины при непрерывном визуальном контроле оператора. Время единичной операции юстировки составляет 5—6 с. Следовательно, необходимо, чтобы все это время расплав металла паяного шва оставался в жидком состоянии, чего можно добиться путем рационального подбора параметров режима нагрева. Качество юстировки проверяли по согласованию входного и выходного сигналов датчика. При неудовлетворительном их согласовании юстировка производится повторно. В ходе изготовления прибора может производиться до пяти таких перепаек.

В общем виде процесс распространения теплоты в паяемых деталях описывается следующим выражением [6]:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(T) \text{grad}(T)], \quad (3)$$

где  $C_V(T)$  — объемная теплоемкость.

Для решения данной задачи целесообразно использование декартовых координат, при которых уравнение принимает вид:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (4)$$

Представленное уравнение решается в конечных разностях по неявной схеме.

Размеры основания позволяют при расчетах рассматривать его как полубесконечное тело. Следовательно, для определения параметров режима распайки достаточно рассчи-

тать температурные поля в контактной пластине. Граничные условия определяются конструкцией паяемых элементов и расположением паяемого соединения относительно оптической оси светового луча.

При расчете были заданы следующие граничные условия.

- Поверхность  $ABB_1A_1$  (см. рис. 3) — граничные условия 2-го рода.

Распределение плотности теплового потока зависит от распределения плотности лучистого потока, коэффициента поглощения лучистого потока поверхностью паяемых элементов и параметров теплообмена. Тепловой поток сфокусированного светового луча рассчитывали по следующему уравнению:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -A_T(T) E_2(x, y) + (q_\alpha + q_\sigma), \quad (5)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности кофара;  $A_T(T)$  — коэффициент поглощения технологического покрытия;  $(q_\alpha + q_\sigma)$  — конвективная и лучистая составляющие теплообмена;  $E(x, y)$  — распределение плотности мощности лучистого потока

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial z}. \quad (6)$$

- Поверхности  $ABCD$ ,  $A_1B_1C_1D_1$  и  $AA_1D_1D$ ,  $DCC_1D_1$  — граничные условия 3-го рода, которые определяются следующим образом:

$$q_\alpha = \alpha_0(T - T_H), \quad (7)$$

где  $\alpha_0$  — коэффициент конвективного теплообмена;  $T_H$  — исходная температура деталей.

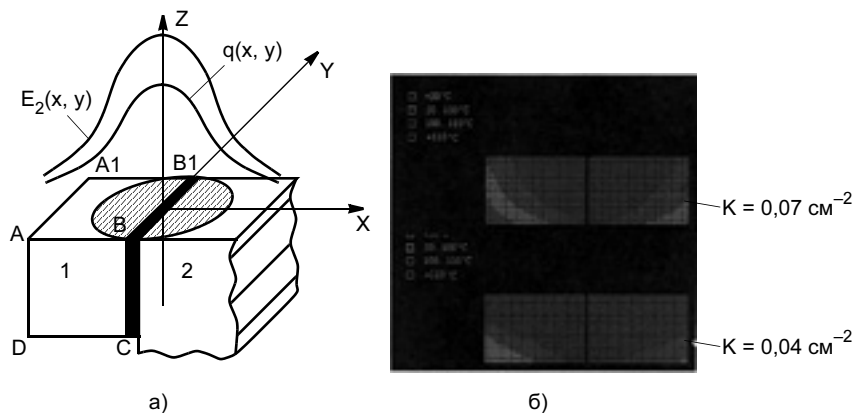
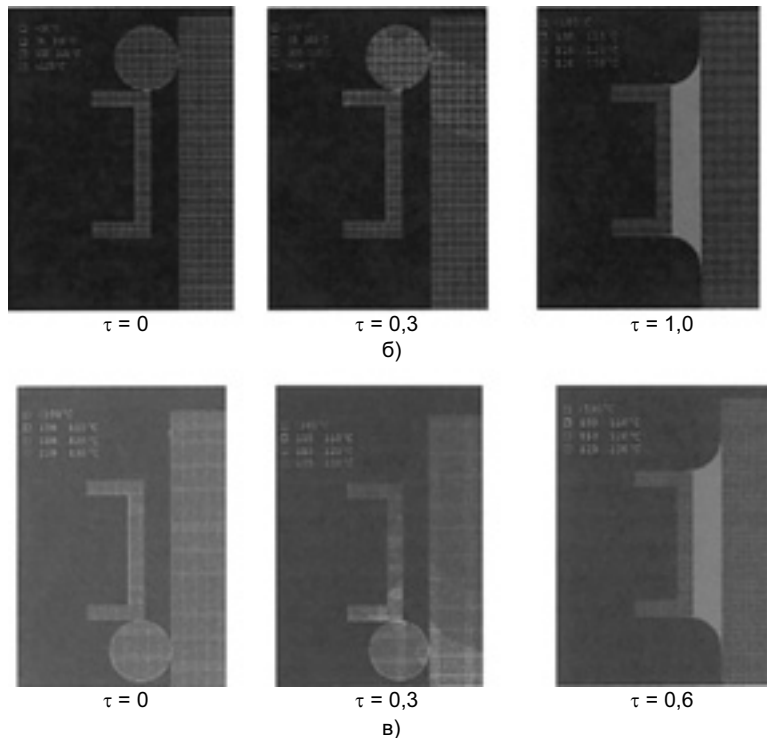
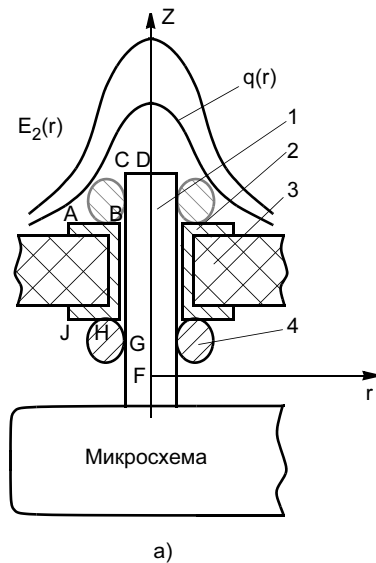


Рис. 3. Схема процесса нагрева (а) и тепловые поля при пайке элементов стыковочного узла волоконно-оптического датчика (б) при различных значениях коэффициента сосредоточенности лучистого потока  $K$



**Рис. 4.** Схема процесса нагрева (а) и расчетные тепловые поля (б, в) в ЭРЭ штырькового типа: б, в — припой установлен со стороны источника теплоты и со стороны, обратной источнику теплоты, соответственно: 1 — штырек; 2 — втулка; 3 — плата; 4 — припой

- Поверхность  $BB1C1C$  — граничные условия 4-го рода.

Использование данного модуля компьютерной программы "Ray-1" позволяет рассчитать длительность импульса излучения при номинальном режиме работы излучателя, в течение которого паяемые детали получают количество теплоты, необходимой для поддержания температуры соединения выше температуры ликвидуса припоя на  $5\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 6 с, для выполнения юстировки паяемых элементов стыковочного узла волоконно-оптического датчика. Результаты расчетов тепловых полей приведены на рис. 3, б. В качестве основного металла использовали сплав 29НК, а в качестве припоя — сплав системы  $\text{In—Cd—Zn—Ag}$ . Коэффициент поглощения поверхности принимали равным соответствующему показателю золота.

При моделировании процесса светолучевой пайки ПП с ЭРЭ штырькового типа использовали расчетную схему, приведенную на рис. 4, а.

Для данной конструкции целесообразно использование цилиндриче-

ской системы координат. При этом уравнение (3) принимает вид

$$C\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (8)$$

где  $r$  — координата по радиус-вектору.

Представленное уравнение решается в конечных разностях по неявной схеме. Граничные условия определяются конструкцией паяемых элементов, формой и местом размещения навески припоя и расположением паяемого соединения относительно оптической оси светового луча.

При расчете были заданы следующие граничные условия.

- Поверхности  $AB$  и  $CD$  (см. рис. 4) — граничные условия 2-го рода.

Тепловой поток сфокусированного светового луча рассчитывали по следующему уравнению:

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial z} = -A_T(T)E_2(r) + (q_\alpha + q_\sigma). \quad (9)$$

- Поверхность  $BHGC$  (см. рис. 4) — граничные условия 3-го рода.

- Поверхности соприкосновения навески припоя с элементами вывода  $G1$  и  $H1$  (см. рис. 4, а) — граничные условия 4-го рода.

Результаты расчета тепловых полей формируются в графическом виде (см. рис. 4, б, в). Материал втулки и штырька — медь  $\text{M0}$ , а технологическое покрытие — золото толщиной 3,0 мкм, припой — системы  $\text{In—Cd—Zn—Ag}$ .

В работе исследовали два варианта укладки припоя. При размещении припоя со стороны источника теплоты длительность процесса нагрева существенно больше, чем при размещении его со стороны, обратной источнику теплоты (в рассмотренном случае на 0,4 с). Это можно объяснить частичным экранированием лучистого потока зеркалом расплава припоя и неравномерным распределением температуры вдоль оси штырька. При установке припоя со стороны, обратной источнику теплоты, нагрев протекает в две стадии. На первой стадии имеют место нестационарные условия нагрева. По истечении некоторого промежутка времени (0,6 с) градиент температур в паяемых элементах выравнивается, и условия

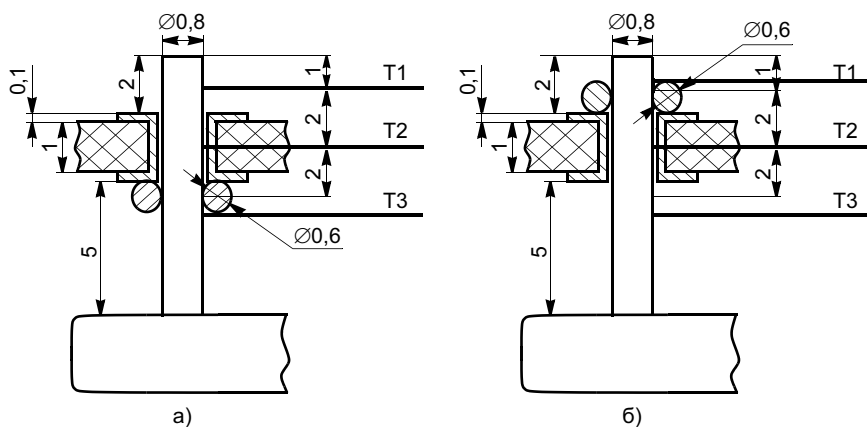


Рис. 5. Геометрические параметры образцов имитаторов ПП с ЭРЭ для исследования температурных полей: а, б — припой уложен со стороны, обратной источнику, и со стороны источника соответственно

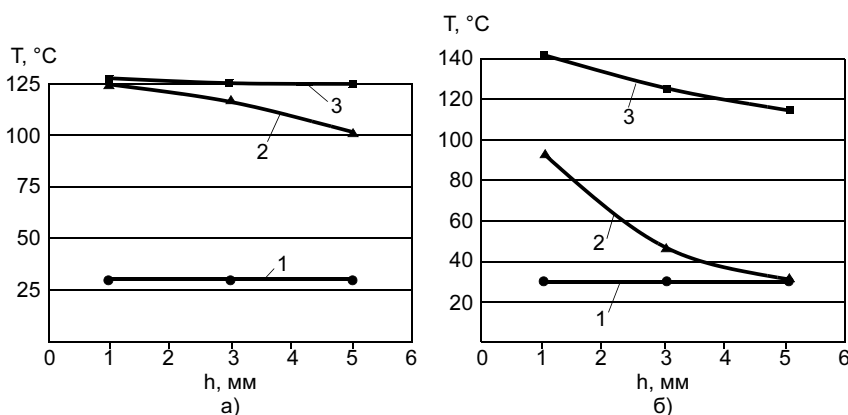


Рис. 6. Распределение температуры вдоль оси штырька диаметром 0,8 мм: а, б — см. рис. 5; 1—3 —  $t$  равно 0, 0,3 и 1,0 с соответственно

становятся стационарными. Это объясняется низкой поглощающей способностью золотого покрытия и высокой теплопроводностью деталей. Длительность процесса нагрева до установления стационарных условий в этом случае соответствует длительности заполнения припоем зазора.

Процесс распространения теплоты в паяемых деталях изучали экспериментально на фрагментах печатных плат с установленными в них ЭРЭ штырькового типа. В качестве припоя использовали разработанный сплав системы In—Cd—Zn—Ag. Геометрические параметры образцов приведены на рис. 5.

К штырьковому выводу навесного ЭРЭ с помощью лазерной сварки присоединяли три термопары константан—медь с толщиной термоэлектродов 0,05 мм. Расстояние термопар № 1, 2 и 3 от торца вывода составляет соответственно 1, 3 и 5 мм.

Нагрев имитатора производили сфокусированным световым лучом на номинальном режиме работы лампы ДКсШ-200 при  $I_{л} = 10$  А,  $U_{л} = 17$  В. В ходе нагрева производился постоянный опрос сигнала термопар с интервалом 0,1 с с помощью трехканального потенциометра. Эксперимент продолжался до момента достижения с термопары № 3 сигнала, соответствующего температуре начала плавления припоя, равной 125 °С. Сигнал с потенциометра при помощи аналогово-цифрового преобразователя записывали в оперативную память ПЭВМ в виде таблицы. Графическая зависимость распределения температуры паяемых деталей по длине штырька от длительности импульса облучения приведена на рис. 6.

Эксперименты подтвердили, что в случае укладки припоя со стороны, обратной источнику, стационарный режим достигается за 0,6 с.

Проведенная проверка адекватности результатов моделирования показала их соответствие экспериментальным данным при уровне значимости  $p = 0,05$ . Следовательно, создавая блочно-модульные компьютерные модели на основе постоянной оболочки программы и дополнительных конкретных расчетных модулей в зависимости от изделия, формы и места расположения припоя, можно определить параметры режима пайки и оптимизировать технологию СЛП и конструкцию МЛН.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель процесса низкотемпературной светолучевой пайки изделий электронной техники, состоящая из модулей расчета выходных энергетических характеристик сфокусированного луча и тепловых полей в паяемых узлах. На базе математической модели создана компьютерная программа "Ray-1", позволяющая рассчитывать энергетические параметры сфокусированного светового луча и технологические параметры режима пайки.

2. Исследован характер тепловых полей при пайке сфокусированным световым лучом и определена оптимальная схема укладки припоя при сварке ПП с ЭРЭ штырькового типа, что позволяет минимизировать длительность теплового воздействия источника теплоты на паяемые элементы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технологические особенности низкотемпературной пайки оптических модулей* / А. В. Бажанов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, В. А. Фролов // Сварочное производство. 2006. № 1. С. 22—24.
2. *Низкотемпературная пайка узлов радиоэлектронной аппаратуры сфокусированным световым лучом* / А. В. Бажанов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, В. А. Фролов // Сварочное производство. 2007. № 5. С. 31—36.
3. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А. Сварка и пайка световым лучом*. М.: Машиностроение, 1979. 41 с.
4. *Холодилов В. И. Распределение лучистости ксеноновых ламп с короткой дугой* // Светотехника. 1973. № 8. С. 17—19.
5. *Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии*. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.
6. *Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке*. М.: Машгиз, 1953. 296 с.

**О. А. БАРАБАНОВА, д-р техн. наук, В. И. МОГОРЫЧНЫЙ, канд. техн. наук,  
С. В. НАБАТЧИКОВ, инж.  
ООО "КриоКомпозит" (Москва)**

## **Создание слоистых композиционных материалов для производства высокоэффективной и компактной теплообменной аппаратуры способом диффузионной сварки**

Одной из причин, сдерживающих использование композиционных материалов (КМ) при производстве различных изделий, является сложность их изготовления, особенно когда процесс создания КМ совмещен с циклом его производства. Проблеме разработки научных основ создания слоистых композиционных материалов (СКМ) для производства высокоэффективной и компактной теплообменной аппаратуры способом диффузионной сварки (ДС) посвящена данная работа.

Использование КМ при изготовлении теплообменной аппаратуры сопряжено с необходимостью реализовать три важных преимущества аппаратов интенсивной теплотехнологии: малая теплопроводность вдоль стенок теплообменника и высокая компактность теплообменной поверхности, изготовленной из металлов с высокой теплопроводностью (алюминия, меди). То есть это должен быть материал слоистый, особенностью которого является тепловая анизотропия коэффициентов теплопроводности в двух взаимно перпендикулярных направлениях: теплопроводность вдоль металлических пластин (алюминиевых, медных) должна быть сохранена, а в ортогональном направлении она должна быть уменьшена в сотни раз.

Факторы, определяющие конструктивно-технологический облик новых создаваемых композиционных материалов, условно можно объединить в три группы: эксплуатационные, технологические и конструктивные. Взаимосвязь перечисленных факторов требует комплексного подхода к проблеме выбора исходных компонентов, проектирования соединения композита и необходимости вести все эти процессы одновременно с процессом создания всей конструкции теплообменника в целом.

При выборе компонентов СКМ исходили из необходимости обеспечить заданный уровень анизотропии, пониженные массовые характеристики при доступности этих материалов компонентов. Способ соединения должен обеспечить решение задачи функционирования конструкции и возможность регулирования уровня анизотропии при использовании стандартных приемов переработки КМ.

На основании проведенного информационного поиска выполнены теоретические и экспериментальные

исследования, в результате которых определены классы исходных материалов и способ их переработки в изделие.

В качестве исходных материалов использовали алюминий или медь технической чистоты и стекла (многокомпонентные оксидные системы), синтезированные на основе оксидов свинца, бора, цинка, кремния, меди. СКМ получали способом диффузионного соединения пластин из алюминия (меди) с нанесенным одним из методов тонкопленочной технологии тонкодисперсным порошком стекла.

Основная сложность получения слоистого металло-стеклянного КМ на основе алюминия заключается в том, что для алюминия нет стекол, согласующихся с ним по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР). Рассогласованность составляет 300 %, а хорошо известно, что даже их незначительная разность вызывает напряжения, приводящие к возникновению потенциальной энергии деформации, снижающей прочность соединения. Поэтому при создании СКМ все усилия были направлены на снижение напряжений в контакте алюминий—стекло. А этого можно достигнуть следующими способами:

- уменьшением толщины слоя стекла;
- формированием между стеклом и алюминием переходного слоя с согласованными свойствами;
- управлением структурой стекла.

Что значит управлять структурой стекла? Для слоистых КМ характерным процессом разрушения является расслаивание, а из механики композитов известно, что образование металлических частиц в зоне соединения будет препятствовать распространению сквозных трещин через стеклообразные связи. Физическая модель СКМ приведена на рис. 1.

Формирование СКМ через слои стекла проходит следующие этапы: оплавление стеклопорошка, растекание расплавленного стекла по металлу; образование соединения и затвердевание расплава.

Опираясь на обширный опубликованный материал, можно сделать вывод, что прочная связь между металлом и стеклом осуществляется в результате взаимодействия последних. Взаимодействие между этими компонентами может быть химическое, диффузионное или



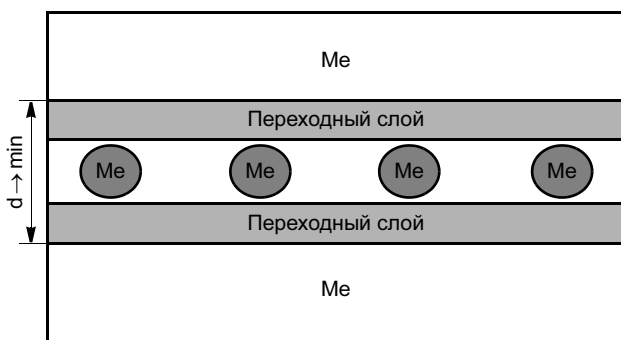


Рис. 1. Физическая модель СКМ металл—стекло

диффузионно-химическое. Возможность развития взаимодействия, приводящего к образованию переходного слоя, который содержит новые продукты реакций, является главным условием прочного соединения разнородных материалов.

Закономерности природы соединения металл—стекло послужили предметом многочисленных исследований, небольшая часть которых изложена в работах [1—11]. Процесс образования прочной связи можно разделить на три стадии, при этом наличие первой стадии обеспечивает возможность протекания второй и третьей. В течение первой стадии осуществляются поверхностные явления типа физической адсорбции и смачивания. Вторая стадия — образование химической связи между металлом и стеклом. Третья стадия характеризуется развитием химических процессов в объеме, длительной диффузией и образованием переходных слоев. В ряде случаев, особенно при высоких температурах, бывает трудно отделить стадию химического взаимодействия от последующего процесса диффузии между вступившими в химическую связь компонентами, которая и обеспечивает возникновение промежуточного слоя. После образования этого слоя прочность соединения определяется физико-механическими характеристиками слоя и его толщиной.

Согласно работе [4], развитие реакций с образованием переходного слоя происходит в результате взаимодействия кислотно-основного (донорно-акцепторного) типа, приводящего к координационно-ковалентной связи. Кислотные оксиды выполняют роль акцепторов электронов, а основные — роль доноров электронов. Причем понятия "донор" и "акцептор" здесь относительны, ибо в сочетании с одними оксидами данный оксид выступает как акцептор электронов, в сочетании с другими — в качестве донора электронов. Мерой донорных и акцепторных свойств атомов предложено считать значения эффективного заряда ядра  $Z$  или эффективной силы притяжения внешних валентных электронов к ядру атома  $F$ :

$$F = e^2 Z^* / r^2,$$

где  $e$  — заряд электрона;  $r$  — расстояние от ядра до внешних электронов.

Образование прочной ковалентной связи на поверхности раздела металл — оксидный расплав возможно по механизму переключения (трансляции) валентных связей [3, 4]. Впервые идея переключения валентных связей

была применена Р. Л. Мюллером при разработке теории вязкотекучести и текучести тугоплавких стекол в области критических температур.

В соответствии с этой гипотезой, если расплавленное стекло настолько близко прилегает к окисленной поверхности металла, что возможно проявление парно-электронной связи, то процесс образования прочного соединения стекла с металлом может протекать вследствие переключения валентных связей. Благодаря переключению (трансляции) связей возможно такое их распределение, что часть атомов кислорода будет одной своей валентной связью связана с атомом алюминия (меди), а другой — с атомом свинца или бора. Этот процесс может идти так глубоко, что атомы алюминия (меди) окажутся в стекле. В результате перегруппировки атомов создается пограничный слой с измененными физико-химическими свойствами по сравнению с основной массой стекла. Возможность переключения валентных связей определяется энергией единичной связи и плотностью валентной сетки.

Возможность перехода ко второй стадии и конкретный характер взаимодействия на второй и третьей стадиях определяются свойствами взаимодействующих сложных веществ металл—стекло и отдельных компонентов, в них входящих. Это сложный физико-химический процесс, основная роль в котором принадлежит химическому взаимодействию металла и его оксида с компонентами стекла. При этом максимальная прочность соединения достигается при наличии на металле низшего оксида (для меди это закись меди —  $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

Для металлов, на поверхности которых присутствуют оксидные пленки в процессе соединения, создаются условия для образования в оксидных пленках дефектов типа микротрещин (ТКЛР алюминия примерно в 3 раза больше ТКЛР его оксида), которые служат диффузионными каналами в процессе жидкофазного взаимодействия металлических пластин с оксидным расплавом, что создает условия для диспергирования оксидной пленки в расплав стекла.

Явление диспергирования твердых материалов под действием жидких сред впервые обнаружили М. Фольмер и П. А. Ребиндер.

В зависимости от степени снижения межфазной энергии на границе твердое тело — жидкая фаза с учетом различных факторов (структуры, размера зерен, характера химического взаимодействия, температуры, времени, механического воздействия) различают самопроизвольное и квазисамопроизвольное диспергирование.

Перспективным является самопроизвольное диспергирование оксидной пленки, которое определяется кооперативным вкладом процессов межзеренного проникновения атомов жидкой фазы в результате диффузии и адсорбции последних на поверхности зерен при одновременном зернограничном проскальзывании, облегченном этими процессами и вакансионным ростом пор на границах зерен [12]. Диспергирование оксидной пленки металла в расплав стекла будет проходить тем интенсивнее, чем выше температура, давление и время соединения металлических пластин, ниже температура плавления оксидного расплава и выше его химическая актив-

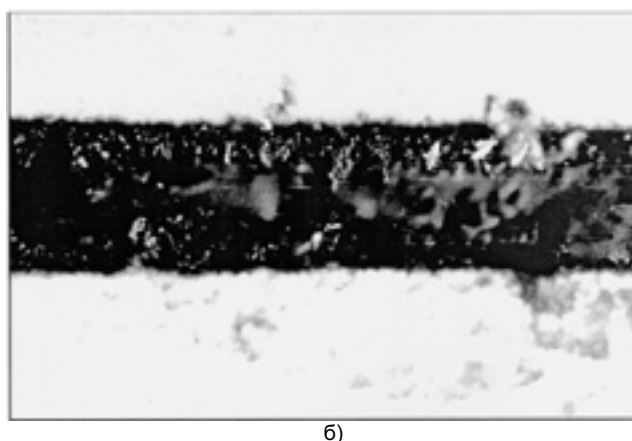
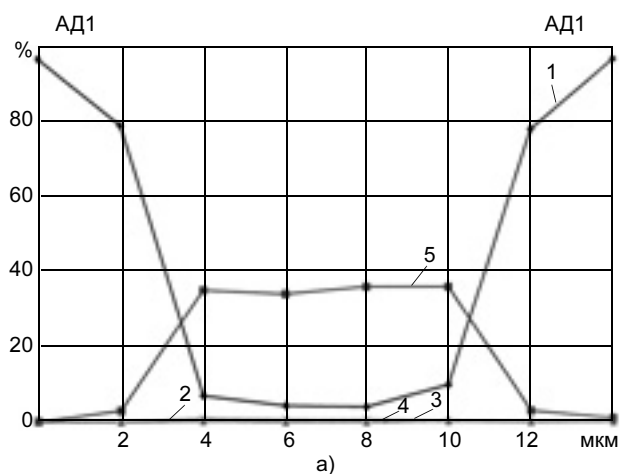
ность, так как продукты реакции также способствуют диспергированию оксидной пленки металла.

При смачивании алюминия (меди) оксидным расплавом создаются условия для реализации диффузионно-химического механизма взаимодействия на границе раздела твердой и жидкой фаз. Поскольку на этой границе реакции идут в гетерогенной среде между алюминием (медью) и стеклом, находящимися в различных агрегатных состояниях, то развитие реакций связано не только с физико-химическими превращениями, но и с переносом вещества из глубины фаз к поверхности взаимодействия, а также с удалением продуктов взаимодействия из зоны реакции. Кинетика этих реакций обусловлена диффузией. Скорость процессов взаимодействия между алюминием (медью) и оксидным расплавом зависит от переноса входящих в их состав элементов в зону контакта между ними, активности взаимодействия и удаления продуктов реакции. Время формирования соединения определяется скоростью прохождения этих стадий процесса. Чем медленнее протекают диффузионные процессы, тем продолжительнее время ДС СКМ.

Процесс затвердевания оксидного расплава начинается с образования центров кристаллизации, т. е. зародышей, которые при определенных размерах обретают способность к устойчивому росту. Причем фаза, возникающая первой, не является наиболее легкоплавкой в данной системе, т. е. не находится в равновесии с расплавом стекла, и ее природа уже не определяется условиями равновесия. Основную роль в этом случае начинают играть другие факторы, и в частности теплота образования соединения.

Проведенные исследования показали, что процесс образования центров кристаллизации в зоне соединения связан с нарушением сплошности оксидной пленки для алюминия, диффузией алюминия (меди) в оксидный расплав, наличием катализаторов кристаллизации в исходном стекле. Однако именно нарушение сплошности оксидной пленки выводит систему алюминий — оксидный расплав из квазиравновесного состояния — трансляции химических связей на поверхности раздела фаз. Это тот фактор, действие которого приводит к образованию стеклокристаллической структуры в зоне соединения, не кристаллизующейся во всем температурно-временном интервале ведения процесса ДС СКМ. Следовательно, алюминий является активатором кристаллизационных процессов в зоне соединения, так как он заменяет одну реакцию другой, что и приводит к образованию химических связей большей прочности. В результате на границе раздела вновь образуются оксид алюминия  $Al_2O_3$  и центры кристаллизации. Скорость зарождения кристаллов при таком процессе определяется двумя факторами [13]: энергетическим (изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  при образовании кристалла) и диффузионным — диффузия алюминия в оксидный расплав (рис. 2, а). Таким образом, диспергирование оксидной пленки способствует образованию центров поверхностной кристаллизации оксидного расплава в условиях направленного диффузионного потока.

Кристаллизация зоны соединения в процессе ДС СКМ протекает в соответствии с основными закономер-



**Рис. 2. Поверхностная кристаллизация в стекле при ДС СКМ:** а — распределение элементов в зоне соединения (1 — Al, 2 — Zn, 3 — Cu, 4 — Mg, 5 — Pb); б — микроструктура зоны соединения СКМ ( $\times 1000$ )

ностями, но в связи со спецификой и условиями процесса имеет некоторые особенности:

- готовую подложку, которой является поверхность алюминированной пластины, контактирующая с оксидным расплавом;
- небольшой объем расплава и размеры кристаллизующейся ванны, представляющей жидкость, помещенную между двумя поверхностями алюминиевых пластин, находящихся в твердом состоянии;
- направленный теплоотвод в процессе кристаллизации, а также большую скорость и неравномерность этого процесса.

Все эти особенности в определенной степени влияют на процесс кристаллизации, распределение и формирование структуры зоны соединения.

Процесс кристаллизации протекает в две стадии: зарождение центров и рост кристаллов. При росте кристаллов могут образовываться единичные крупные кристаллы, которые растут перпендикулярно фронту кристаллизации (см. рис. 2). Характерной чертой дендритной кристаллизации является большая скорость продвижения дендритов в расплав. При этом важно отметить, что ось дендрита и его ветви растут в определенных кристаллографических направлениях в зависимости от типа кристаллизующейся фазы. Но, если создать в объеме стекла большое число

равномерно распределенных центров, возможно получение принципиально нового стеклокристаллического материала, отличающегося от стекла повышенными физико-химическими и механическими свойствами, т. е. теплопроводность такой зоны соединения будет низкая, а прочность гораздо выше. Созданию стеклокристаллической структуры будет способствовать развитие диффузионных процессов за счет как легирования матрицы, так и увеличения степени диспергирования оксидной пленки.

Создание мелкокристаллической структуры в зоне соединения, упрочненной дисперсными частицами металлов, — это задача, решение которой надо искать в технологии изготовления стеклокерамики. Еще в 1951 г. В. Вейл пришел к заключению, что такие металлы, как серебро, золото и медь, могут образовывать истинные растворы в расплаве стекла [14]. Проведенные исследования показали, что оксид меди в высокосвинцовых расплавах имеет особое значение — это эффективный катализатор структурных преобразований в стекле, который позволяет снизить структурные и температурные напряжения в зоне соединения в процессе диффузионной сварки СКМ (рис. 3).

Таким образом, формирование стеклокристаллической структуры в зоне соединения металлических пла-

стин обуславливается вероятностью процессов поверхностной (начинающейся с поверхности раздела) и объемной кристаллизации в стекле, которые связаны с диспергированием оксидной пленки металлической матрицы, диффузией металла матриц в оксидный расплав, присутствием в стекле исходного химического состава катализаторов кристаллизационных процессов.

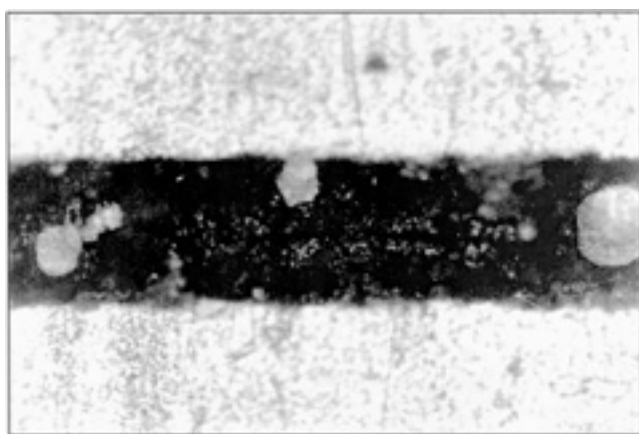
Свойства СКМ обусловлены химической реакцией на поверхности раздела и диффузией из матричного сплава, которые контролируются не только структурой, но и толщиной оксидной пленки. Проведенные исследования показали, что в процессе ДС СКМ слой кристаллической оксидной пленки достигает определенной толщины и, возможно, становится катализатором эпитаксиального роста новой фазы  $xPbO \cdot yAl_2O_3 \cdot zV_2O_5$  на алюминии и  $xPbO \cdot yCu_2O \cdot zV_2O_5$  на меди, которая предотвращает дальнейшее развитие химического взаимодействия и обеспечивает термодинамическую стабильность поверхности раздела в СКМ, т. е. играет роль запирающего слоя. Регулируя таким образом структуру поверхности раздела, добиваемся усиления связи за счет уменьшения градиента химического потенциала и снижения скорости диффузии алюминия (меди) и легирующих его элементов в реакционную зону.

Таким образом, связь металлической и стеклообразной составляющей СКМ обеспечивает одна из модификаций оксида металлической матрицы. Роль переходного и запирающего слоя играет формирующаяся новая фаза, которая является конечным продуктом поверхностной кристаллизации, предотвращает дальнейшее развитие химического взаимодействия и обеспечивает термодинамическую стабильность поверхности раздела в СКМ.

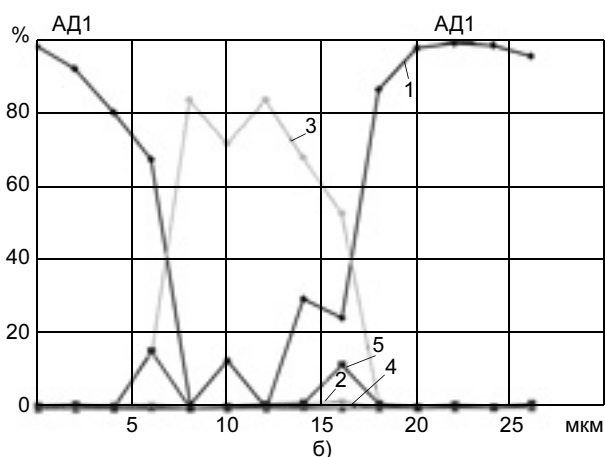
При изменении температуры и других параметров процесса ДС СКМ условия взаимодействия в контакте алюминий (медь) — стекло изменяются, что в свою очередь изменяет условия равновесия в зоне реакции. При этом переход атомной системы основной металл — оксидный расплав в равновесие в соответствии с новыми условиями осуществляется не мгновенно, а за некоторый конечный промежуток времени. Последний соответствует образованию кристаллической оксидной пленки толщиной 0,4—0,8 мкм, зависящей от матричного сплава.

Согласно современным представлениям, процесс образования прочной связи между расплавом стекла и металлом можно разделить на три стадии. На первой достигается физический контакт, т. е. сближение фаз до расстояний, необходимых для возникновения межатомного взаимодействия. Это сближение достигается в процессе смачивания: чем лучше смачивание, тем благоприятнее условия сближения. Процесс смачивания термодинамически выгоден, так как приводит к уменьшению энергии системы в связи с сокращением свободной поверхности. Кроме того, концентрация активированных атомов в матрице и стекле по мере приближения к температуре перехода стекла в капельно-жидкое состояние нарастает по экспоненциальному закону

$$N = N_0 e^{-\frac{Q}{kT}}$$



а)



б)

Рис. 3. Объемная кристаллизация стекла при ДС СКМ (образование дисперсий меди в стекле): а — микроструктура зоны соединения СКМ алюминий—стекло ( $\times 1000$ ); б — распределение элементов в зоне соединения СКМ алюминий—стекло (1—5 — см. рис. 2)

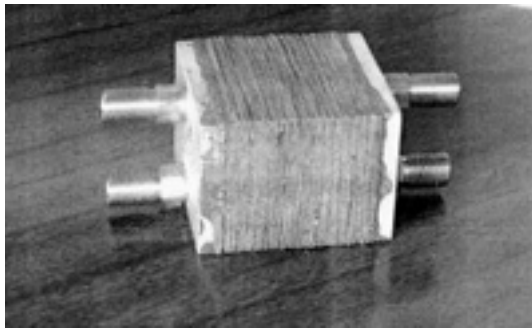


Рис. 4. Матричный теплообменник для криогенной системы на температурный уровень 100—120 К с холодопроизводительностью до 10 Вт

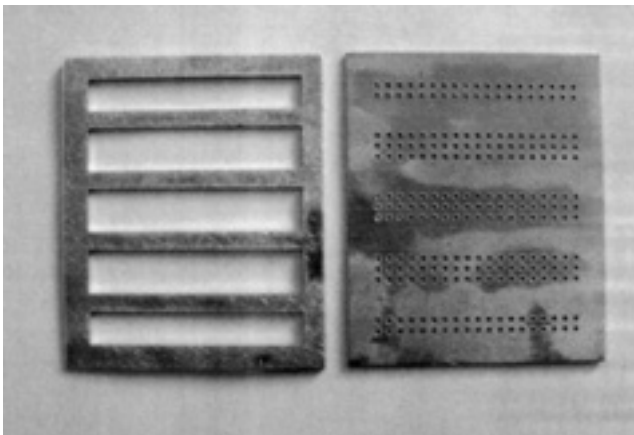


Рис. 5. Теплообменная пластина и дистанционная проставка матричного теплообменника (10 Вт)

где  $N$  — количество активированных атомов в единице объема;  $N_0$  — общее количество атомов в единице объема;  $Q$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Поэтому факторами, обеспечивающими физический контакт, являются внешние силы: температура, давление ДС СКМ и вязкость стекла.

Вторая стадия — химическое взаимодействие между фазами в объеме мономолекулярных слоев. Полнота развития химических связей в зоне контакта тем выше, чем ниже вязкость оксидного расплава.

Выделение продуктов реакции в виде кристаллических фаз, образование диффузионных зон происходит на третьей стадии. Здесь химическое взаимодействие развивается вглубь расплава, поэтому диффузия играет ведущую роль в процессе формирования СКМ. Смачивание, химическое взаимодействие, образование переходной зоны на границе фаз, кристаллизация оксидного расплава связаны с диффузией.

Диффузия как движение и перенос частиц в твердом и расплавленном состояниях представляет термически активируемый процесс, подчиняющийся общему уравнению Аррениуса. При образовании соединения СКМ происходят следующие процессы:

- диффузия в твердой фазе, предшествующая переходу стекла в капельно-жидкое состояние;

- диффузия с момента перехода стекла в капельно-жидкое состояние до образования равновесного состояния оксид металла — расплав стекла (поверхность раздела);
- диффузия с момента установления равновесного состояния на поверхности раздела;
- диффузия в твердой фазе, протекающая после кристаллизации оксидного расплава.

Диффузия в твердой фазе, предшествующая переходу стекла в капельно-жидкое состояние, протекает в стекловидных фазах на основе рыхлой, более открытой и крупнопористой структуры значительно легче, чем в кристаллических телах с плотной "упаковкой". В области трансформации стекла и выше нее диффузия еще более усиливается благодаря начинающейся подвижности стеклянного каркаса, и, наконец, в расплаве диффузия протекает намного быстрее, чем в твердом стекле, согласно формуле Стокса—Эйнштейна.

Реализация изложенных принципов [15] позволила создавать конструкции матричных теплообменных аппаратов, работоспособных в интервале давлений и температур: вакуум — 6 МПа; 150—573 К, с эффективностью до 94 %, масса которых в 2—3 раза ниже, чем существующих аналогов (рис. 4, 5).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппен А. А. Температурустойчивые неорганические покрытия. Л.: Химия, 1976. 95 с.
2. Батыгин В. Н., Метелкин И. И., Решетников А. М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. М.: Энергия, 1973. 409 с.
3. Безбородов В. Г. Адгезионное взаимодействие стекла с металлами при изготовлении вакуумноплотных спаев. Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1966. 43 с.
4. Керамика и ее спаи с металлом в технике / Под ред. В. А. Преснова и Н. А. Иофиса. М.: Атомиздат, 1969. 231 с.
5. Любимов М. Л. Спаи металла со стеклом. М.: Энергия, 1968. 280 с.
6. Маурах М. А., Митин Б. С. Жидкие тугоплавкие окислы. М.: Металлургия, 1979. 288 с.
7. Петцольд А., Пешманн Г. Эмаль и эмалирование. М.: Металлургия, 1990. 573 с.
8. Преснов В. А., Новодворский Ю. Б., Якубеня М. П. Основы техники и физики спая. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1961. 230 с.
9. Роус Б. Стекло в электронике. М.: Советское радио, 1969. 355 с.
10. Совместимость и адгезионное взаимодействие расплавов с металлами // Сб. тр. АН УССР ИПМ. Киев, 1978. 206 с.
11. Технология эмали и эмалирование металлов / Под ред. Варгина. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 315 с.
12. Чуларис А. А., Михайлова М. М. Механизм жидкофазного диспергирования при пайке // Современные проблемы сварочной науки и технологии. Пермь, 1995. С. 238—241.
13. Саркисов П. Д. Направленная кристаллизация стекла — основа получения многофункциональных стеклокристаллических материалов. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1997. 218 с.
14. Weyl W. // Journal of Physics Chemistry. 1955. Vol. 59. N 2. P. 147—151.
15. Принципы создания композиционных материалов для криогенных теплообменников / Ю. А. Барабанова, В. И. Могорычный, В. А. Полунин, С. В. Набатчиков // Композиционные материалы в промышленности: Ялта—Киев: УИЦ "Наука, техника, технология", 2006. С. 18—19.

УДК 621.791:669.28

**Ю. В. БУДКИН, канд. техн. наук, Е. Н. СИВОВ, д-р техн. наук,  
В. А. КАЗАКОВ, д-р техн. наук, А. Я. ПОДОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук  
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского**

## Комплекс технологических решений при сварке крупногабаритных конструкций из молибденовых сплавов

Для атомной энергетики, авиационной, ракетной и космической техники требуются конструкционные материалы повышенной жаропрочности и жаростойкости при длительных (до 1600 °С) и кратковременных (до 2200 °С) нагрузках. Этим условиям удовлетворяют тугоплавкие металлы и в первую очередь молибден в связи с его высокой температурой плавления (2620 °С), почти вдвое меньшей, чем вольфрама, плотностью ( $10,22 \text{ г/см}^3$ ), низким температурным коэффициентом линейного расширения ( $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ), большей, чем у других тугоплавких металлов, высокотемпературной прочностью, хорошей термостойкостью, высокими значениями электро- и теплопроводности.

Промышленность выпускает такие марки молибденовых сплавов, как М4ВП, ТСМ-3, ТСМ-4, ЦМ2А, ЦМ6, ЦМ10, ВМ-6, ТСМ-7С. Для крупногабаритных конструкций (длина швов 1500 мм и более) целесообразно использовать сплав с карбидным упрочнением ТСМ-7С, листовой прокат которого при толщине 1,5—1,8 мм имеет площадь  $1500 \times 600 \text{ мм}^2$ , что в 3—4 раза больше, чем у остальных сплавов. Этот сплав имеет также повышенную жаропрочность, так как интенсивный рост зерна у него наблюдается при температурах нагрева выше 1600 °С, обладает лучшей низкотемпературной пластичностью [1].

Изготовление различных конструкций из молибденовых сплавов сдерживается высокой хрупкостью их сварных соединений.

Получение качественных сварных конструкций возможно при комплексном подходе к проблеме повышения свариваемости молибденовых сплавов, которая зависит от композиции сплава, его структурного и текстурного состояния после термической обработки, морфологии избыточных фаз, термического цикла сварки, качества защиты в процессе сварки, термической обработки сварных соединений. Основными способами повышения пластичности сварных соединений являются:

- выбор оптимальных параметров процесса сварки;
- улучшение чистоты среды в процессе сварки;
- легирование металла шва ре-нием;
- термическая обработка сварных соединений;
- выбор правильного типа соединений;
- повышение прочностных характеристик соединения путем его пропайки.

Применение высококонцентрированного источника нагрева, высокого вакуума и тонкой (точной) регулировки процесса делают электронно-лучевой способ сварки наиболее

приемлемым для сварки крупногабаритных конструкций из молибдена.

Молибденовые сплавы чувствительны к термическим циклам сварки и прежде всего к скорости охлаждения, с которой связано выделение второй фазы. Поэтому необходим правильный выбор оптимальных параметров режима сварки, главным образом скорости сварки, от которой зависит ориентация кристаллов металла шва, форма границ зерен, уровень остаточных напряжений, что во многом определяется типом сплава [2]. Так, для низкоуглеродистого сплава ВМ-5 оптимальная скорость сварки, при которой достигается наилучшая пластичность сварных соединений, 0,016—0,022 м/с. В этом случае наблюдается наиболее благоприятная ориентация кристаллов и при изгибе работает преимущественно тело зерна, а не его граница. В то же время для высокоуглеродистых сплавов (ВМ-6, ТСМ-7С) определяющим является уровень остаточных напряжений, который ниже при малых скоростях сварки. Поэтому оптимальная скорость сварки для этих сплавов — 0,001—0,0022 м/с.

Однако сварка на малых скоростях увеличивает время нахождения металла в расплавленном состоянии. Поэтому возникают дополнительные требования к защите расплавленного металла от взаимодействия с остаточными газами вакуум-

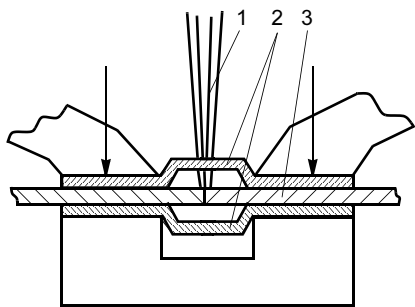


Рис. 1. Схема сварки с использованием геттерной защиты

ной камеры. С этой целью в процессе сварки применили геттерную защиту из титановой фольги<sup>1</sup>. При сварке электронный луч 1 (рис. 1), прорезая верхний геттер 2, расплавляет свариваемый металл 3, при этом за счет теплопроводности нагревается и нижний геттер. Все это приводит к интенсивному поглощению геттерами газов, как находящихся в зоне сварки, так и отсорбированных свариваемыми кромками. Все это обеспечивает повышение угла изгиба свариваемых соединений сплава ТСМ-7С при 18—20 °С в среднем от 30 до 45°.

Некоторое повышение пластичности металла шва наблюдается при легировании его рением [2]. Но легирование шва рением не устраняет хрупкости ЗТВ, увеличивает ее размеры из-за более высокой температуры плавления рения. Все это не позволяет повысить пластичность всего соединения.

При сварке сплавов молибдена (даже на небольших скоростях — менее 0,003 м/с) скорости охлаждения в области максимальных температур составляют сотни градусов в секунду. Поэтому металл шва и ЗТВ, особенно высокоуглеродистых сплавов, находится в закаленном состоянии. Повысить пластичность сварных соединений можно за счет кратковременной термической обработки после сварки в специальной печи, позволяющей производить нагрев и охлаждение с высокими скоростями<sup>2</sup>. Оптимальный режим: нагрев со скоростью 80—100 °С/с до температуры 2100 °С, выдержка в течение 60—90 с при

<sup>1</sup> А. с. 968938 (СССР).

<sup>2</sup> А. с. 1387491 (СССР).

этой температуре и охлаждение со скоростью 30—40 °С/с.

Термическая обработка на таких режимах позволяет фиксировать определенную степень распада второй фазы. В сварных швах, не прошедших термическую обработку (рис. 2, а), видны крупные выделения второй фазы как в теле зерна, так и по границам зерен. После термической обработки (рис. 2, б) выделения второй фазы значительно меньше, они более дисперсные, границы зерен тонкие, почти чистые. В теле зерна и по границам зерен происходит выпадение мелких карбидов сложной формы  $(Mo, Ta, Fe)_2C$  и полностью исчезает карбид  $Mo_2C$  (см. таблицу). Карбид  $(Mo, Ta, Fe)_2C$  более пластичный, чем  $Mo_2C$ , он не смачивает границы зерен, поэтому выпадает в глобулярной форме, что и приводит к повышению пластичности сварных соединений (рис. 3).

Результаты исследования показали, что для стыковых сварных соединений сплава ТСМ-7С применение оптимальных режимов сварки, локальной геттерной защиты в процессе сварки, специальной термической обработки сварных соединений хотя и обеспечивает повышение пластичности сварных соединений в 2—2,5 раза (см. рис. 3), но не устраняет разброса значений угла изгиба по длине шва, которые достигают иногда 100° [3]. Поэтому не рекомендуется использовать обычные стыковые соединения для изделий с большой протяженностью шва.

С целью повышения конструктивной прочности сварных швов следует ослабить действие остаточных сварочных напряжений, для чего необходимо усилить жесткость соединения. Это возможно путем примене-

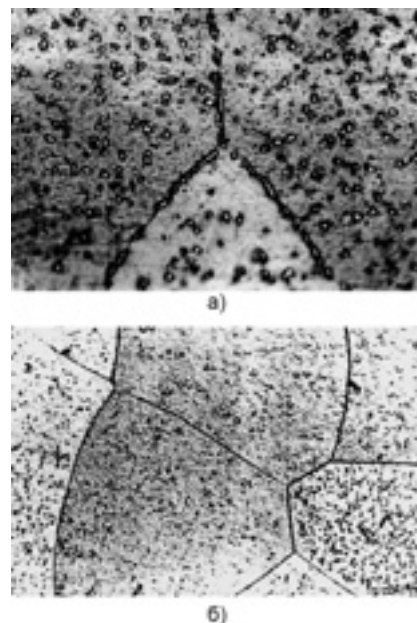


Рис. 2. Микроструктура металла шва сплава ТСМ-7С (×625)

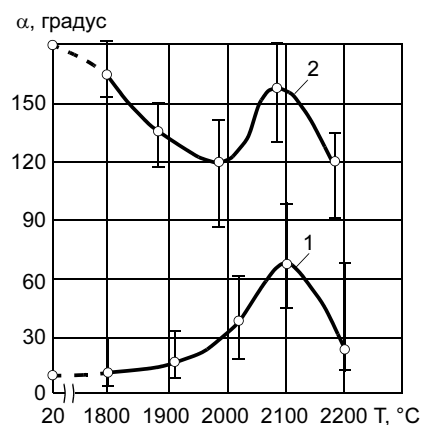


Рис. 3. Зависимость угла изгиба сварных соединений (1) и основного металла (2) при 20 °С от температуры нагрева

ния стыковых соединений с отбортовкой кромок. Все это позволило изготовить цельносварной муфель газостата, состоящий из обечайки

Сварное соединение	Содержание углерода, %	Основная избыточная фаза	Количество фазы, %
До термической обработки:			
основной металл	0,025	$(Mo, Ta, Fe)_2C$	0,250
ЗТВ	0,012	$(Mo, Ta, Fe)_2C$	0,120
сварной шов	0,008	$(Mo, Ta, Fe)_2C$	0,002
		$Mo_2C$	0,015
После термической обработки			
	0,008	$(Mo, Ta, Fe)_2C$	0,020

диаметром 450 мм, сваренной из четырех частей продольными швами (длиной 1500 мм) и днища. Однако во время транспортировки от случайного удара в одном из швов образовалась трещина с выходом на основной металл под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки, что свидетельствует о возможной хрупкости [1].

Для предупреждения этого необходимо выбирать величину отбортовки таким образом, чтобы при ее частичном оплавлении ЗТВ не выходила за пределы отбортовки, а оставшуюся нерасплавленную часть отбортовки пропаять медью, не взаимодействующей с молибденом и имеющей температуру плавления ниже температуры рекристаллизации сплава ТСМ-7С. В этом случае нагрузку воспринимает не хрупкая часть сварного шва и ЗТВ, а припой и нерекристаллизованный основной металл, обладающий высокой прочностью и пластичностью. Установлено, для толщины материала 1,5—2,0 мм величина отбортовки должна составлять 4—5 свариваемых толщин, раскрытие кромок отбортовки до  $7^\circ$  с целью их дегазации в процессе сварки. Указанный тип соединения допускает в процессе сборки зазоры и разновысотность кромок до 1,5—2,0 толщин. Установлено, что оптимальные условия для пайки достигаются при температуре 1300—1350 °С с выдержкой времени 10—30 с. Для обеспечения этих условий методом математического планирования эксперимента определены режимы электронно-лучевой пайки:  $U_n = 22$  кВ;  $I_n = 60 \div 64$  мА;  $v_n = 0,003$  м/с;  $d_n = 2,0$  мм.

Основное назначение пропайки сварных швов — блокировка зоны металла шва и рекристаллизованной ЗТВ от разрушения сварных соединений при температурах, выше порога хрупкого перехода, и в начальной стадии первого цикла нагрева муфеля. При нагреве выше температуры хрупкого перехода, когда сварная конструкция становится пластичной,

роль паяного шва как упрочнителя отпадает. На этой стадии нагрева главное требование к комбинированному соединению — это отсутствие взаимодействия между припоем (медью) и основным металлом (молибденом). После отжига в специальном контейнере сварнопаяных образцов в течение 20 ч при температуре 1700 °С микроспектральный и оже-спектральный анализы показали отсутствие диффузии как меди в молибден, так и примесей внедрения из молибдена в медь. Отсутствие взаимодействия меди и молибдена в условиях сваркопайки молибдена со сталью установлена также в работе [4].

Определение максимальной рабочей температуры сварнопаяных соединений, до которой нагрузка, прикладываемая к соединению, воспринимается медным припоем, показала, что до температуры 500 °С разрушение происходит по молибдену, а при более высоких — по месту спая. Следовательно, пропайка сварных соединений молибдена медью сохраняет прочность конструкции до температур, значительно превышающих температуру хрупкого перехода молибденовых сплавов.

Испытания на циклическую долговечность (малоцикловую усталость) при диапазоне изменения усилий 0,1—7,0 кН и изменения частоты нагружений 500—300 мин<sup>-1</sup> показали, что разрушение соединений без пропайки происходило при первом цикле нагружения. Циклическая долговечность образцов, пропаянных медью, испытанных при усилиях 0,8—3,2 кН, составила 234 000 циклов, что свидетельствует о возможности работы конструкции при вибрационных нагрузках.

Коррозионные испытания показали, что пайка сварных швов молибдена медью не только не ухудшает, но даже защищает шов от воздействия коррозионной среды как в обычной, так и морской атмосфере, что

важно с точки зрения хранения и транспортировки конструкции.

## ВЫВОДЫ

1. Применение сварных соединений из молибденовых сплавов затруднено из-за их большой склонности к хладноломкости. Основными методами повышения пластичности сварных соединений являются: выбор оптимальных режимов сварки, применение геттерной защиты, легирование металла шва рением, скоростная термическая обработка сварных соединений. Однако большой разброс данных по пластичности (углу изгиба) сварных соединений не решает проблемы сварки крупногабаритных конструкций из молибдена.

2. Для получения надежных сварных соединений молибдена с длиной швов 1500 мм и более необходимо применять способ сварки встык с отбортовкой кромок и последующей пропайки сварного соединения медью. Пропайка медью нерасплавленной части отбортовки позволяет разгрузить сварной шов и зону термического влияния от воздействия внешних нагрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структура, текстура и механические свойства молибдена / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Р. К. Иващенко и др. Киев: Наукова думка, 1983. 232 с.
2. Дьяченко В. В., Морозов Б. П. Сварка тугоплавких металлов. М.: Машиностроение, 1980. 44 с.
3. Влияние термообработки на повышение пластичности сварных соединений сплава молибдена с карбидным упрочнением / Е. Н. Сивов, Н. Т. Крутоголов, С. О. Савченко, Ю. В. Будкин // Сварочное производство. 1989. № 4.
4. Будкин Ю. В., Сивов Е. Н., Руденский Е. В. Влияние барьерного слоя из ниобия и меди на физико-химические процессы взаимодействия твердого молибдена и жидкой стали // Сварочное производство. 1996. № 9.

**Г. А. МЕНЬШИКОВ**, д-р техн. наук, **А. Н. ВЛАСЕНКО**, аспирант,  
**В. А. НЕВРОВСКИЙ**, д-р физ.-мат. наук  
 ("МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского),  
**В. А. ВАСИН**, д-р техн. наук  
 (ЗАО "Московское представительство научного центра  
 порошкового материаловедения")

## Повышение работоспособности электродов при точечной контактной сварке сталей

Оцинкованные углеродистые стали, а также стали с другими защитными покрытиями широко применяют не только при выпуске товаров народного потребления, но и в изделиях ответственного назначения. Поэтому проблема работоспособности электрода при точечной контактной сварке (ТКС) оцинкованных сталей является актуальной, особенно в условиях серийного производства [1—3].

В процессе работы электроды испытывают высокую токовую нагрузку, высокие градиенты температур, циклические градиенты напряжений и упругопластические деформации сжатия, сдвига, изгиба; на рабочей поверхности действуют значительные силы трения качения и скольжения.

Обычно работоспособность электродов и производительность ТКС конструкционных металлов и сплавов оценивают по их стойкости на износ и массоперенос [3]. Однако при сварке сталей с защитными покрытиями проявляются дополнительные факторы — проникновение активных легкоплавких элементов покрытия на значительную глубину, способствующих деградации материала рабочей части электрода и схватыванию "прилипанию" электродов к деталям. Таким образом, следует выделить три вида износа электродов:

— деформация рабочей поверхности электродов, увеличение площади контакта электрод—деталь;

— массоперенос в контакте электрод—деталь, загрязнение рабочей поверхности элементами и продуктами взаимодействия металлов и окружающей среды. Эрозия поверхностей контактирующих сплавов и вы-

рывы частиц металлов после "прилипания" электродов;

— деградация материала рабочей части электрода, т. е. появление коррозионных разрушений под напряжением с образованием несплошностей, заполненных продуктами массопереноса, и изменение химического состава и свойств рабочей части электродов.

Влияние первого фактора сказывается на качестве сварки посредством снижения плотности тока и размеров ядра, вплоть до появления непроваров (полное или частичное отсутствие литого ядра точки).

Загрязнение рабочей части электродов носит, как правило, циклический характер. Через определенные интервалы происходит самоочистка рабочей поверхности от продуктов массопереноса. Однако в ряде случаев влияние второго фактора может существенно уменьшить тепло- и электропроводность в зоне контакта электродов и быть причиной появления сильных выплесков металла.

Третий фактор обычно связывают с массопереносом, однако сварка сталей с защитными покрытиями на основе легкоплавких металлов приводит к самостоятельному виду износа, способствуя деградации материала рабочей части электрода — активному разрушению.

Для повышения стойкости сварочных электродов следует применять средства, блокирующие влияние трех факторов. Для повышения износостойкости использовали электродные материалы с повышенной жаропрочностью и электропроводностью, например, дисперсно-упрочненный композиционный материал

(ДУКМ) на основе порошковой меди М143 (фирмы ЗАО НПП "Кермет").

По второму направлению, в части снижения массопереноса важную роль играет высокая электропроводность при удовлетворительной твердости при повышенных температурах, такими свойствами обладает медный сплав БрЦЦр 1-0,15 следующего состава: Cu — основа, 1,2 % Zn, 0,35 % Cr, 0,12 % Zr. Причем наличие цинка в составе сплава снижает активность цинкового покрытия на процесс массопереноса.

По третьему направлению было решено использовать на рабочей поверхности электродов износостойкое, но достаточно упругое при повышенных температурах электропроводное барьерное покрытие. Наш выбор по ряду причин остановился на карбидохромовых покрытиях. Этому решению способствовало то, что такие покрытия уже давно наносятся на различные конструкционные материалы, например, чугуны, алюминиевые сплавы и стали для защиты изделий от износа в парах трения и воздействия агрессивных сред. Известно, что такие покрытия эффективно уменьшают адгезию материалов даже при повышенных температурах. Например, к покрытым этим материалом чугунным матрицам не прилипает горячая резина при формовании из нее изделий. Продукты радиационного разложения органических теплоносителей не оседают на стенках каналов охлаждения твэлов атомных электростанций, если стенки покрыты пиролитическим карбидохромовым покрытием. Несмотря на то, что технология создания таких покрытий в настоящее время хорошо отработана, на материалы, обычно при-



меняемые для электродов контактной сварки, они не наносились. Поэтому представляло интерес получить на электродах для контактной сварки пиролитическое карбидохромовое покрытие и установить, как это скажется на стабильности процесса контактной сварки [4, 5].

В основу данной технологии положено нанесение пиролитическим методом карбидохромовых покрытий на медные сплавы. Сущность процесса состоит в реакции термического разложения металлоорганических соединений (МОС) хрома. Для этого используется жидкость "Бархос" (ТУ 6-01-1149—78), представляющая смесь бис-алкил-бензольных соединений хрома с примесями бензола, этилбензола и высококипящих ароматических соединений. Жидкость "Бархос" нагревают до парообразного состояния и доставляют к поверхности покрываемого изделия, нагретой до температуры разложения пара "Бархос". Покрытие образуется в результате молекулярного распада бис-этилбензолхрома (основная составляющая "Бархоса") на металл и ароматические углеводороды. Образующиеся при этом газообразные органические продукты распада удаляются из реакционной камеры [5].

Процесс нанесения покрытия осуществляли на специальной установке [5].

Установка обеспечивает:

- поддержание оптимальных технологических параметров в зоне осаждения на протяжении всего процесса (температура испарения МОС 220—230 °С; температура нагрева поверхности детали 400—550 °С; отклонение  $\pm 10$  °С; давление в камере осаждения 4—10 Па; скорость подачи МОС в испаритель 10—100 мл/ч);
- возможность улавливания и сбора продуктов распада МОС;
- высокую степень автоматизации с возможностью задания параметров технологического процесса, микропроцессорного управления механизмами, обеспечивающими поддержание заданных параметров технологического процесса, и регистрации температурных данных, скорости подачи МОС, давления в камере осаждения.

Стойкость электродов с карбидохромовым покрытием изучали на образцах, представляющих пласти-

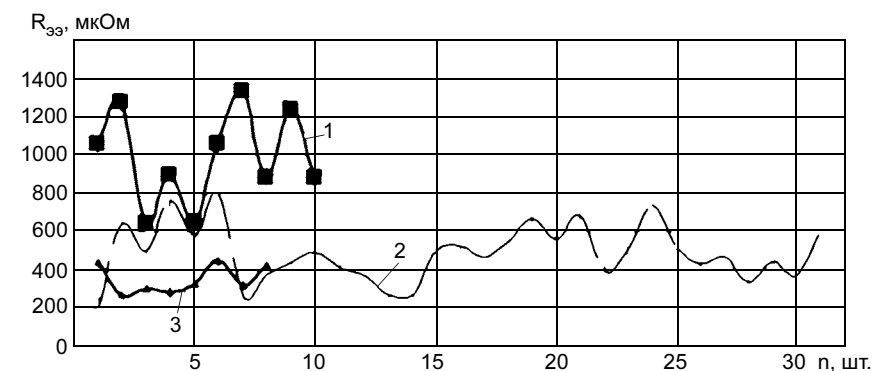


Рис. 1. Зависимость электросопротивления участка электрод—электрод от количества сваренных точек электродом с покрытием при усилии сжатия электродов 180 (1), 250 (2) и 500 (3) даН

ны оцинкованной стали ГЦ01ЮТ (0,7 + 0,7 мм) по ТУ 14-106-438—2002 и стали 08кп (0,8 + 0,8 мм) ОАО НЛМК [1, 8].

Стойкость электродов при сварке стали ГЦ01ЮТ оценивали минимальным числом качественно выполненных сварных точек. Для этого определяли количество точек, которое можно сварить до тех пор, пока диаметр ядра не станет меньше минимально допустимого по ГОСТ 15878—79, без регулирования параметров режима сварки с учетом износа электродов.

Стойкость электродов при сварке стали 08кп оценивали количеством точек, сваренных до увеличения диаметра исходной рабочей поверхности электрода на 20 %.

Сварку выполняли на машине переменного тока МТ-4019. Сбор и анализ параметров сварки (тока и напряжения) осуществляли посредством регистратора сварочных процессов РКД-0401 (производитель ЗАО "Электрик-МИКС"), который представляет IBM-совместимый компьютер, укомплектованный дополнительными платами и измерительными датчиками, и является специализированной системой сбора и обработки данных. Для сварки стали ГЦ01ЮТ использовали электрод БрЦЦр1-0,15, а для сварки стали 08кп — электроды с плоской рабочей поверхностью дисперсно-упрочненного композиционного материала (ДУКМ) на основе порошковой меди М143 (фирмы ЗАО НПП "Кермет").

При сварке стали 01ЮТ в начале эксперимента были поставлены 34 пробные точки с целью выхода на

стабильный режим. Всего в ходе эксперимента были сварены более 300 точек.

Ориентировочный режим сварки стали 01ЮТ электродом с хромовым покрытием на машине МТ-4019:  $I_{св} = 20 \div 23$  кА;  $F_{св} = 240 \div 260$  даН;  $t_{св} = 0,06 \div 0,10$  с;  $d_3 = 20$  мм;  $R_{сф} = 100$  мм.

Выбор радиуса сферы рабочей части электрода с завышенным значением  $R_{сф} = 100$  мм вместо 50 мм, рекомендуемого ГОСТ 14111—90 и результатами работы [1], обусловлен необходимостью снизить влияние эффектов ползучести рабочей части в процессе испытаний и увеличения переходного электросопротивления в контактах электрод—деталь на искусственном покрытии.

Обработку результатов осуществляли с помощью программы Win-Visual, входящей в состав регистратора РКД-0401.

Сопротивление (холодного контакта) измеряли микроомметром ММР-610.

При изменении усилия сжатия наиболее стабильные данные получены при усилии сжатия 500 даН (рис. 1). Наибольший разброс  $R_{зз}$  отмечался при усилии сжатия меньше 250 даН. Например, при  $F_{св} = 250$  даН на начальном этапе (первых десяти точках) отмечался большой разброс  $R_{зз}$ , а затем значение сопротивления стабилизировалось.

Для сравнения с электродом с карбидохромовым покрытием был выбран электрод без покрытия. Процесс сварки был нестабильным и характеризовался большим числом вы-

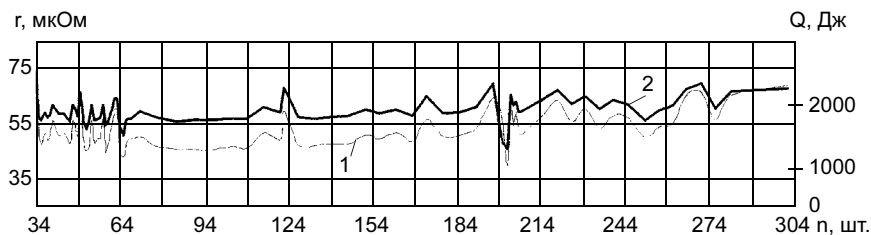


Рис. 2. Зависимость электросопротивления  $r$  (1) и энергии  $Q$  (2) на участке электрод—электрод от количества сваренных точек (сталь 01ЮТ, электрод БрЦЦр1-0,15 с карбидохромовым покрытием)

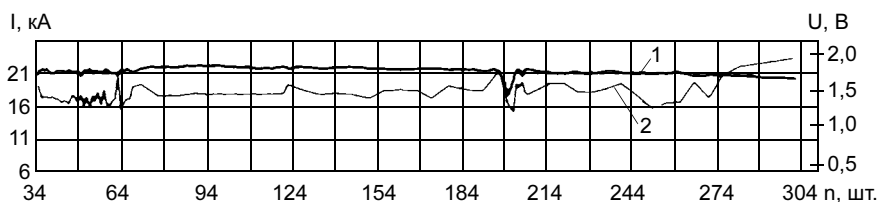


Рис. 3. Зависимость сварочного тока (1) и падения напряжения (2) на участке электрод—электрод от количества сваренных точек (сталь 01ЮТ, электрод БрЦЦр1-0,15 с карбидохромовым покрытием)

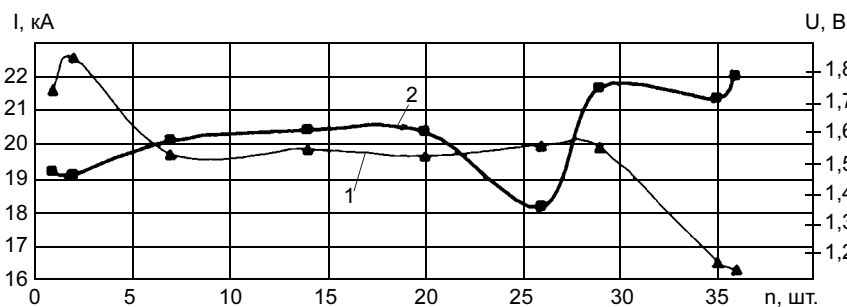


Рис. 4. Зависимость сварочного тока (1) и падения напряжения (2) на участке электрод—электрод от количества сваренных точек (сталь 01ЮТ, электрод БрЦЦр1-0,15 без покрытия)

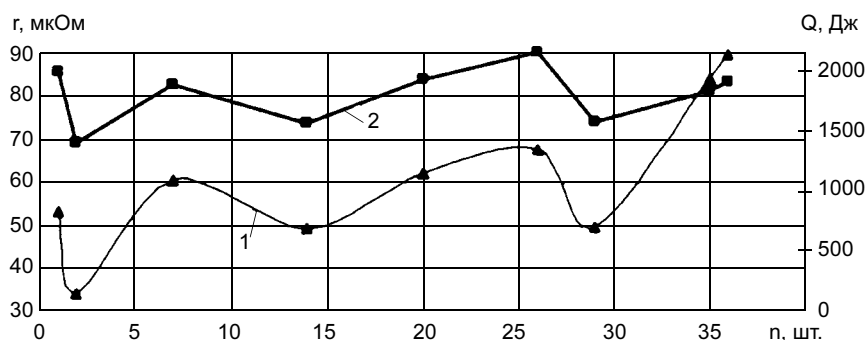


Рис. 5. Зависимость электросопротивления (1) и энергии (2) на участке электрод—электрод от количества сваренных точек (сталь 01ЮТ, электрод БрЦЦр1-0,15 без покрытия)

плесков и непроваров. После 30 точек наблюдали интенсивное прилипание электрода к металлу.

На рис. 2—5 по мере увеличения числа точек за счет массопереноса наблюдается разброс энергии, напряжения на участке электрод—электрод и сварочного тока.

Анализ элементного состава поверхности электродов после сварки проводили методом электронной Оже-спектроскопии (ЭОС) на Оже-спектрометре PHI-660 (фирмы Perkin Elmer). Прибор позволяет проводить микроанализ элементного состава участков поверхности образцов и по-

лучать изображения анализируемых поверхностей во вторичных электронах. Для очистки поверхности от адсорбированных из атмосферы углеводородов и паров воды применяли травление поверхности ионами аргона.

На рис. 6 видно, что в результате многократных (более 300 раз) импульсов сварочного тока поверхность электрода сильно эродировала. Съемка этой поверхности в лучах Оже-электронов ряда элементов показала, что на ней лежит почти сплошной слой цинка, очевидно, перенесенного со свариваемых образцов. Интересно, что регистрируется также россыпь мелких (порядка нескольких микрон в поперечнике) включений, содержащих алюминий и кислород, причем соотношение интенсивностей сигналов этих элементов указывает на то, что это включения оксида алюминия. Они вышли из материала электродов. Кроме того, на этом участке рабочей поверхности наблюдались остатки хрома и углерода, который входил в карбид хрома в исходном покрытии. Сигнал железа на эродированной поверхности электрода не регистрировался [6].

В ходе испытаний на пластинах из стали 08кп с сочетанием толщин (1 + 1) мм было поставлено более 10 000 точек. Примерно через каждые 100 точек осуществляли замер диаметра точки разрывом образцов методом клина для последующей корректировки режима сварки. Ориентировочный режим сварки стали 08кп электродом с хромовым покрытием на машине МТ-4019:  $I_{св} = 12 \div 15$  кА;  $F_{св} = 240 \div 260$  даН;  $t_{св} = 0,08 \div 0,10$  с;  $d_3 = 6,3$  мм.

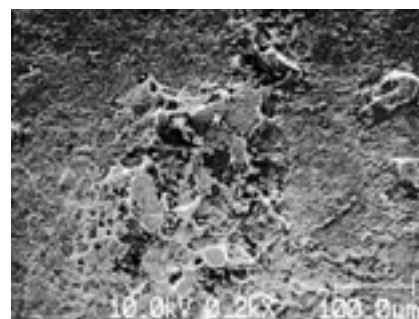


Рис. 6. Фрактограмма рабочей поверхности электрода с карбидохромовым покрытием после длительных испытаний при сварке низкоуглеродистой стали

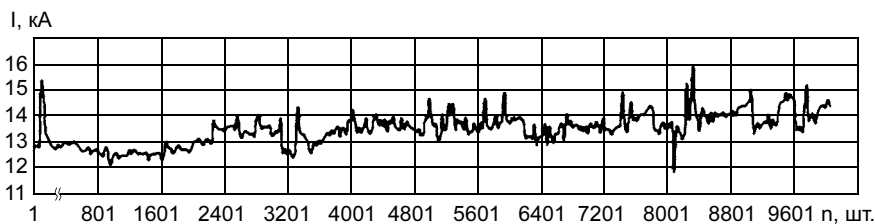


Рис. 7. Изменение сварочного тока в процессе сварки большого числа точек (сварка стали 08кп электродом ДУКМ М-143)

На рис. 7 видно, что по мере износа электрода ток возрастает от 12,6 до 14,7 кА.

## ВЫВОДЫ

1. Для получения стабильных высококачественных соединений оцинкованных сталей 01ЮТ, 08кп и сталей без покрытий рекомендуется применять электроды с карбидохромовым покрытием, полученным пиролитическим методом.

2. Установлены оптимальные режимы точечной сварки для оцинкованных сталей 01ЮТ, 08кп и сталей без защитных покрытий при примене-

нии электродов с карбидохромовым покрытием.

3. Показано, что электроды с карбидохромовым покрытием на рабочей поверхности обладают повышенной стойкостью против износа и маспереноса, причем процесс сварки (на выборке более 10 000 точек) характеризуется повышенной устойчивостью к непроварам и выплескам при обеспечении требуемого качества соединения по сравнению со штатной технологией сварки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие металлических материалов для легкового автомобилестроения в

период 2000—2005 гг. / Под ред. В. В. Каданникова, А. К. Тихонова. Тольятти: ОАО "АвтоВАЗ", 2002. 50 с.

2. Скороходов В. Н., Чернов П. П., Ларин Ю. И. Освоение производства новых оцинкованных особомалоуглеродистых высокопластичных сталей для автомобильной промышленности // *Сталь*. 2001. № 12. С. 52—55.

3. Вакутов А. В. Исследование процесса и разработка технологии точечной контактной сварки оцинкованной стали: Дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 1996. 138 с.

4. Васин В. А., Невровский В. А., Сомов О. В. Особенности нанесения пиролитических карбидохромовых покрытий на некоторые материалы // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. М.: "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2007.

5. Анциферов В. Н., Сомов О. В., Васин В. А. Усовершенствованная установка для нанесения пиролитических карбидохромовых покрытий (ПКХП) // Проблемы современных материалов и технологий. Пермь, 2005. Вып. 11. С. 256—264.

6. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для вузов / Под общ. ред. Б. Д. Орлова. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

УДК 621.791.76

Ю. Ф. КОЛУПАЕВ, канд. техн. наук  
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

## Новые материалы и технологии в производстве ювелирных изделий

Известно, что при проектировании технологии производства сварных и паяных конструкций выбор материала изделия и метода получения соединений во многом предопределяет возможность обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик изделий, а также технологические и экономические показатели производства [1]. Весьма наглядно указанная связь проявляется и в такой специфической области применения технологий получения неразъемных соединений, как изготовление ювелирных изделий (личных украшений, предметов интерьера и др.).

Ручное изготовление ювелирных изделий относится к числу наиболее консервативных во многих отношениях технологических процессов. До на-

стоящего времени, кроме драгоценных металлов, традиционными материалами для их изготовления служат мельхиор МН19 и нейзильбер МНЦ15-20, а основным методом сборки и монтажа элементов изделий — высокотемпературная пайка припоями на основе серебра. Это объясняется не только высокими потребительскими свойствами применяемых сплавов, но и благоприятным сочетанием их прочностных и пластических характеристик, обеспечивающим достаточную полноту реализации замысла мастера при художественном оформлении изделия [2].

Традиционная технология наряду с известными достоинствами имеет ряд существенных недостатков. К их числу в первую очередь следует отне-

сти необходимость нагрева изделия до высокой температуры (порядка 700 °С и выше). В связи с этим при изготовлении украшений с термочувствительными декоративными элементами (вставками) из неметаллических материалов (камней, эмалей, стекла) операции, связанные с их закреплением, выполняются на финишных этапах процесса изготовления изделия (после сборки, пайки и отделки). Кроме того, применение при пайке вспомогательных материалов (кислот, флюсов) обуславливает усложнение технологического процесса за счет введения дополнительных операций (отмывки, чернения, отбеливания). Наконец, у некоторых потребителей возможно появление аллергических реакций на медь, содержащуюся в используемых сплавах.

Ювелирные изделия как объект производства по сравнению с конструкциями другого назначения обладают рядом отличительных особенностей, основными из которых являются следующие:

— относительно невысокий уровень требований к прочности соединений;

— высокие требования к потребительским свойствам (полное отсутствие рисок, царапин, забоин, наплывов,

отпечатков инструмента и других дефектов);

— существенная зависимость художественного уровня изделий от свойств применяемых материалов и используемой технологии их соединения.

За последние годы широкое распространение получило изготовление ювелирных изделий из хромоникелевых сплавов (нихром Х20Н80, ферронихром Х15Н60 и др.). Представляет интерес сравнение свойств этих сплавов со свойствами традиционных материалов (ГОСТ 5187—72, 12766—67) (табл. 1).


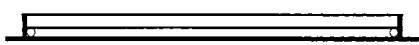

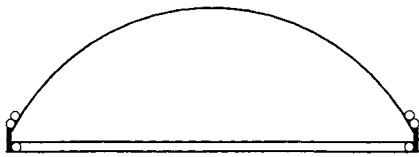


Анализ приведенных данных показывает, что прочностные и пластические характеристики сплавов Х20Н80 и Х15Н60 находятся примерно на том же уровне, что и у сплавов МН19 и МНЦ15-20. Это означает, что при использовании хромоникелевых сплавов возможности мастера при изготовлении разнообразных декоративных элементов сохраняются полностью. С другой стороны, высокое электросопротивление нихрома и ферронихрома позволяет использовать в качестве основного метода монтажа изделий контактную точечную сварку. Локальность и кратковременность нагрева при контактной сварке позволяют практически полностью исключить вероятность повреждения даже наименее термостойких вставок (янтарь, эмаль), что в свою очередь открывает возможности монтажа любых декоративных элементов и даже оправы непосредственно на вставках. Последнее обстоятельство имеет особое значение, так как во многих случаях вставка играет роль художественного центра, декоративные достоинства и особенности которого определяют образ изделия в целом. Кроме того, весьма высокими являются и потребительские свойства хромоникелевых сплавов (после полировки цвет металла близок к цвету серебра или нейзильбера, изделия длительное время не окисляются и не тускнеют, не вызывают аллергических реакций) [3].

Технология монтажа ювелирных изделий с использованием контактной точечной сварки реализуется, как правило, с помощью конденсаторных установок настольного типа, обеспечивающих возможность работы в до-

Таблица 1

Свойство	Сплав			
	МН19	МНЦ15-20	Х20Н80	Х15Н60
Температура плавления, °С	1190	1080	1400	1390
Плотность, г/см <sup>3</sup>	8,9	8,7	8,4	8,2
Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	—	398	440	460
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	38,5	25,12	14,2	14,18
Удельное электросопротивление, мкОм·м	0,287	0,26	1,03—1,15	1,1
Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	290—390	340—440	392—400	640
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	—	130—260	150—200	264
Относительное удлинение $\delta_5$ , %	25—35	35—45	40—50	28—32
Относительное сужение $\psi$ , %	—	—	75	70
Твердость НВ, МПа	690	690—1570	1400—1500	1400—1500

Таблица 2

Операция	Эскиз	Инструмент
Приварка основания оправы к подложке		Рабочий столик, карандаш
Приварка опорного кольца		Пинцет
Приварка крепежного кольца		Рабочий столик, карандаш
Приварка декоративного кольца		То же
Приварка крепежных элементов		Пинцет
Изготовление и монтаж декоративных элементов		Пинцет
Отделочные операции		



а)



б)

**Изделия из нихрома:** а — шкатулка (вставки — пейзажный агат); б — кольцо (вставка — сердолик)

машних условиях или условиях малого предприятия. Состав типовой установки и ее основные технические характеристики приведены в работе [3].

Как уже отмечалось, при использовании рассматриваемой технологии ключевой и, чаще всего, начальной операцией является закрепление вставок. Вставки из полудрагоценных и поделочных камней гранятся, как правило, в форме простого кабошона. При такой форме огранки наиболее рациональным способом закрепления вставок является изго-

товление составной ободковой оправы (каста), формируемой из нескольких проволочных или ленточных ободков (колец), повторяющих форму вставки в плане (табл. 2). Для непрозрачных вставок из хрупких материалов рекомендуется закрепление в глухом (закрытом) касте.

Разница между этими вариантами закрепления заключается в том, что в первом случае подложка, используемая при формировании каста, после приварки опорного и крепежного колец удаляется, а во втором —

служит дном каста, удерживающим вставку. Последующие операции сводятся к изготовлению металлической части изделия, монтажу декоративных и крепежных элементов, а также финишной отделке изделия.

Конкретные значения параметров режима сварки на отдельных операциях определяются перечисленными выше особенностями изделий, толщиной (диаметром) соединяемых элементов и возможностями применяемого оборудования. Имеющийся опыт реализации рассмотренной технологии свидетельствует, что она обеспечивает высокий художественный уровень и потребительские свойства ювелирных изделий из нихрома на рынке относительно недорогих украшений и предметов интерьера (см. рисунок).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов В. С.* Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки. М.: Высшая школа. Изд. центр "Академия", 2000. 319 с.
2. *Новиков В. П., Павлов В. С.* Ручное изготовление ювелирных украшений. Л.: Политехника, 1991. 208 с.
3. *Колупаев Ю. Ф., Привезенцев В. И.* Особенности конденсаторной сварки нихрома при изготовлении ювелирных изделий // Сварочное производство. 2003. № 11. С. 41—43.

УДК 621.701.07

**А. И. ПАШКОВ, аспирант, С. П. ГЕРАСИМОВ, канд. техн. наук,  
И. Н. ПАШКОВ, д-р техн. наук**  
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

## Особенности пайки порошковым припоем системы медь—марганец—никель

Для создания неразъемного паяного соединения необходимо правильно выбрать технологию пайки: метод нагрева, состав припоя, его форму, применяемый флюс. Правильно подобранная технология может решить множество проблем в использовании паяного изделия — увеличить срок службы, снизить себестоимость, увеличить производительность и т. д.

В данной работе рассмотрены особенности пайки различных изделий порошковым припоем системы медь—марганец—никель.

В таблице приведены припои системы медь—марганец—никель, используемые в качестве припоев [1]. Дан-

ные припои применяют для пайки высоконагруженного инструмента, жаропрочных сталей, в авиационной промышленности для пайки турбинных лопаток и элементов двигателей, горнодобывающей промышленности, криогенной техники. Припои данной системы обладают высокой прочностью, жаропрочностью соединений до температуры 600 °С, сохраняют высокие механические свойства при низких температурах.

Как видно из таблицы, припои находятся в области с содержанием марганца до 30 % (рис. 1). Диаграмма системы медь—марганец—никель отличается отсутствием эвтектики.

Припой	Содержание элементов, %			Температура, °С	
	Mn	Ni	Другие	Начала плавления	Полного расплавления
ВПр 2	22—26	5—6	Fe, Li	960	980
ВПр 4	27—30	28—30	Co, Si, Fe, Li, B, K, Na, P	940	980
ПМ17	15—17	12—14	Si, Fe, B	870	940
МНМц 9-23,5	23,5	9	—	920	955
П65	27—28	4,5—5,0	Cr, Li, Zn, ≤0,02 C	870	910

Примечание. Остальное — Cu.

В данной системе существует большая область сплавов, состоящих из твердых растворов и имеющих малые интервалы плавления. Сплавы, попадающие в область с фазами  $\alpha + \theta'$ , являются дисперсионно-твердеющими [2].

С точки зрения пайки это "идеальные" припои, не имеющие в своей структуре хрупких эвтектических или интерметаллидных составляющих. Наличие упорядоченных фаз в системе медь—марганец и марганец—никель только способствует увеличению прочностных характеристик сплава. Температуры плавления сплавов (900—1100 °С) также идеально подходят для совмещения термической обработки с пайкой в процессе производства инструмента. Кроме того, возможные образования растворов никеля и марганца с железом на границе раздела фаз не может заметно ухудшить характеристики паяного соединения.

Но наряду с положительными свойствами данные сплавы имеют ряд недостатков. Первый и основной — это склонность марганца к окислению и выгоранию, газонасыщение расплава в процессе его приготовления. Поэтому для получения точного состава плавку таких сплавов проводят в атмосфере аргона, вакуумная плавка непригодна ввиду высокого давления паров марганца и сложности сохранения заданного состава. Второй недостаток — это трудность обработки материала давлением. Сплавы имеют высокие коэффициент упругости и сопротивление деформации, поэтому получить из них прокат для изготовления, например, закладных элементов возможно только с помощью горячей прокатки с многочисленными переделами. Для вырубки закладных элемен-

тов из прокатанной ленты также необходим инструмент с высокой стойкостью.

При вырубке закладных элементов большая часть (20—40 %) припоя уходит в отходы, трудно перерабатываемые в исходный сплав. При мелкосерийном производстве паяных соединений, когда не требуется большое количество припоя, это особенно актуально, так как в результате высокой трудоемкости изготовления припоя его стоимость становится высокой.

В данной работе изготовление сплавов производили методом порошковой металлургии. С целью достижения возможности изготовления различных закладных элементов из порошка припоя, таких как кольца, таблетки, выбран метод механического легирования.

Данным методом можно изготовить любое количество сплава, что подходит для мелкосерийного и серийного производства. Он характеризуется простотой изготовления любых по форме и размерам закладных элементов без каких-либо потерь на отходы, путем прессования порошка, доступностью порошковых компонентов для системы медь—марганец—никель.

По некоторым литературным данным, имеется положительный опыт использования таких порошков припоя. Основная проблема заключается в повышенном содержании кислорода в порошке и загрязнении сплава материалом размольных тел, что может влиять на формирование паяных швов.

В данной работе определены условия достижения качественной пайки с использованием механически легированных порошков припоя на основе системы медь—марганец—никель. Для этого исследовали процесс получения припоя в вибрационной мельнице с помощью механического легирования, его влияние на свойства порошкового припоя, а также процесс формирования паяного соединения в случае применения различных видов пайки (индукционной в атмосфере воздуха и вакуумной).

### Методика проведения экспериментов

В качестве припоя использовали сплав МНМц 9-23,5. Выбор данного сплава основан на более ранних исследованиях [3], минимальном количестве компонентов, а именно меди, марганца и никеля, возможности проведения вакуумной пайки, так как при содержании в сплавах системы медь—марганец—никель до 30 % марганца его испарение не столь значительное, не содержит других элементов, имеющих высокие парциальные давления, как, например, припой ВПр 4.

У сталей типа 35ХГСА температура закалки около 860—880 °С. Этот припой идеально подходит для совме-

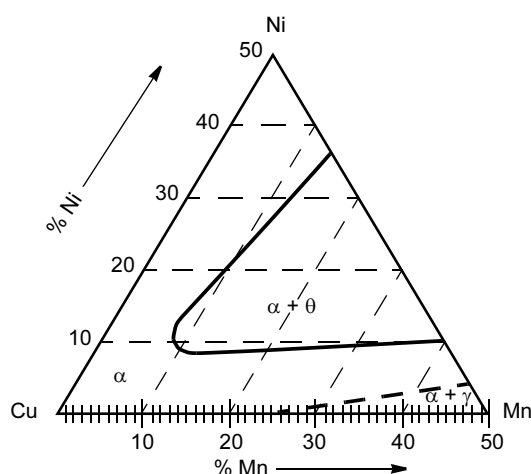


Рис. 1. Изотермическое сечение диаграммы состояния системы медь—марганец—никель при 450 °С [2]

щения термической обработки с пайкой, так как имеет более высокую температуру плавления.

Механическое легирование порошков проводили в торовой вибромельнице в аргоне из чистых компонентов: порошка меди, никеля и марганца. Размер частиц порошка меди и никеля 30—50 мкм, марганца — 160—1000 мкм, при этом марганец продолжал измельчаться в процессе механического легирования.

Время обработки материала в мельнице изменяли от 0,5 до 4 ч. Увеличение времени обработки приводит к снижению производительности процесса и загрязнению порошка припоя материалом шаров. Основные свойства порошкового припоя приобретаются к трем часам обработки. Поэтому для исследования процесса пайки выбран режим обработки в мельнице — смешивания частиц с измельчением 1,5 ч. В этом случае материал представляет смесь частиц меди, марганца и никеля с размером частиц, близким к исходным материалам.

Для исследования влияния обработки порошковых материалов проводили исследования с помощью дифференциально-термического анализа в атмосфере гелия.

Из полученных порошковых сплавов прессовали различные закладные элементы для пайки изделий.

На рис. 2 приведено изделие — дорожный резец, состоящий из корпуса (сталь 35ХГСА) и вставки (твердый сплав ВК8). Перед пайкой изделие обезжировали, затем наносили флюс в виде пасты ФП-1 [1]. Для данного изделия применяли три вида припоя МНМц 9-23,5 (рис. 3): прокат листа (поз. а), прессованную таблетку из порошка (поз. в), прессованную половину кольца из порошка (поз. б). Пайку изделий проводили в трехвитковом индукторе при 66,6 кГц.

После пайки подрезалась галтель и с помощью ударных воздействий отделялась твердосплавная вставка.

На рис. 4 приведена составная втулка и расположение в ней припоя. Пайку проводили в вакууме при остаточном давлении  $665 \cdot 10^{-5}$  Па. Для достижения равно-

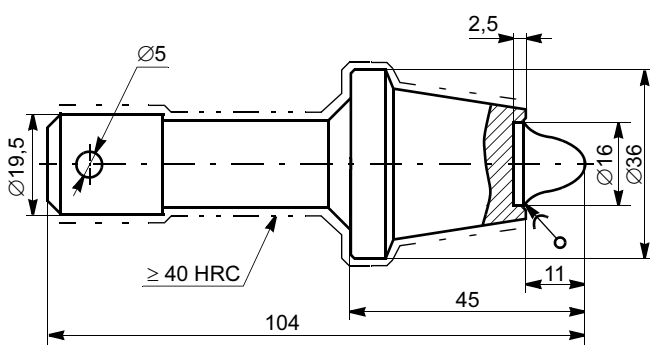


Рис. 2. Дорожный резец

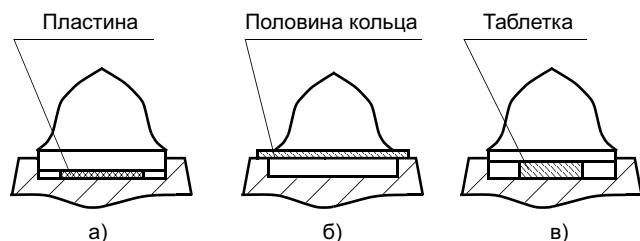


Рис. 3. Расположение припоя на детали

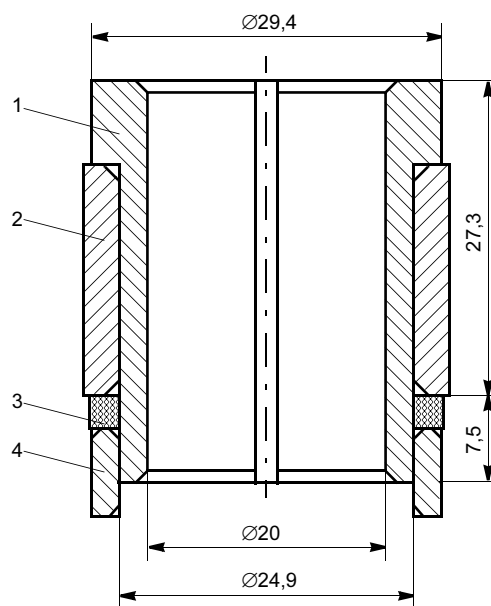


Рис. 4. Составная втулка в сборе под пайку: 1 — опорная втулка (сталь 40X13); 2 — запорное кольцо (сталь 40X13); 3 — кольцо припоя МНМц 9-23,5; 4 — твердосплавная втулка (сталь ВК15)

мерного нагрева изделия помещали в короб с крышкой из коррозионно-стойкой стали, который играл роль экрана и предотвращал попадание паров марганца в камеру печи [4]. Для предотвращения растекания припоя по наружной поверхности твердого сплава применяли специальную краску.

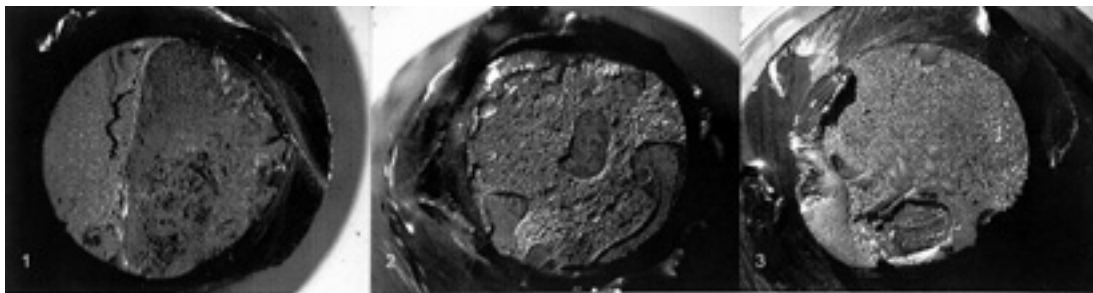
Пайку изделия проводили по следующему режиму: нагрев до 900 °С с небольшой выдержкой и подъем температуры до 1050 °С также с небольшой выдержкой, затем охлаждение образцов вместе с печью.

После пайки изделие разрезали для оценки микроструктуры, проводили ударные испытания, рентгеноспектральный анализ на сканирующем электронном микроскопе 6480LV фирмы JEOL JSM.

## Результаты экспериментов

Обработка порошковой смеси в мельнице приводит к заметному изменению свойств материала — изменению цвета, кинетики плавления припоя и его способности прессоваться в форме таблетки. Уже после 0,5 ч обработки материала в мельнице происходит заметное изменение цвета системы, которое достигает максимального эффекта через 3 ч. При этом происходит агломерация частиц, увеличение их размеров от десятков микрон до долей миллиметра.

Сложное движение частиц порошка совместно с шарами в объеме вибромельницы позволяет достигать одновременно воздействия с истирающим и ударным эффектом. Пластичные частицы меди и никеля начинают натираться на более твердые частицы марганца с одновременным их измельчением. Затем с течением времени из-за присутствия защитной атмосферы вновь создаваемые поверхности раздела фаз становятся настолько активными, что происходит объединение частиц в агломераты, каждый из которых содержит марганец, никель и медь. Конечно, в объеме отдельно взятых частиц состав может быть различен, но в совокупности объем порошка



**Рис. 5. Разрушенные образцы после пайки:** 1 — стальной корпус, таблетка МНМц 9-23,5; 2 — стальной корпус, пластина МНМц 9-23,5; 3 — стальной корпус, полукольцо МНМц 9-23,5

сплава массой в десятки граммов имеет уже одинаковый состав, соответствующий составу припоя. Наблюдается эффект изменения интервала плавления порошкового припоя. При этом кристаллизация и повторное плавление соответствуют компактному материалу сплава.

По мере увеличения времени обработки порошков в вибромельнице создается такое количество контактов частиц между собой, что система начинает себя вести подобно сплаву. При этом наблюдается повышение температуры начала плавления системы в сторону соответствия компактному материалу. Полное совпадение температур плавления можно достичь только при обработке материала в мельнице в течение 5 ч и более.

#### Результаты индукционной пайки на воздухе

На рис. 5 приведены разрушенные образцы после пайки. Видно, что с применением припоя, изготовленного механическим легированием с последующим прессованием в таблетку, плотность шва низкая, имеется множество непропаев, шов составляет примерно 20 % всей площади.

При использовании припоя, также изготовленного механическим легированием с последующим прессованием в полукольцо, качество шва намного лучше, практически 100 %-ное заполнение, даже лучше, чем при использовании литого материала, в котором просматриваются непропаи. Разрушение произошло смешанное, видно вырыв твердого сплава, что свидетельствует о большой прочности материала припоя. Это связано с особенностями индукционного нагрева образцов. Ввиду того, что разогрев образца происходит теплопроводностью от внешней поверхности, где воздействие электромагнитного поля максимально, по мере плавления порошкового материала образующаяся в таблетке легкоплавкая фаза вытекает на периферию таблетки припоя в сторону области повышенных температур и растекается по наружной поверхности образца. В центральной части шва образуется каркас из частиц тугоплавкой фазы с остатками оксидных включений. Невозможно заставить жидкий припой затечь обратно после выравнивания температур по сечению образца, так как отсутствует источник жидкого припоя для заполнения пористого каркаса. Недостаток жидкого припоя приводит к наличию внутри шва значительного количества оксидных включений, которые не могут быть вынесены из зоны паяного шва жидким расплавом и флюсом. В случае применения полукольца припой располагался вне шва и уже в жидком состоянии фронтом заполнял шов по сечению изделия.

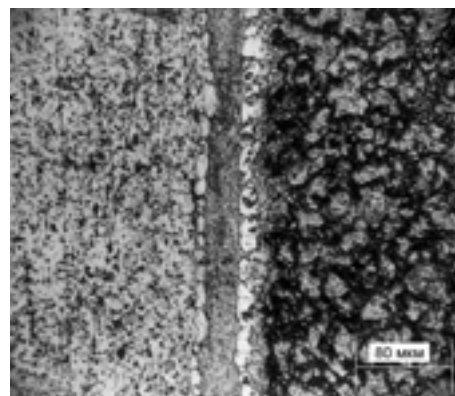
#### Результаты вакуумной пайки

Затекание припоя в образцах происходило за счет капиллярных сил, силы тяжести твердого сплава и опорной втулки, в результате получили хорошо спаянные изделия. Использование защитной краски предотвратило нежелательное натекание избытка припоя на наружные поверхности изделия. После пайки краска легко снималась с изделия.

Некоторые образцы подвергали ударному разрушению и последующему прессованию. В результате обнаружено, что после проведения ударных воздействий по изделию происходило растрескивание твердого сплава, при этом осколки отсутствовали, твердый сплав оставался держаться на шве припоя. Это явление подобно эффекту работы стекла "триплекс". На рис. 6 представлена фотография изделия, подвергнутого ударному воздействию. Наблюдаемое явление может значительно помочь в сохранении нефтяного насоса, в котором работает данная деталь, так как при разрушении детали хрупкие осколки не попадают в подвижные части насоса.



**Рис. 6. Разрушенное изделие**



**Рис. 7. Микроструктура паяного шва составной втулки**



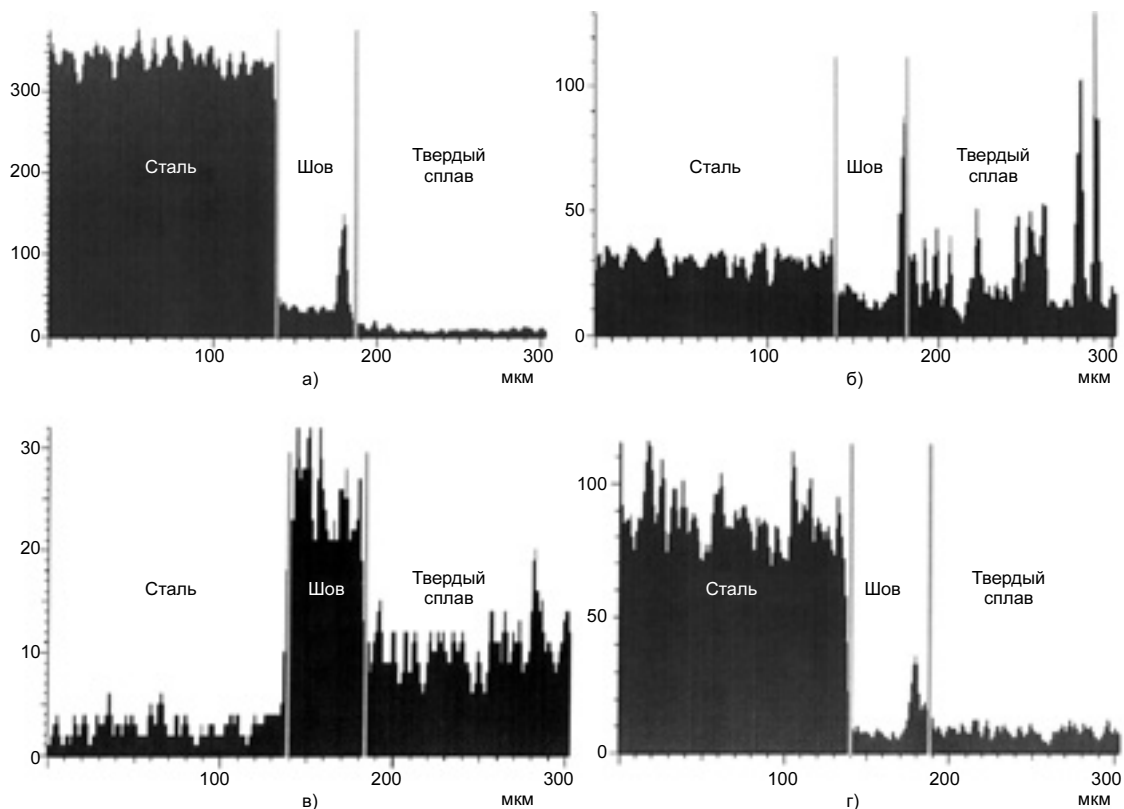


Рис. 8. Спектроэмиссионный анализ области шлифа: а — хром; б — железо; в — никель; г — кобальт

Проведены металлографические исследования паяного шва составной втулки в зоне соединения твердого сплава и стали (рис. 7). Виден плотный равномерный шов без пор, диффузионная зона между припоем, сталью и твердым сплавом. Структура шва более однородная и соответствует наличию в припое ряда твердых растворов.

На рис. 8 приведены результаты спектроэмиссионного анализа шлифа, полученные на сканирующем электронном микроскопе 6480LV фирмы JEOL JSM. Область шлифа представляет соединение припоя со сталью и твердым сплавом.

На рис. 8 видно, что многие элементы, такие как Fe, Cr, Co, были обнаружены в структуре шва припоя, их расположение отмечено только у краев шва, образуя диффузионную зону (см. рис. 7). В работе [3] также установлено, что в диффузионной зоне есть частицы, состоящие из Fe—Mn, имеющие размер 1—3 мкм. Так, Fe и Cr входят в состав диффузионной зоны со стороны твердого сплава, где по сути их не должно быть, это свидетельствует о перемещении элементов по сечению шва и сильной активности припоя по отношению к спаиваемым материалам. Элементы, такие как Fe и Cr, могли попасть в шов в результате намола шаров вибрационной мельницы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют, что применение порошкового механически легированного припоя оправдано при мелкосерийном производстве паяных конструкций. Увеличение количества загрязнений, пористости швов из-за неравномерного плавления порошковых материалов можно устранить с помощью правильно подобранной технологии и расположения припоя в процессе пайки.

Преимущества механического легирования:

- простота изготовления закладных элементов практически любой сложности, не осложняя процесс изготовления сплава, тем самым цена припоя практически не зависит от формы закладного элемента;
- путем увеличения времени обработки порошка в мельнице можно получить сплав, не отличающийся по технологическим и термическим свойствам от литого.

Для снижения пористости швов необходимо:

- исключить расположение порошкового припоя в зоне формирования шва, а расположить его рядом для обеспечения капиллярного затекания в зазор;
- обеспечить более равномерный разогрев детали с изотермической выдержкой при температуре на 50—100 °С ниже температуры солидуса припоя;
- дополнительным способом снижения дефектности паяных швов при использовании порошковых припоев, полученных методом механического легирования, является повышение чистоты исходных материалов или их дополнительная обработка с этой целью перед загрузкой в мельницу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по пайке / И. Е. Петрунин, Ю. И. Березников, Р. Р. Бунькина и др. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
2. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник / М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей, Е. В. Лысова и др. М.: Наука, 1979. 248 с.
3. Carbide tools brazing with mechanically alloyed Cu—Mn—Ni brazing metal / I. N. Pashkov, I. V. Rodin, A. I. Pashkov et al. // Brazing, high temperature brazing and diffusion welding. 2007. P. 45—51.
4. Pashkov I. N., Rodin I. V., Pashkov A. I. Vacuum brazing of carbide with stainless steel with using of copper-manganese braze // Przegląd Spawalnictwa. 2007. № 9. P. 138—141.

**В. А. ФРОЛОВ, д-р техн. наук**  
 ("МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского),  
**Б. В. РЯБЕНКО, инж., А. В. КУРДЮКОВ, инж., В. В. ШИФРИН, инж.**  
 (ФГУП ММП "Салют")

## Газотермические уплотняющие (прирабатываемые) покрытия

Применение уплотняющих (прирабатываемых) покрытий в горячей части турбины газотурбинного двигателя (ГТД) позволяет заметно повысить КПД и тепловую мощность двигателя за счет уплотнения зазоров по периферийным торцам лопаток и по гребешкам лабиринтных уплотнений между ступенями по всей окружности вращения, сводя к минимуму износ дорогостоящих вращающихся лопаток ротора турбины (рис. 1). Основными требованиями к уплотнительным покрытиям в ГТД являются достаточная прочность, податливость при врезании лопаток лабиринтными выступами, антифрикционность, теплозащитные свойства, эрозионная стойкость и низкое сопротивление "выветриванию" рабочей поверхности (со стороны газового потока).

При создании уплотнительных покрытий ГТД применяют плазменное или газопламенное напыление на стартовые элементы компрессора и срабатываемых слоев турбины толщиной 1—3 мм. Исходный материал для получения уплотнительных слоев — механическая смесь (шихта) мелкодисперсных порошков, металлов и твердой смазки, гранулированная на силикатном связующем. В качестве силикатного связующего обычно используют жидкое стекло.

Основными элементами уплотнений для компрессора являются алюминий, никель, жидкое стекло, твердая смазка (графит или нитрид бора). С увеличением рабочей температуры в качестве основы уплотнительного материала подбираются материалы в порядке повышения температурной стойкости: 450 °С — алюминий (АНБ); 650 °С — медно-никелевая губка (20Б); 750 °С — никель (УВС-2); 750 °С — никель-кремниевая губка (КНА); до 850 °С —  $MeCrAlY$ . В качестве твердой смазки используют графит (до 800 °С) или нитрид бора (до 1200—1400 °С).

Эффективная работа уплотнений проточного тракта (рис. 2) обеспечивается при отношении линейного износа уплотнительного материала к износу лопатки, равном 10:1. При отношении 5:1 получают вполне удовлетворительные результаты. Существующие серийные материалы, используемые в интервале рабочих температур до 850 °С, имеют соотношение износа от 2:1 до 4:1. Такие материалы не дают возможности конструкторам уменьшить зазоры и, кроме того, здесь имеет место существенный износ лопатки. При температуре газов 1000 °С и выше решение проблемы уплотнений в турбине истираемыми материалами становится весьма сложной, так как к материалам уплотнений предъявляют ряд сложных и противоречивых требований, важнейшими из которых являются жаростойкость, эрозионная стойкость, термостойкость и др.

Ранее уплотнительные материалы наносили из стержней газопламенным напылением уплотнительного материала (20Б, КНА, УВС-2), в настоящее время конгло-

мерированными гранулированными порошками плазменным и газопламенным напылением. Исходные материалы дробятся, смешиваются, замешиваются на связках, гранулируются или прессуются, сушатся, отсеиваются требуемые фракции.

Из практики напыления композиций уплотнительных материалов установлено, что первоначально в плазменной струе плавится силикатное связующее (~850—890 °С), а затем металлические компоненты. Нитрид бора и графит сохраняются в частицах шихты в твердом состоянии, возможна сублимация нитрида бора с поверхности мелкодисперсных частиц. Применение указанных композиционных материалов на силикатном связующем не позволяет обеспечить длительную работоспособность уплотнительных (прирабатываемых) покрытий в ГТД выше 850—870 °С.

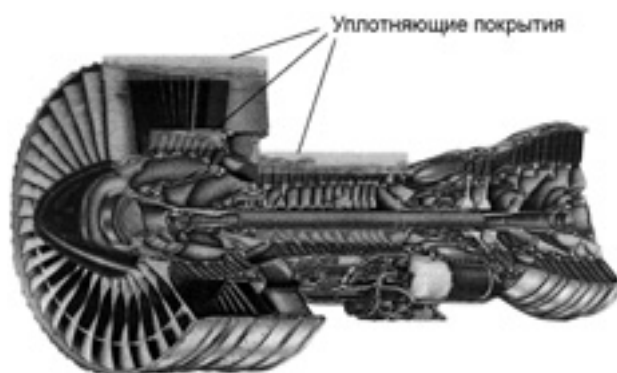


Рис. 1. Уплотняющие покрытия в современных ГТД

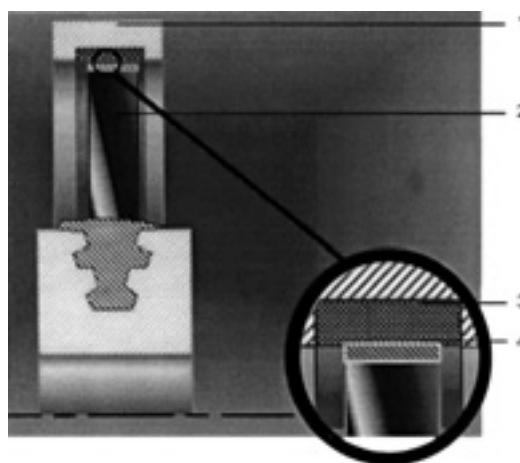


Рис. 2. Принципиальная схема регулировки зазоров в ГТД: 1 — деталь корпуса; 2 — перо лопатки; 3 — истираемое уплотнение; 4 — упрочненный торец пера

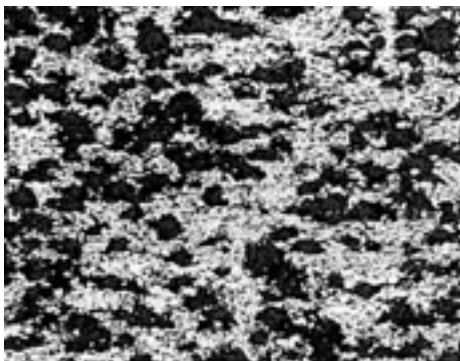


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 200$ ) плазменного уплотнительного покрытия Sulzer Metco 2460 NS

При разработке современных ГТД 5-го поколения, работающих в газовых потоках при повышенных температурах (до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), для уплотнения зазоров и защиты деталей обычно применяют сотовые напыляемые уплотнения, из покрытий перспективными считаются покрытия из плакированных или интерметаллидных сплавов на основе алюминиды никеля, легированных тугоплавкими металлами с нитридом бора и полиэфром. Используемые в настоящее время в турбинах радиальные сотовые уплотнения не предотвращают в достаточной мере перетекание газа, что негативно сказывается на кпд. При этом паяные уплотнения недолговечны, а соты вызывают повышенный износ лопаток. Кроме того, основным материалом при использовании в стационарных турбинах с температурой газа более  $1120\text{ }^{\circ}\text{C}$  на входе нуждается в защите от высокотемпературной газовой коррозии и снижении температуры для обеспечения необходимых прочностных свойств при минимальном расходе охлаждающего воздуха. Покрытия имеют более высокие стойкость при окислении на воздухе, пластичность и прочность сцепления с конструкционными материалами. Для уплотнения зазоров и защиты деталей, работающих в газовых потоках при высоких температурах (до  $1200\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), применяют керамические теплозащитные материалы.

Крупнейшим на сегодняшний день мировым разработчиком и производителем материалов и оборудования для плазменного и газоплазменного напыления является американско-швейцарская фирма "Зульцер Метко". Этой компанией разработан и предлагается для коммерческого использования целый ряд металлических и керамических порошковых материалов.

В 2003 г. компания разработала высокотемпературный уплотнительный материал, состоящий из керамики  $\text{ZrO}_2 + 7\text{--}8\% \text{ Y}_2\text{O}_3$  и полиэфра Sulzer Metco 2460 NS". После напыления этого материала требуется термическая обработка при температуре  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 8 ч на воздухе для удаления из покрытия полиэфра с целью формирования пористости (рис. 3).

Порошок Sulzer Metco 2460 NS имеет несколько недостатков: является дорогостоящим материалом, а также после такого уплотнительного керамического материала в зазорах по периферийным торцам лопаток и по гребешкам лабиринтных уплотнений требуется дополнительное упрочнение последних за счет нанесения упрочняющих материалов, что представляет значительную трудность. Такие упрочняющие покрытия должны работать в условиях высокотемпературных механических на-

грузок и обеспечивать защиту торца пера от высокотемпературной газовой коррозии за счет связующей матрицы на основе  $\text{MeCrAlY}$  (вместо никеля). В свою очередь упрочняющие покрытия имеют выступающие абразивные частицы кубического нитрида бора, которые прорезают дорожку в поверхности корпусной детали, изготовленной из керамики или  $\text{MeCrAlY}$ . На сегодняшний день в Российской Федерации отсутствует технология нанесения кубического нитрида бора на поверхности торца лопатки.

Компания Sulzer Metco располагает стендом Sulzer Innotec (рис. 4) для испытания уплотняющих покрытий (торец лопатки — уплотняющее покрытие) при управляемых температуре и скорости газового потока, скорости и глубине врезания рабочей полости. В ФГУП "ММПП "Салют" совместно с "МАТИ" — РГТУ им К. Э. Циолковского спроектирован и изготавливается аналогичный стенд.

С 2000 г. на базе ФГУП "ММПП "Салют" велись разработки и испытания уплотнительных (прирабатываемых) теплозащитных покрытий и технологии их напыления. Результатом исследований стали два новых покрытия: газоплазменный уплотняющий шнуровой материал УВС-2ГШ, работающий при максимальной температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и термобарьерный уплотняющий материал ТБУ, работающий при температуре  $1200\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Разработанные подтверждены испытаниями ФГУП "ВИАМ" и опробованы на авиационных и стационарных турбинах. Наиболее востребованным при конструкторской разработке современных турбин является материал ТБУ — совместная разработка с ООО "ТЦ-Техникорд".

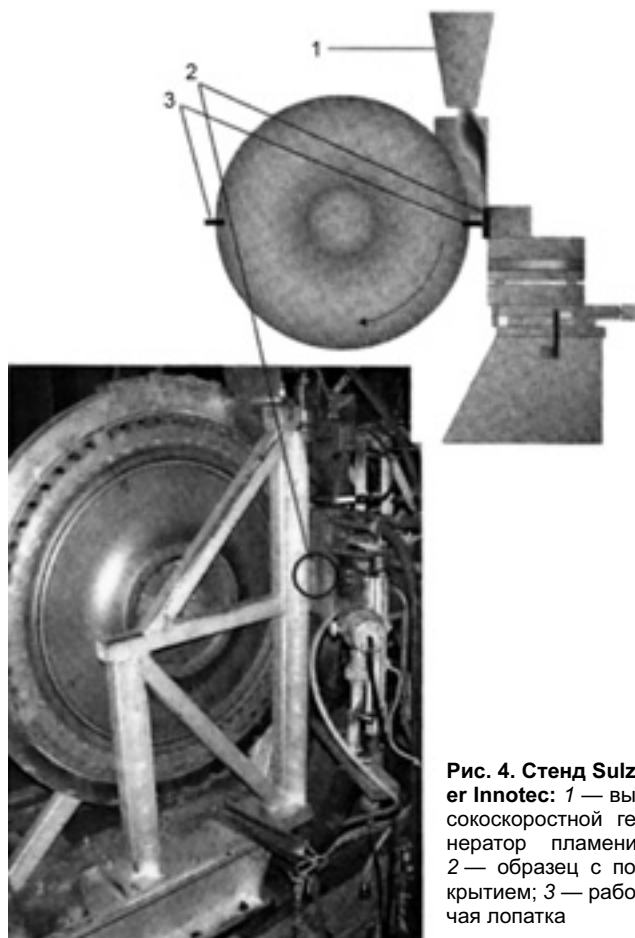


Рис. 4. Стенд Sulzer Innotec: 1 — высокоскоростной генератор пламени; 2 — образец с покрытием; 3 — рабочая лопатка

Материал в виде композиционного порошка на основе керамики системы  $ZrO_2 - 7-8\% Y_2O_3$  предназначен для напыления газотермическим плазменным методом прирабатываемого термобарьерного уплотнительного покрытия. ТБУ-покрытие предназначено для использования на статорных частях из жаропрочных сплавов ступеней турбины газотурбинного двигателя в качестве радикального уплотнения зазора между торцами пера рабочих лопаток колеса ротора и статором турбины. Толщина рабочего слоя ТБУ-покрытия 2,0—3,0 мм, толщина промежуточного жаростойкого слоя системы  $Co-Ni-Cr-Al-Y$  — 0,1—0,15 мм.

Материал представляет гранулированный порошок, размер основной фракции от 20 до 100 мкм, содержание частиц округлой формы не менее 70 %. Материал содержит компоненты: неорганическое связующее — бимитгель, одновременно улучшающее проплавление керамических частиц, и сухую смазку — гексагональный нитрид бора (BN),  $ZrO_2 + 7-8\% Y_2O_3$ .

Преимущества ТБУ-покрытия по сравнению с прототипами:

— более упрощенный способ приготовления порошкового материала за счет применения бимитгеля (высокотемпературного связующего материала). Бимитгель сводит к минимуму потери нитрида бора в процессе пригот-

ления и напыления материала. Применение бимитгеля в качестве связующего позволяет повысить КИМ материала за счет тепловой (экзотермической) реакции при прохождении материала через плазменную струю;

— в процессе длительной работы ТБУ-покрытия фактически исключаются потери нитрида бора за счет применения бимитгеля, а от количества нитрида бора в структуре покрытия зависят прирабатываемые свойства и эффективность работы уплотнения в целом, сводя к минимуму износ дорогостоящих вращающихся частей ГТД. Введение бимитгеля позволяет обеспечить уплотнение проточного тракта при соотношении линейного износа уплотнительного материала к износу лопатки, равном 3:1. Существующие серийные уплотнительные материалы, используемые в интервале температур от 500 до 800 °С, имеют соотношение износов от 1:1 до 5:1;

— за счет оптимального содержания нитрида бора в покрытии исключается эффект "наволакивания" (налипания) материала покрытия на торец пера лопатки. Эта зависимость более заметна при длительной работе ГТД;

— не требует специального упрочнения торца лопатки;

— покрытие толщиной 2,0—2,2 мм позволяет снизить температурное воздействие на основной материал на 430—450 °С.

---

---

## ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

УДК 621.791:658.386

**В. А. ФРОЛОВ, д-р техн. наук, С. А. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук**  
**"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского**

### Новые подходы к организации образовательной системы технологического вуза и направления ее развития

#### ВВЕДЕНИЕ

Смена технологических укладов и экономических стратегий развития общества обуславливает необходимость адекватных изменений в сфере высшего профессионального образования, комплексное реформирование которого стало актуальной задачей [1].

Реформы высшей технологической школы связывают с реализацией новых подходов к организации обучения и управлению стратегическим развитием образовательных учреждений. Основной целью реформ является создание современной образовательной системы, способной реагировать на изменения социально-экономических условий и формировать адекватный человеческий ресурс. В рамках реформы вузам предоставляется большая самостоятельность и академическая свобода выбора направлений совершенствования образовательной системы по целям, содержанию, методам и формам обучения, что соответствует международной практике.

#### Компетентностный подход к организации образовательной системы вуза

Новые подходы к организации образовательной системы должны быть регламентированы в образовательных стандартах высшего профессионального образования нового поколения, ориентирующих вузовское сообщество на определенные результаты образовательной деятельности. Их отличительной особенностью является внедрение в практику подготовки кадров высшей квалификации компетентного подхода к обучению.

Компетентностная модель выпускника вуза предполагает подготовку специалистов, обладающих совокупностью профессиональных ключевых компетентностей и значимых личностных качеств, актуальных для профессиональной деятельности.

Обучение специалистов в современных условиях должно быть ориентировано не столько на передачу им готовых систематизированных знаний, сколько на освоение ими ком-

петентностей, определяющих практическую способность обучаемых применять знания, умения и навыки в реальной производственной ситуации, оценивать свой личностный опыт и самостоятельно контролировать эффективность собственных действий. Перечень четко обозначенных образовательных стандартов профессиональных компетентностей, которыми должен обладать выпускник вуза, послужит основанием для определения его уровня квалификации. В контексте понимания компетентностей как образовательных результатов важно подчеркнуть, что именно индивидуально-деятельностный потенциал молодых специалистов определяет их ценность, востребованность и в значительной мере отвечает запросам профильного рынка труда.

В процессе обучения будущий специалист осваивает определенный набор профессиональных компетентностей, позволяющих ему осуществлять профессиональную деятельность на протяжении некоторого периода времени. Смена поколений технологий и необходимость технологического перевооружения производства ставят перед ним задачу приобретения дополнительных профессиональных компетентностей в организационной, управленческой, маркетинговой и других сферах деятельности. В этой связи актуальным становится формирование необходимых социально-личностных компетентностей в самообразовании, повышающих готовность молодого специалиста к освоению новых подходов и способов деятельности, быстро изменяющихся в сфере любого производства. Владение знаниями и методами формирования индивидуальной технологии обучения создает условия успешной профессиональной деятельности.

Внедрение компетентностного подхода требует не только пересмотра основополагающих принципов организации образовательного процесса, но и наполнения новым содержанием образовательных программ, иного построения учебного процесса и внедрения инновационных технологий в образовательную практику.

### **Принципы построения современных образовательных программ**

Концепция современных образовательных программ, являющихся основным товаром на рынке образовательных услуг, должна базироваться на принципах:

- сбалансированности фундаментальной и специальной подготовки;
- изменения соотношения объемов аудиторной и самостоятельной работы в сторону увеличения последней;
- интеграции учебной, научной и производственной деятельности студентов;
- реализации системы многоуровневого непрерывного профессионального образования и индивидуальной целевой подготовки профессиональных кадров по запросам предприятий [2].

Образовательные программы подготовки профессиональных кадров технологического профиля должны предусматривать проведение части лабораторного практикума на производственных участках промышленных предприятий и научных учреждений, реальное курсовое и дипломное проектирование по тематике, предложенной предприятием, организацию обучения студентов рабочей профессии, стажировку и трудоустройство старшекурсников по специальности на условиях временной занятости. Такой подход к организации технологического образования принят в мировой практике.

Практико-ориентированная образовательная программа обеспечивает возможности реального погружения обучаемого в процесс непрерывного профессионального становления и включения его в систему производственной деятельности. Закрывая трудовой договор, выпускник вуза к окончанию обучения будет иметь практический личностный опыт, необходимый для успешной профессиональной деятельности.

Статистика по трудоустройству молодых специалистов, накопленная в "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского на кафедре "Технология сварочного производства" [3], показывает, что выпускники, обучавшиеся по практико-ориентированным образовательным программам, имеют более высокий уровень профессиональной мотивации и работоспособности, мобильности и успешности в карьере, чем выпускники, освоившие академическую образовательную программу с традиционным набором практик.

### **Особенности взаимодействия субъектов образовательного процесса в современных условиях**

Компетентностный подход к организации учебного процесса, развиваемый в высшем профессиональном образовании большинства стран с развитой рыночной экономикой, успешно реализует общемировую практику обучения, основанную на эффективном взаимодействии преподавателей и студентов как равноправных партнеров образовательного процесса, в котором студент является не пассивным потребителем образовательных услуг, а его активным участником. В соответствии с этой концепцией студент сам выбирает образовательные программы и маршруты, методы и формы обучения. Преподаватель в такой образовательной системе выступает не столько носителем и транслятором знаний, сколько консультантом и наставником обучаемых, корректируя и направляя их деятельность. По сути, в современных условиях преподаватель становится менеджером, реализующим в учебном процессе личностно-развивающие технологии и элементы активных методов обучения. При этом задачей вуза становится обеспечение субъектов образовательного процесса всеми необходимыми ресурсами для эффективной работы и мотивации труда.

Успешное решение задач подготовки, воспитания и профессионального развития молодых специалистов невозможно без повышения роли психологической составляющей учебного процесса. Психологизация учебного процесса предполагает знание на элементарном уровне механизмов управления деятельностью функциональных систем головного мозга и индивидуально-психологических особенностей студентов, владение современными педагогическими принципами и технологиями, целенаправленное использование различных психологических факторов в учебном процессе. Психологическое сопровождение образовательного процесса обеспечивается психологической готовностью преподавателей и их коммуникативной компетентностью.

Важнейшим условием эффективного взаимодействия субъектов образовательного процесса становится формирование в рамках образовательного учреждения социокультурной среды, необходимой для всестороннего развития личности. Ее основными ценностями являются доброжелательность и внимательное отношение преподавателей к обучаемым, поддержание их достоинства и доверия к интеллектуальным возможностям, налаживание необходимых контактов и творческого сотрудничества, предупреждение возникновения конфликтных ситуаций и разрешение проблем межличностного общения. Знание основных правил культуры поведения и умение неукоснительно соблюдать принципы гуманистического общества в повседневной жизни должны стать нормой деятельности человека, получившего высшее образование.

### **Информационные ресурсы образовательного процесса**

Знания, умения и опыт формируют внутренний ресурс молодого специалиста. Однако для достижения конкретных образовательных целей он нуждается в дополнительном использовании различных внешних ресурсов. В этом контексте

развитию учебно-познавательных и коммуникативных способностей обучаемого в значительной мере способствует внедрение в учебный процесс современных информационных технологий, обеспечивающих поэтапность, преемственность и системность формирования профессиональных компетентностей молодого специалиста.

Одной из целей информатизации учебного процесса является разработка электронных учебно-методических комплексов по различным дисциплинам учебного плана. Такие комплексы должны включать электронные учебники, учебные пособия, справочники, методические указания, а также системы самоконтроля знаний и умений обучаемых.

В институте накоплен опыт разработки и внедрения в учебный процесс виртуального лабораторного практикума [4], основанного на использовании технологий имитационного моделирования сложных для физического воплощения объектов и технологических процессов, освоение которых затруднительно без использования средств информатизации. Развитие мультимедийных технологий и поддержка интерактивного режима взаимодействия обучаемого со средой моделирования повышают эффективность обучения студентов.

Оснащение вузов современной компьютерной техникой и средствами телекоммуникаций, адекватных потребностям учебного процесса, большой выбор лицензионных и сертифицированных программных продуктов, обеспечение доступа студентов к Интернету способствуют развитию умений обучаемых свободно и компетентно работать с информационными потоками, поддерживая на высоком уровне информационно-познавательную и коммуникативную деятельность.

Возможности Интернета как системы методов, средств и технологий, обеспечивающих передачу разнообразной по виду и содержанию информации, ориентированной на коллективное использование, постоянно расширяются. Ведущие вузы создают сайты, размещая на них не только информационные, но и обучающие материалы, а Интернет-пользователи формируют свой контент, заполняющий Интернет-пространство. Создание вузовской информационно-образовательной среды и активное использование образовательных Интернет-ресурсов обеспечивают возможности для активного внедрения дистанционных технологий обучения в форматах довузовского, заочного и послевузовского образования. Студент получает право выбирать место и форму обучения, создавать собственную систему выбора путей и использования внешних ресурсов для приобретения необходимой информации при реализации конкретных образовательных целей.

Современный прогресс в области информационных и коммуникационных технологий делает образовательный процесс более доступным и гибким, исследовательским и инновационным. За счет применения карманных персональных компьютеров возрастает мобильность обучения и управляемость информационными потоками, а следовательно, привлекательность и интерес к процессу обучения.

Применение электронных ресурсов не только стимулирует творческую деятельность и повышает академическую активность обучаемых, но и является средством частичной автоматизации труда преподавателей, связанного с контролем и оценкой уровня учебной деятельности студентов. Создание в вузе соответствующей информационно-образовательной среды, способствующей формированию информационной компетентности студентов и информационной культуры преподавателей, способно оказать решающее влияние на качество обучения, воспитания и профессиональное развитие молодых специалистов.

### **Некоторые подходы к формированию технологической элиты**

В период перехода экономики на инновационный путь развития актуальной становится деятельность технологиче-

ских вузов по подготовке технически грамотных и всесторонне развитых творческих личностей, так называемой технологической элиты. Они должны обладать интегрированным мышлением, быть мотивированными на достижение новых результатов и способными к восприятию инноваций.

Творческую личность отличают деловая активность и предприимчивость, индивидуальный стиль работы и владение персональным набором приемов эффективной деятельности, готовность к нестандартным решениям и активному использованию как внутренних, так и внешних ресурсов для выполнения поставленных задач. Творческая личность стремится к получению новых знаний, максимальной реализации своего личностно-творческого потенциала и нацелена на достижение новых высот в своей профессиональной карьере.

Среди работодателей производственно-технологической сферы все больше сторонников находит точка зрения, что специалистов, способных к развитию творческих возможностей, необходимо обучать основам инновационной деятельности, главным результатом которой должно стать превращение новых знаний и умений в новый продукт (изделия новых поколений, передовые технологии). Творческие личности должны обладать таким набором актуальных качеств, как умение видеть и понимать суть проблемы, владеть методами анализа и тенденций развития, выбирать варианты и разрабатывать алгоритмы действий, решать оптимизационные задачи и использовать современные инструменты маркетинговых и конъюнктурных исследований по продвижению инновационных проектов на отечественные и зарубежные рынки. По мнению работодателей, специалисты-инноваторы, способные принести своим фирмам максимальную прибыль, будут наиболее востребованы.

Для подготовки специалиста-инноватора, являющегося по сути "штучным" товаром на рынке интеллектуального труда, вуз должен создать образовательную систему более высокого уровня организации и управления. Важнейшими элементами разработки современной образовательной системы являются:

- внедрение в учебные планы востребованных учебных дисциплин;
- обеспечение вариативности образовательных программ и диверсификация образовательных услуг, охватывающих широкий круг специалистов;
- развитие системы дистанционного и открытого образования;
- дифференциация и индивидуализация обучения;
- гибкость и динамичность учебного процесса, и его адаптивность как к социальным запросам и интересам обучаемых, так и потребностям работодателей.

В последние годы усиливается тенденция получения специалистами технологического профиля экономико-управленческого образования. Знания современного инструментария экономики, технологий менеджмента и стратегий маркетинга значительно расширяют сферу профессиональной компетентности специалистов. Грамотная стыковка и интеграция учебных планов и образовательных программ, предоставление обучаемым качественных условий для получения второго высшего или дополнительного профессионального образования обеспечат конкурентоспособность образовательной системы вуза и ассоциируемого с ним "бренда".

### **Стратегические цели инновационного развития технологических вузов**

К стратегическим целям инновационного развития технологических вузов следует отнести создание опережающих образовательных программ и актуальных учебных планов по переподготовке кадров и повышению квалификации специалистов производственной сферы по тем направлениям

развития науки и технологии, которые будут востребованы экономикой завтрашнего дня. Разрабатывая и внедряя инновационные образовательные проекты, необходимо создавать и соответствующую им систему гарантий качества обучения. Реализация таких образовательных проектов должна осуществляться на основе определения работодателем целей и задач обучения и формирования заказа на конкретную образовательную программу; разработки вузом учебного плана, содержания программы обучения и учебно-методического, материально-технического и кадрового обеспечения образовательного процесса; выбора обучаемым формы и методов обучения.

Заключение договора о подготовке или переподготовке специалиста обеспечит необходимую ответственность взаимодействующих сторон в образовательном процессе.

Ведущая роль в подготовке высококвалифицированных специалистов, отвечающих требованиям современного производства, отводится выпускающим кафедрам. Основными составляющими деятельности кафедр, способствующими формированию инновационного потенциала образовательных программ, являются:

— участие в федеральных, отраслевых или региональных научно-технических программах и конкурсах грантов;

— создание совместно с ведущими предприятиями инновационных центров и эффективное взаимодействие с малыми предприятиями инновационного типа;

— привлечение инвестиций и оснащение учебных лабораторий современным учебным и исследовательским оборудованием;

— активизация работы по вовлечению студентов в научные исследования, организация студенческих научно-технических конференций и публикация студенческих работ;

— подготовка через систему аспирантура—докторантура собственных квалифицированных преподавательских кадров, способных активно заниматься исследовательской и инновационной деятельностью.

Выпускающие кафедры должны стать инновационно-активными структурами, формирующими имидж вуза как образовательного учреждения инновационного типа. Они должны брать на себя ответственность за конечные результаты образовательной деятельности.

### **Приоритетные направления совершенствования управления технологическим вузом**

Стратегический курс инновационного развития выпускающих кафедр должен поддерживаться политикой вуза в области качества образования и компетентным управлением. Качественные изменения в управлении связывают с созданием и сертификацией его системы менеджмента качества. В этом контексте к приоритетным направлениям совершенствования системы управления технологическим вузом следует отнести:

— модернизацию организационной структуры и создание центров управления качеством;

— использование современных принципов и технологий управления и формирования внутренней корпоративной культуры и конкурентной среды;

— создание и развитие единой структуры информатизации для позиционирования вуза в мировом информационном пространстве;

— оптимизацию документированных процедур, деятельности инструкций и систем аттестации сотрудников;

— разработку маркетинговой стратегии и развитие взаимовыгодного сотрудничества с ведущими отечественными и зарубежными университетами и компаниями.

Одним из важнейших принципов управления качеством образования является организация системы мониторинга,

представляющего целостную и регламентированную систему сбора, измерения и анализа информации о деятельности вуза по различным направлениям. По существу мониторинг должен быть нацелен на формирование в вузе культуры качества. Выбирая способы действий, управленческие структуры вузов должны руководствоваться установками на максимальную эффективность использования всех имеющихся ресурсов при реализации целей стратегического развития образовательного учреждения. Понимание стоящих перед вузом задач, своих полномочий и ответственности за конечные результаты образовательной деятельности обеспечит эффективность всей системы управления качеством образования.

Особая роль в повышении качества образования отводится мониторингу учебного процесса. Основной его целью является получение информации о фактическом состоянии изучения дисциплин в режиме on-line. По результатам мониторинга можно оценить требования к уровню подготовки обучаемых и степень овладения ими программного материала, проанализировать различные факторы, влияющие на образовательный процесс, и определить направления его совершенствования, принять другие организационные решения по управлению качеством обучения.

Внедрение мониторинговых исследований по всем направлениям деятельности вуза обеспечит ясность понимания тенденций развития его образовательной системы, предоставит возможность выявить проблемные вопросы и оценить эффективность принимаемых решений.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Внедрение новых подходов к организации образовательного процесса обеспечит новое качество, целостность и управляемость вузовской образовательной системы.

Используя достижения ведущих зарубежных технологических университетов, реализующих эти подходы не одно десятилетие, вузовскому сообществу предстоит пройти этот путь за более короткий период времени. При переносе их опыта на отечественную ниву высшего профессионального образования следует отказаться от скороспелых и конъюнктурных решений. Необходимо сохранить в максимальной степени все лучшее, накопленное в сфере подготовки отечественных специалистов высшей профессиональной квалификации.

Внедрение инноваций в образовательный процесс требует внимательности и ответственности за конечные результаты образовательной деятельности. Совместными усилиями государства, работодателя, вузовского, академического и профессионального сообществ необходимо превратить наметившиеся тенденции в деятельности технологических вузов в устойчивый тренд, который должен вывести национальную экономику на новый технологический уровень развития и обеспечить ее конкурентоспособность.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Фролов В. А., Федоров С. А. Проблемы, основные цели и направления реформирования системы подготовки профессиональных кадров технологического профиля // *Технология машиностроения*. 2008. № 2. С. 78—82.
2. Фролов В. А., Федоров С. А., Голубева Т. В. Опыт интеграции образовательной и производственной сфер в системе многоуровневого непрерывного профессионального образования // *Технология машиностроения*. 2003. № 5. С. 72—75.
3. Фролов В. А., Федоров С. А. Опыт разработки и внедрения образовательных программ подготовки инженерных кадров для предприятий машиностроительного комплекса // *Технология машиностроения*. 2006. № 5. С. 89—100.
4. Пронин Н. С. Применение современных информационных технологий в создании имитационных лабораторных практикумов // *Научно-методические труды университета*. М.: ИТЦ МАТИ, 2003. С. 255—261.

**Е. А. МАЧНЕВ, канд. техн. наук, В. А. ФРОЛОВ, д-р техн. наук**  
**"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского**

## Особенности компьютерного образования в подготовке инженеров-сварщиков

На современном этапе развития производства в инженерной подготовке специалистов — конструкторов и технологов — важнейшим элементом образования является освоение современных компьютерных технологий. Обычно это воспринимается как освоение информационных технологий в качестве инструментария в своей профессиональной деятельности. Однако на практике это сложнейшая многофакторная задача как для кафедры, передающей эти знания студентам, так и для производства, способного обеспечить использование этих знаний в своей деятельности. Это может быть хорошо проиллюстрировано рассмотрением принципиальной логической цепочки с позиций современной рыночной экономики (рис. 1).

В целях практической реализации эффективной подготовки квалифицированного пользователя по современным информационным, сетевым и компьютерным технологиям необходимо как минимум решить следующие задачи:

— обеспечить освоение современного опыта и разработку новых эффективных методов преподавания инженерам-технологам проектирования, построения и эксплуатации современных технологий информационной поддержки производства;

— решить проблему актуальности изучаемых знаний — выбора разделов информационных технологий, наиболее полезных для инженерной деятельности, и соответствия объема необходимой информации количеству учебных

часов, которые можно выделить без существенного ущерба для традиционных областей знаний по инженерной и специальной подготовке.

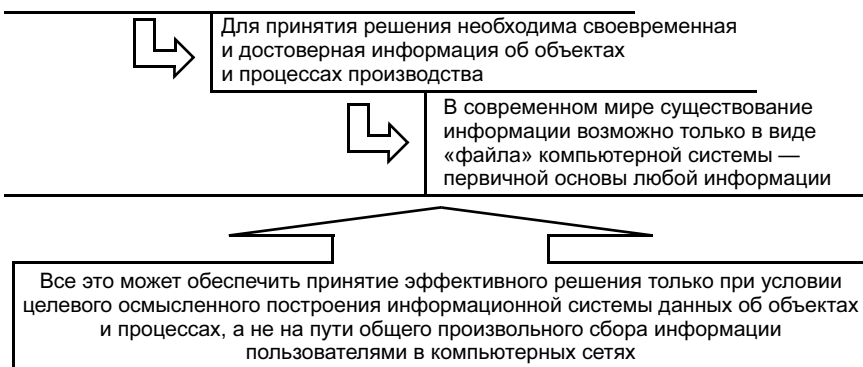
В данной работе рассмотрены лишь основные принципы, которые легли в основу организации учебных планов по компьютерной подготовке инженеров-сварщиков на кафедре "Технология сварочного производства" "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского.

Во-первых, особенности преподавания информационных технологий в инженерной подготовке специалистов-сварщиков определяют эффективность усвоения преподаваемого материала. Однако не объем усвоенных знаний определяет практическую квалификацию специалиста, а его умение решать поставленную задачу с использованием полученных знаний. Профессиональная подготовка специалистов по компьютерным технологиям к системам на основе окон и объектов (ОС WINDOWS, объектное программирование, макросы на VBA) сформировали особую технологию подготовки специалистов — специалистов-операторов конкретных компьютерных систем без необходимости всестороннего понимания сущности решаемых задач. Такая технология обучения характер-

на для всевозможных авторизованных учебных центров, которые, как правило, используют учебно-методические материалы фирм-производителей программных продуктов (например, время подготовки специалиста высшей квалификации по одной линейке программных продуктов Microsoft примерно до 2,5 мес.). Примерно такой же подход только в расширенном виде заложен и в образовательные стандарты специалистов по информационным системам и технологиям. Современные компьютерные продукты, особенно рекомендуемые для применения в инженерной деятельности, более "интеллектуально" развиты, имеют дружелюбный интерфейс и якобы не требуют от пользователя глубокой инженерно-математической подготовки. Поэтому часто сталкиваемся с тем мнением руководителей предприятий, что, закупив современное программное обеспечение, они искренне полагают, что освою его практическое применение на базе того образования, которое уже имеют их специалисты, ну уж во всяком случае те молодые специалисты, которые недавно закончили цикл обучения по программам компьютерных технологий, рекомендуемыми существующими образовательными стандартами. Однако адаптация мирового опыта подготовки специалистов по информационным и сетевым технологиям к специфике российского инженерного образования и, в частности, инженеров-технологов требует постоянной разработки новых методологических и методических приемов в преподавании этих дисциплин. На кафедре "Технология сварочного производства" на базе слияния опыта авторизованной (фирменной) компьютерной подготовки и российских технологических школ компьютерно-математического моделирования (расчета) процессов сварки сформулированы и применяются в учебном процессе новые принципы компьютерной подготовки инженеров-технологов, обеспечивающие эффективное освоение и применение студентами в инженерной практике новейших информационных технологий:

- модульный принцип формирования учебных курсов (модуль знаний, раздел, тема, формирующие определенные знания и навыки работы по кон-

Принятие эффективного управляющего решения — единственная гарантия успешной деятельности предприятия



**Рис. 1. Логическая схема выбора решения о роли и содержании дисциплин информационных технологий при подготовке инженеров-технологов**



кретной задаче; комплекс модулей собирается в конкретную на данный момент времени программу профессиональной подготовки);

- уровневый принцип организации обучения (один и тот же модуль может даваться с разной глубиной проработки, что обеспечивает подготовку специалиста для выполнения заданий по смежным дисциплинам инженерной и технологической подготовки с использованием изучаемых программных средств с различным уровнем мастерства);
- принцип формирования "индивидуального задания" при подготовке студента (группы студентов), обеспеченный учебными материалами заданий и заданным уровнем качества работы для данного уровня обучения;
- принцип непрерывного профессионального тестирования обучающихся – входной контроль уровня подготовки, профессиональная мотивация по всему циклу обучения, усвояемость материала по результатам текущей аттестации и качеству практических работ;
- принцип непрерывного освоения знаний по каждой теме курса по методологической цепочке знания ⇒ умения ⇒ навыки, при котором теоретическое изучение модуля сразу без временного перерыва переходит в практическую работу по выполнению задания — выбор способов реализации поставленной задачи из существующей области знаний (умения) и закрепление практических навыков при выполнении работы в компьютерном классе;
- обязательное широкое использование в преподавании различных компьютерных и сетевых технологий — слайд-шоу, интерактивные обучающие программы, работа студентов в реальных условиях эксплуатации локальной вычислительной сети.

Фундамент компьютерного образования закладывается в курсе "Информатика" с первого по четвертый семестр. Приоритетной задачей программ подготовки является формирование у специалиста умения использовать современные компьютерные технологии в своей профессиональной деятельности, а не изучение до бесконечности профессиональных тонкостей компьютерных продуктов. При этом одновременно становится ясно, какие именно разделы смежных дисциплин (программирования, математики, маркетинга, управления качеством, САПР и АСУ) и в каких объемах надо включать в программу подготовки инженера-технолога. Слушатель сам сможет развить свои конкретные знания по этим разделам, если на производстве перед ним будет поставлена практическая задача из этой области знаний и будет обеспечена мотивация развития профессионального

уровня его работы или освоения новых образцов программных продуктов.

Вообще, требование преподавания информационных и других дисциплин с использованием компьютерных технологий дает сильный обучающий попутный эффект и для преподавателей, и для студентов. Разработка учебного курса под компьютерные формы обучения требует совершенно особой системы организации курса — формирования теоретической части в виде законченных тем — разделов, подкрепленных подготовленным иллюстративным материалом, библиотекой профессионально ориентированных упражнений (домашних заданий) и системой тестов, прежде всего оценивающих качество усвоения материала и причин его неусвоения. Каждое занятие в этом случае осваивает одну конкретную те-

му и включает в себя все три образовательные составляющие. Крайне неэффективно читать отдельно теорию, организовывать в другое время практическую работу в компьютерном классе (лабораторные работы), а где-то в конце обучения узнавать степень усвоения материала. В наших правилах обучения заложена возможность выполнения задания экстерном и дома, что поощряет развитие у студента той библиотеки умений, которые преподаватель раскрывает на очном занятии в компьютерном классе.

Во-вторых, необходимо определить структуру тем и объем знаний, необходимых для эффективного применения инженером-сварщиком информационных и сетевых технологий в своей профессиональной деятельности. Структура учебных планов предусмат-

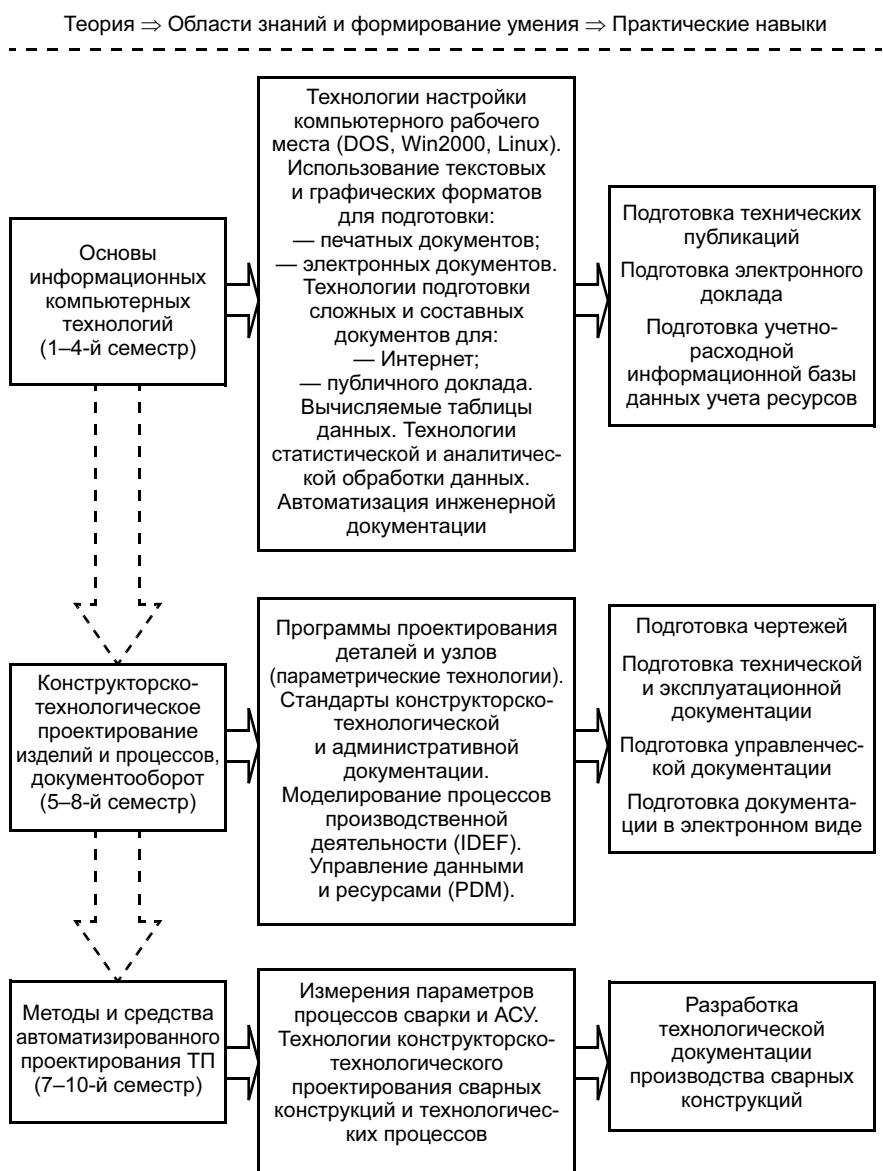


Рис. 2. Блок-схема организации непрерывной подготовки инженеров-технологов сварочного производства по информационным технологиям

ривает непрерывность преподавания информационных дисциплин по всему циклу подготовки инженера. Для этого необходимо определить конкретное содержание новых и переходных учебных планов для всех видов обучения студентов. Блок-схема, иллюстрирующая методологическую структуру организации непрерывного обучения студентов кафедры по информационным технологиям, приведена на рис. 2. Очевидно, что мы придерживаемся общепринятой структуры областей знаний, основанных на информационных технологиях, традиционно преподаваемых на большинстве инженерно-технологических кафедр. Это отражает структуру требований существующих образовательных стандартов по данной специальности.

Существующая структура дисциплин информационных технологий по годам обучения приведена на рис. 3.

Особенностью государственного образования является, с одной стороны, строгое соблюдение требований содержания образовательных стандар-

тов, с другой — обязательное отражение в курсах современного уровня знаний, их адаптация к современным рыночным отношениям в промышленности. Разработанный учебный план по направлению информационных технологий позволяет сочетать эти часто взаимоисключающие требования. Новыми могут быть содержание указанных дисциплин, методология и методы их преподавания. Анализ практических курсовых работ показывает, что ежегодно практически обновляется до 30 % содержательной части дисциплин с компьютерной тематикой.

В-третьих, современные тенденции развития машиностроительного производства в России заставляют прогнозировать требования к инженеру-технологу сварочного производства, которые могут быть предъявлены ему при будущем трудоустройстве на промышленных предприятиях. К сожалению, понятно, что в современных условиях мы не можем рассчитывать на опережающую постановку требований к уров-

ню компьютерных знаний от самих работодателей. Однако здесь достаточно упомянуть, что студенты уже несколько лет в курсе "Информатика" изучают методы подготовки документации не только в среде "Windows — MS Office", но и "Linux — Open Office", которая в 2008 г. указом Президента РФ была определена как обязательная для государственных и образовательных организаций. Подготовка программ обучения, учитывающих эту особенность, обеспечивает устойчивый спрос и конкурентоспособность выпускников на быстро изменяющемся рынке труда.

За последние несколько лет в России резко активизировалась научная и практическая деятельность в области управления качеством промышленной продукции и услуг. Стандарты качества продукции ИСО 9000:2001, система стандартов ИПИ/CALS-технологий в большинстве своем уже приобрели статус государственных стандартов РФ и в большинстве своих технических стандартов всем своим содержанием направлены на формирование главного инструмента для принятия решений по управлению качеством продукции — единой информационной системы описания всего жизненного цикла изделия, как для предприятия — проектирование, производство, эксплуатация, так и для потребителей его продукции (ИЭТР — интерактивные электронные технические руководства). Из этой огромной области знаний для инженера-сварщика, по мнению авторов, целесообразно выделить следующие разделы умений и практических навыков информационных технологий:

- формализованный (численный) критерийный подход к разработке/выбору оптимальных операций технологического процесса сварки, прежде всего с позиций функционально-стоимостной численной оценки целесообразности применяемых технологий и оборудования, в том числе, конечно, и в области самих применяемых информационных технологий, организации рабочего места инженера-технолога;
- формализованные методы анализа проблем качества сварных конструкций и разработка/выбор оптимального технологического процесса сварки в связи с особенностями применения информационных, компьютерных и сетевых технологий в условиях производства, таких как, например, методы информационно-математического моделирования процессов сварки, конструкторско-технологического проектирования изделий и оснастки, проектирования и подготовки технологического цикла изготовления сварной конструкции;
- применение методов функционального моделирования (IDEF-моделиро-

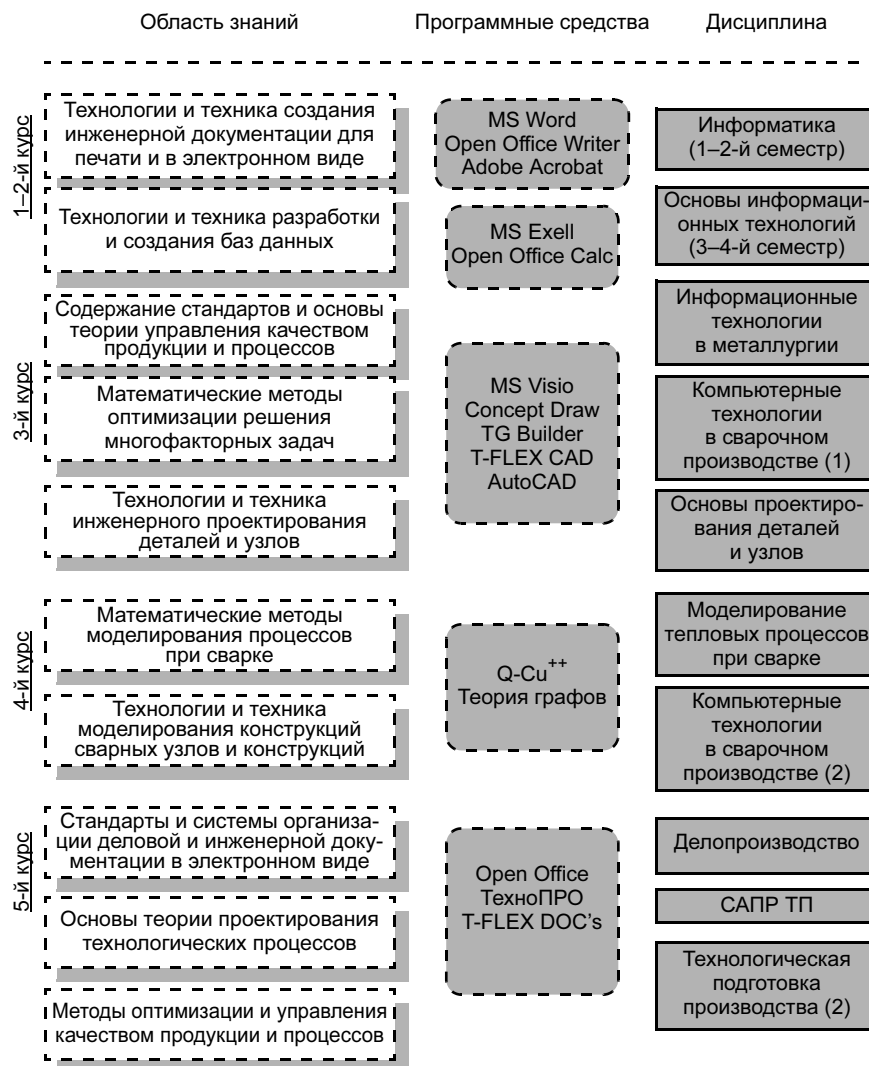


Рис. 3. Структура дисциплин информационных технологий по годам обучения

вание) для анализа и инжиниринга существующих производственных процессов, разработка классифицированных информационно-справочных баз знаний для эффективного применения существующих информационных технологий при разработке рекомендаций по обеспечению требований к качеству сварных конструкций;

- знания и умения подготовки документации в электронном виде, электронных архивов конструкторско-технологической документации и ИЭТР по всему циклу технологического процесса изготовления сварных конструкций с использованием как самых современных, так и доступных промышленному предприятию компьютерных технологий.

Эти темы преподаются студентам в настоящее время в рамках существующих курсов последовательно, по мере увеличения сложности задач и преподавания инженерных и специальных дисциплин.

Более глубокое освоение этой области знаний и современных программных продуктов требует более существенного изменения структуры дисциплин информационного блока. Такая возможность может быть реализована, например, в рамках специализации. Тем не менее наиболее перспективным путем углубления профессионального уровня подготовки специалистов для предприятий по-прежнему остается когда-то широко применяемая система

дополнительной специализированной подготовки и переподготовки специалистов предприятий. Она удачно сочетает в себе практически любую глубину освоения теоретических и практических знаний только по необходимому для выполнения служебных обязанностей блоку дисциплин.

Таким образом, в данной работе рассмотрены подходы по мнению авторов, целесообразного преподавания знаний, формирования умений и навыков из того множества задач, которые надо практически решать для эффективного освоения современных информационных, сетевых и компьютерных технологий.

---

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.791:62—112.81].001.24

**Ю. В. БУДКИН, канд. техн. наук  
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского**

## Технологичность сварных конструкций на этапах жизненного цикла

Современное сварочное производство характеризуется высоким уровнем конкуренции как между производителями сварочного оборудования, так и предприятиями, производящими сварные конструкции. Опыт развития сварочного производства за последние годы подтверждает необходимость рассмотрения совокупности технологичности сварных конструкций во взаимосвязи с экономикой отрасли, которая в первую очередь характеризуется величиной стоимости жизненного цикла изделия.

Технологичность конструкции сварных изделий относится к свойству конструкции, обеспечивающему без снижения эксплуатационных характеристик возможность применения прогрессивных технологических процессов при минимальных затратах и максимальной производительности. Отработка изделия, оснастки, оборудования на технологичность является обязательной для производственного процесса. Эта отработка ведется на всех стадиях создания изделия. Цель отработки изделия, оснастки, оборудования на технологичность заключается в повышении производительности труда, снижении затрат и сокращении времени на технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия при обеспечении необходимого уровня качества изделия.

В общем случае сварная конструкция считается технологичной, если она сконструирована из определенного количества элементов с соответствующими размерами и формами, с применением марок и видов материала, технологии и оборудования, оснастки и методов организации производства,

которые при заданном объеме выпуска и полном выполнении эксплуатационных функций конструкций обеспечивают ее простое и экономичное изготовление. Технологичность сварных конструкций, узлов и деталей оценивают по стоимости используемых ресурсов. Технологичная сварная конструкция обладает минимальным значением стоимости используемых ресурсов. Нетехнологичная сварная конструкция состоит из нерационального числа металлоемких элементов, изготовление которых известными способами и средствами либо невозможно, либо вызывает значительные усложнения технологических операций, повышение трудоемкости, увеличение производственного цикла и повышенное использование ресурсов предприятия.

Перечень показателей технологичности сварных конструкций устанавливается в зависимости от состава и характера факторов, влияющих на технологичность. К числу этих факторов могут быть отнесены следующие:

- число и конструктивно-технологическая сложность заготовок, деталей и узлов, используемых для изготовления сварных конструкций;
- нормализация, унификация, конструктивная преемственность и взаимозаменяемость заготовок, деталей и узлов, используемых для изготовления сварных конструкций;
- количество и конструктивно-технологическая сложность оригинальных заготовок, деталей и узлов, используемых для изготовления сварных конструкций;
- совершенствование конструктивных форм деталей с формой, при которой возможно применение наиболее

совершенных и производительных методов механической обработки;

- уровень прогрессивности принципиальных схем, надежность кинематических связей узлов, точность расчетов запаса прочности деталей;
- использование новых качественных и экономичных марок и видов материала;
- материалоемкость сварных конструкций и коэффициент использования материала;
- разнотипность сварных соединений и протяженность труднодоступных сварных швов;
- энергоемкость технологических процессов и оборудования, используемых для изготовления сварных конструкций;
- корректировка технической (конструкторской и технологической) документации по результатам анализа сварных конструкций на технологичность, выявление конструкторских решений, требующих применения новых технологических процессов и методов.

Технологичность конструкции можно оценивать по качественным и количественным показателям. В работе применена методика мониторинга технологичности сварной конструкции на стадии технической подготовки производства.

Техническая подготовка производства представляет комплекс подготовительных работ конструкторско-технологического характера, обеспечивающий осуществление технологического процесса на всех этапах производства.

Этап, позиция этапа	Результат мониторинга
Технологический анализ сварных конструкций	Установить степень технологичности сварных конструкций в целом, а также используемых в этих конструкциях заготовок, деталей, узлов
Разработка технологических процессов изготовления сварных конструкций	Установить соответствие технических норм использования материальных и энергетических ресурсов масштабам производства
Проектирование и изготовление технической оснастки	Установить степень использования в приспособлениях унифицированных, конструктивно-преемственных и взаимозаменяемых элементов. Определить очередность проектирования и изготовления в большом количестве технологической оснастки при освоении сложных многоэлементных сварных конструкций
Разработка технологического и производственного процесса	Установить наличие программы производства и реализации продукции, описать принятую технологию производства. Установить состав основного оборудования, заготовок, деталей, узлов, его поставщиков и условия поставки. Установить достоверность расчета годовых затрат на выпуск продукции. Описать экологическую и техническую безопасность технологического процесса
Инвентаризация, модификация и внедрение в производство разработанных технологических процессов и технологической оснастки	Мониторинг технологичности выполняется непосредственно на рабочих участках применительно к конкретным сварным изделиям. В описательной части устанавливается качество изделия и его соответствие эксплуатационным характеристикам

Технологическая подготовка сварных конструкций состоит из следующих этапов:

- технологический анализ сварных конструкций и разработка технологических процессов их изготовления;
- проектирование и изготовление технологической оснастки и нестандартного оборудования;
- инвентаризация, модификация и внедрение в производство разработанных технологических процессов и технологической оснастки;
- совершенствование технологических процессов и оснастки для ранее освоенных сварных конструкций и разработка перспективной технологии, направленной на расширение рынков сбыта (см. таблицу).

Цель конструкторской подготовки серийного производства — адаптация конструкторской документации опытно-конструкторских разработок к условиям конкретного серийного производства предприятия-изготовителя. Как правило, конструкторская документация разработок уже учитывает производственные и технологические возможности предприятий-изготовителей, но условия опытного и серийного производств имеют существенные различия, что приводит к необходимости частичной или даже полной переработки конструкторской документации разработок.

В процессе конструкторской подготовки производства разработчики в максимально допустимых пределах должны учитывать конкретные производственные условия предприятия-изготовителя:

- унифицированные и стандартные детали и сборочные единицы, изготавливаемые предприятием или предприятиями-смежниками;
- имеющиеся средства технологического оснащения и контроля;
- имеющееся технологическое и нестандартное оборудование, транспортные средства и др.

В настоящее время все большее место в работах конструкторской подготовки производства приобретают методы автоматизированного проектирования и создания конструкторских документов (САПР).

Сегодня системы ERP-MRP и системы управления знаниями стали символами зарождения новой корпоративной культуры. Базовыми технологиями для них являются объектно-ориентированное программирование и стандартные инструменты управления базами данных. Однако достигаемая эффективность конструкторской подготовки производства приходит в противоречие с ожиданиями потребителей. Предлагаемые к продаже в РФ системы не могут быть адаптированы к нуждам организации со скоростью, адекватной скорости проведения организационных изменений в течение всего жизненного цикла изготовления сварной конструкции. Это обстоятельство диктует потребность рынка в иных базовых технологиях программирования. Современный этап развития систем ERP-MRP характеризуется тенденцией вытеснения традиционных технологий разработки новыми, основанными на управлении знаниями. Технологии управления знаниями включают различные составляющие — обмен профессиональными (узкоспециализированными) знаниями, управление потоками информации, обучение, структуризацию знаний по конкретной научно-технической проблеме, а также организацию совместной работы во временном творческом коллективе, управление взаимоотношениями с партнерами, заказчиками и т. д.

Задача технологической подготовки сварочного производства состоит в обеспечении полной технологической готовности предприятия к производству новых изделий с заданными технико-экономическими показателями (высоким техническим уровнем, качеством изготовления, а также с минимальными трудовыми и материальными издержками — себестоимостью при конкретном техническом уровне предприятия

и планируемых объемах производства). Оработка изделий на технологичность (технологический контроль) производится на всех этапах создания конструкторской документации:

- на стадии эскизного проекта производится анализ конкретных конструкторских решений, в том числе целесообразности выбранных материалов, рациональности и технологичности членения конструкции на сборочные единицы;
- на стадиях технического и рабочего проектов принимаются окончательные решения о технологичности изделия и точности изготовления его элементов;
- на стадии изготовления опытного образца и опытной партии завершается оработка конструкции на технологичность (конкретизируются условия обеспечения технологичности, в том числе возможность использования типовых технических процессов, унифицированной переналаживаемой оснастки и имеющегося или производимого оборудования).

В данной работе рассматривали следующие показатели технологичности конструкции<sup>1</sup>:

- технологическую рациональность конструктивных решений;
- прееменность сварной конструкции.

Технологическую рациональность характеризуют трудоемкость изготовления; удельная материалоемкость; коэффициент использования материалов; технологическая стоимость ресурсов; удельная энергоемкость изготовления сварного изделия; удельная трудоемкость подготовки изделия к функционированию; коэффициент применяемости материалов; коэффициент применения групповых и типовых технологических процессов.

Преимущество сварной конструкции характеризуют следующие коэффициенты.

Коэффициент применяемости

$$K_{пр} = (m - m_{ор})/m, \quad (1)$$

где  $m$  — общее количество типоразмеров (наименований) деталей (элементов, микросхем и др.);  $m_{ор}$  — количество оригинальных деталей.

Коэффициент повторяемости

$$K_{п} = m_{об}/m, \quad (2)$$

где  $m_{об}$  — общее количество деталей.

Коэффициент унификации

$$K_{у} = m_{у}/m, \quad (3)$$

где  $m_{у}$  — число унифицированных стандартных и заимствованных деталей, выпускаемых предприятиями отрасли.

Коэффициент стандартизации

$$K_{ст} = m_{ст}/m, \quad (4)$$

где  $m_{ст}$  — число стандартных деталей.

Коэффициенты  $K_{пр}$ ,  $K_{п}$ ,  $K_{у}$ ,  $K_{ст}$  целесообразно рассчитывать по отношению к трудоемкости элементов, образующих процесс замены устаревшей технологии на новую.

В работе рассмотрен выбор оптимального варианта технологического процесса. В различных вариантах технологических процессов изготовления сварных изделий могут применяться различные заготовки, оборудование, технологическая оснастка и т. д., что приводит к различной трудоемкости, производительности и использованию рабочих различной квалификации. Основными критериями для принятия эффективного управленческого решения по выбору оптимального технологического процесса являются стоимость ресурсов, сумма инвестиционных вложений и социальная полез-

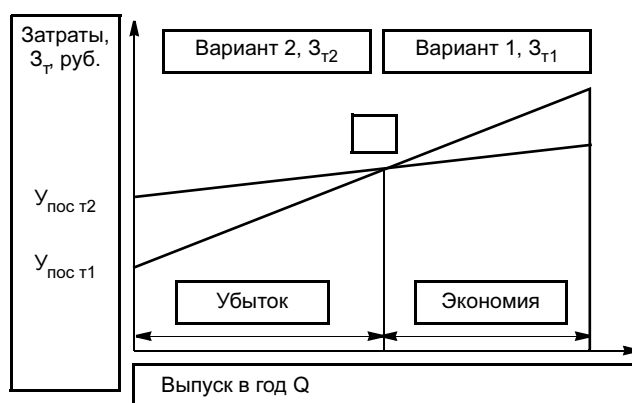


Рис. 1. Сравнительная оценка двух вариантов технологического процесса

ность новации. Для примера расчетов в работе использована стоимость технологического ресурса, которая является частью полной себестоимости и учитывает затраты, зависящие от варианта технологического процесса. Графически варианты 1 и 2 могут быть представлены прямыми линиями (рис. 1).

Точка пересечения этих линий определяет критическое количество деталей  $Q_{кр}$ , при котором оба варианта будут равноценными, т. е.

$$Z_{т1} = Z_{т2} \quad (5)$$

или

$$Y_{пер т1} Q_{кр} + Y_{пос т1} = Y_{пер т2} Q_{кр} + Y_{пос т2}. \quad (6)$$

Откуда

$$Q_{кр} = (Y_{пос т2} Y_{пос т1}) / (Y_{пер т1} Y_{пер т2}), \quad (7)$$

где  $Z$  — общие затраты на технологический процесс;  $Y_{пос}$ ,  $Y_{пер}$  — соответственно условно-постоянные и условно-переменные затраты.

В данном случае при объеме выпуска изделий меньше критического более экономичным будет вариант 1, а при количестве изделий больше критического — вариант 2.

Эффективное управленческое решение по выбору наиболее экономичного варианта реализации технологического процесса сварки из множества возможных способов изготовления продукции следует в общем случае осуществлять по минимуму приведенных затрат, которые принимаются в качестве критерия оптимальности. Однако для сопоставления вариантов технологических процессов во многих случаях достаточно ограничиться расчетом технологической себестоимости выпуска. В описываемом примере затраты меняются при изменении вариантов.

Поэтому в дальнейшем в качестве целевой функции используется матрица, характеризующая минимум суммы значений себестоимости и инвестиционных вложений:

$$Z_{тi} + E_{н} K_i \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $Z_{тi}$  — технологическая себестоимость годового выпуска по варианту изготовления;  $E_{н}$  — нормативный коэффициент эффективности;  $K_i$  — инвестиционные вложения, изменяющиеся при смене варианта технологического процесса.

Значение отношения экономической оценки аргумента (социальных издержек) к экономической оценке функции (социальной полезности) должно быть менее 1.

Функции организационной подготовки сварочного производства характеризуются следующими параметрами:

— плановыми (в том числе предпроизводственные расчеты хода производства, загрузки оборудования, движения материальных потоков, выпуска на стадии освоения);

<sup>1</sup> Будкин Ю. В. Механизм и модели управления эффективностью инновационных процессов в сварочном производстве. М.: Гном и Д, 2007. 236 с.

— обеспечивающими (кадрами, оборудованием, материалами, полуфабрикатами, финансовыми средствами);

— проектными (проектирование участков и цехов, планировка расположения оборудования).

Принятие управленческого решения по замещению технологий в рамках процессного подхода влияет на организационно-производственный процесс. В организационной подготовке сварочного производства используются конструкторская, технологическая документации и данные для проведения технологической подготовки производства.

В работе рассмотрен характер изменения технико-экономических показателей новых изделий на стадии освоения. Начальный этап освоения выпуска новых изделий характеризуется повышенными издержками. Причину этого можно объяснить следующими факторами:

- небольшим объемом выпуска изделий, на который распределяются условно-постоянные расходы, связанные с освоением новых изделий;
- повышенной трудоемкостью и фондоемкостью изготовления (из-за постепенности отладки оборудования, неполной оснащенности техпроцессов специальным оборудованием и оснасткой, недостаточной опытности рабочих и инженеров);
- большим количеством переналадок (например прессового оборудования);
- повышенным браком;
- затратами на обучение персонала;
- доплатами до среднего уровня зарплаты в период освоения, состоянием социальной и культурной среды и др.

По мере наращивания объема выпуска новых изделий происходит и снижение издержек производства. Минимизация потерь тесно связана с характеристикой наращивания выпуска, которая в свою очередь зависит от снижения трудоемкости изделия в процессе освоения.

Для каждого конкретного предприятия, которое характеризуется выпуском определенного вида изделий, уровнем технологии, организацией и т. д., можно установить корреляционную зависимость между суммарным объемом выпуска и его трудоемкостью на основе статистических данных освоения производства ранее выпущенных изделий. Аналогичную зависимость можно установить и для суммарного объема выпуска и себестоимости:

$$y = ax^b, \quad Z_i = Z_1 Q_i^b, \quad (9)$$

где  $Z_1$ ,  $a$  — себестоимость или трудоемкость изготовления первого изделия, с которого считается начало освоения;  $Q_i$ ,  $x$  — порядковый номер изделия с начала выпуска;  $b$  — показатель степени, характеризующий крутизну кривой освоения данного конкретного предприятия, равный 0,05—0,75.

Для удобства используют систему прямоугольных координат с логарифмическими шкалами. Тогда функция снижения себестоимости (трудоемкости) представляет прямую линию, тангенс наклона которой соответствует показателю степени  $(-b)$ , так как

$$\lg(y) = \lg(a) - b \lg(x). \quad (10)$$

При увеличении выпуска в определенное число раз себестоимость (трудоемкость) осваиваемого изделия будет изменяться тоже в определенное число раз. Принято определять величину коэффициента освоения  $K_{oc}$  то снижению себестоимости, которым будет характеризоваться каждое удвоение выпуска.

Показатель степени  $b$  и коэффициент освоения  $K_{oc}$  связаны между собой зависимостью

$$b = (\lg(K_{oc})/\lg(2))\lg(K_{oc}). \quad (11)$$

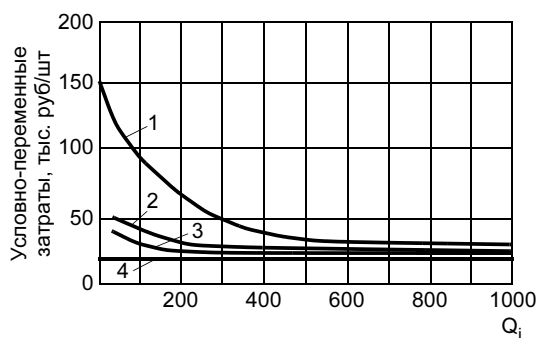


Рис. 2. Изменение условно-переменных издержек на стадии освоения при  $K_{oc}$ , равном 0,7 (1), 0,8 (2), 0,9 (3) и 1,0 (4)

Например, коэффициенту освоения  $K_{oc} = 0,7$  будет соответствовать  $b = 0,546$ ;  $K_{oc} = 0,8 - b = 0,322$ ;  $K_{oc} = 0,9 - b = 0,152$  и т. д.

Практика показывает, что для автомобилестроительных предприятий  $K_{oc}$  лежит в пределах от 0,7 до 0,9, а наиболее часто встречающийся  $K_{oc} = 0,8$ .

Так, например, если  $Z_{10} = 1000$  тыс. руб., начало освоения считается с десятого изделия при  $K_{oc} = 0,8$ , то  $Z_{20} = 800$  тыс. руб.;  $Z_{40} = 640$  тыс. руб.;  $Z_{80} = 512$  тыс. руб.

Величины  $K_{oc}$  и  $b$  зависят от следующих факторов:

- технических (конструктивных, тщательности испытаний и др.);
- технологических;
- материально-технических;
- организационных;
- социальных.

Момент окончания освоения характеризуется конечными показателями  $X_E$  или  $(Q_E, Y_E$  или  $Z_E)$ . Зная конечные достигнутые значения величины себестоимости и величину  $b$  или  $K_{oc}$ , можно построить кривую освоения.

На рис. 2 приведены кривые освоения для условно-переменных издержек. Чем больше коэффициент освоения  $K_{oc}$  (и соответственно больше показатель  $b$ ), тем меньше потери несет предприятие на этапе организации производства и выше эффективность управления технологической подготовкой производства сварочного производства.

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы задачи повышения конкурентоспособности сварочного производства на современном этапе посредством рассмотрения совокупности технологичности сварных конструкций во взаимосвязи с экономикой отрасли, которая в первую очередь характеризуется стоимостью жизненного цикла изделия.

2. Оценку технологичности конструкции предложено проводить по показателям технологической рациональности конструктивных решений и преемственности сварной конструкции. В работе применена методика мониторинга технологичности сварной конструкции.

3. Эффективное управленческое решение по выбору наиболее экономичного варианта реализации технологического процесса сварки из множества возможных способов изготовления продукции следует в общем случае осуществлять по соотношению привлеченных ресурсов, качеству и удовлетворению эксплуатационных характеристик, которые принимаются в качестве критерия оптимальности. Однако для сопоставления вариантов технологических процессов во многих случаях достаточно ограничиться расчетом технологической себестоимости выпуска.

# Рефераты опубликованных статей

УДК 621.791.55:669.715

**Повышение пластичности металла шва соединений из вторичных алюминиевых сплавов.** Фролов В. А., Никитина Е. В., Троянов И. М. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 6—9.

Исследовано влияние дополнительного легирования висмутом, церием и молибденом, а также содержания меди на структуру и ударную вязкость сварных соединений сплавов на основе системы Al—Cu—Si. Показано, что в присутствии молибдена первичные выделения железосодержащей фазы принимают компактную форму, что способствует повышению ударной вязкости. Для сварки сплавов системы Al—Cu—Si с повышенным содержанием железа разработана присадочная проволока, позволяющая на 20—30 % повысить ударную вязкость металла шва и на 20—30 % снизить склонность к образованию горячих трещин.

Предложен режим ступенчатой гомогенизации, позволяющий за счет коагуляции и сфероидизации частиц кремния, растворения и окружения частиц  $\theta$ -фазы повысить ударную вязкость металла шва в 1,5—2 раза. Табл. 2. Ил. 4. Библиогр. 3.

УДК 621.791.754.621.001.57

**Компьютерная модель температурного поля в пластине при аргодуговой сварке неплавящимся электродом.** Сидякин В. А. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 9—11.

Рассмотрена компьютерная модель "Пластина", предназначенная для моделирования температурного поля при аргодуговой сварке неплавящимся электродом тонких листов, и ее особенности. При расчете температурного поля применяют численный метод конечных разностей по явной схеме. При разработке программного обеспечения использован компилятор C++ (GNU Compiler Collection). Ил. 5.

УДК 621.791.14

**Сварка трением с перемешиванием — плюсы и минусы.** Фролов В. А., Иванюхин А. Н., Сабанцев А. Н. и др. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 12—18.

Проанализированы преимущества и недостатки процесса сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов различных классов, исследованы различия механических свойств сварных соединений, выполненных аргодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием, произведена оценка коррозионных свойств сварных соединений, исследована макро- и микроструктура сварных соединений. Табл. 1. Ил. 14. Библиогр. 16.

УДК 621.707.07.621.001.57

**Моделирование процесса низкотемпературной светолучевой пайки изделий электронной техники.** Бажанов А. В., Фролов А. В., Федоров С. А., Степанов В. В. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 19—23.

Сформулированы основные подходы к математическому моделированию процесса низкотемпературной светолучевой пайки изделий электронной техники, исследованы температурные поля, формирующиеся в паяемых деталях в ходе светолучевого нагрева, и обоснованы оптимальные способы укладки припоя при пайке печатных плат с электрорадиоэлементами штырькового типа. Ил. 6. Библиогр. 6.

УДК 621.791.4:539.378.3

**Создание слоистых композиционных материалов для производства высокоэффективной и компактной теплообменной аппаратуры способом диффузионной сварки.** Барабанова О. А., Могорычный В. И., Набатчиков С. В. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 24—28.

Сформулированы научно-технологические принципы создания металлокерамических слоистых композиционных материалов

путем развития механизма и кинетики процессов диффузионного соединения материалов. Установлено, что качество соединения зависит от степени кристаллизации оксидного расплава и равномерности распределения металлических частиц в слое стекла. Ил. 5. Библиогр. 15.

УДК 621.791:669.28

**Комплекс технологических решений при сварке крупногабаритных конструкций из молибденовых сплавов.** Будкин Ю. В., Сивов Е. Н., Казаков В. А., Подольский А. Я. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 29—31.

Рассмотрен комплекс технологических решений для разработки технологического процесса изготовления крупногабаритных конструкций из молибдена, позволяющий существенно повысить качество сварных соединений за счет выбора композиции молибденового сплава, оптимальных технологических процессов, обеспечивающих требуемый состав, структуру металла шва и зону термического влияния, рациональный тип сварных соединений с последующей пропайкой после сварки. Это позволяет разгрузить сварной шов и зону термического влияния от воздействия внешних нагрузок и таким образом повысить работоспособность всей конструкции. Табл. 1. Ил. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.791.763.1/031-052

**Повышение работоспособности электродов при точечной контактной сварке сталей.** Меньшиков Г. А., Власенко А. Н., Невровский В. А., Васин В. А. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 32—34.

Для получения стабильных высококачественных соединений оцинкованных сталей 01ЮТ, 08кп и сталей без покрытий рекомендуется применять электроды с карбидохромовым покрытием, полученным пиролитическим методом. Установлены оптимальные режимы точечной сварки. Показано, что электроды с карбидохромовым покрытием на рабочей поверхности обладают повышенной стойкостью против износа и массопереноса, причем процесс сварки (на выборке более 10 000 точек) характеризуется повышенной устойчивостью к непроварам и выплескам при обеспечении требуемого качества соединения по сравнению со штатной технологией сварки. Ил. 7. Библиогр. 6.

УДК 621.701.07

**Особенности пайки порошковым припоем системы медь—марганец—никель.** Пашков А. И., Герасимов С. П., Пашков И. Н. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 37—41.

Рассмотрены особенности пайки порошковыми припоями системы медь—марганец—никель, полученными методом механического легирования. Приведены результаты пайки изделий в индукторе в атмосфере воздуха с применением флюса и в вакуумной печи. Исследованы свойства порошковых припоев в зависимости от их времени обработки в мельнице, особенности заполнения зазоров паяемых изделий, исследованы микроструктуры паяных швов, проведен рентгеноспектральный анализ шва. Табл. 1. Ил. 8. Библиогр. 4.

УДК 621.793.686.4

**Газотермические уплотняющие (прирабатываемые) покрытия.** Фролов В. А., Рябенко Б. В., Курдюков А. В., Шифрин В. В. — Сварочное производство. 2008. № 10. С. 42—44.

Рассмотрены преимущества газоплазменного напыления уплотняющих покрытий газотурбинного двигателя. Разработан термобарьерный уплотняющий материал ТБУ, работающий при 1200—1400 °С и предназначенный для напыления газотермическим плазменным методом. Приведены свойства материала и преимущества его применения. Ил. 4.

Внимание! Информация

**3 декабря 2008 г. в Екатеринбурге в рамках 8-й Международной выставки "Сварка, диагностика, контроль" состоится научно-техническая конференция "Подготовка специалистов и развитие сварочного производства", посвященная 90-летию акад. Б. Е. Патона.**

Разделы конференции: сварочное оборудование; сварочные материалы; технологии сварки и родственных процессов; методы и приборы контроля качества; аттестация персонала, оборудования, материалов и технологий для объектов повышенной опасности; обеспечение безопасных условий работы персонала; экономическое обоснование проектных и технологических решений в сварке.

Оргкомитет конференции: 620022, Екатеринбург, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ, а/я 9.

Тел./факс: (343) 375 9569, тел.: (343) 375 4575.

E-mail: [Shalimov@uchdep.ustu.ru](mailto:Shalimov@uchdep.ustu.ru)

# Abstracts of the articles published in "Svarochnoe Proizvodstvo", 2008, N 10

## **Weld metal higher plasticity of the joints from the recyclable aluminum alloys.** Frolov V. A., Nikitina Ye. V., Troyanov I. M. P. 6—9.

Effect of the supplementary bismuth, cerium and molybdenum alloying, as well as of copper content on the welded joints structures and impact strength of the alloys based on the Al—Cu—Si system is studied. It is shown that in the presence of molybdenum initial discharge of the ferruginous phase acquire compact form, which favours higher impact strength. Filler wire is developed to weld the extended iron content alloys of the Al—Cu—Si system. The wire 20—30 per cent increases impact strength of the weld metal and 20—30 per cent decreases autocracking susceptibility.

Stepped homogenization rate is suggested, allowing weld metal impact strength improving as much as 1,5—2 times due to coagulation and spheridization of the silicon particles, dissolution and rounding of the  $\Theta$ -phase particles.

## **Computer model of the temperature field in a plate at non-consumable electrode argon-arc welding.** Sidyakin V. A. P. 9—11.

"Plastina" (Plate) computer model is considered, which is intended for modelling temperature fields at non-consumable electrode argon-arc welding of thin sheets; its specific features are shown. Numerical method of explicit scheme finite differences is applied to calculate temperature field. GNU Compiler Collection C++ is used to develop software.

## **Agitation friction welding: merits and demerits.** Frolov V. A., Ivanyukhin A. N., Sabantsev A. N., Didenko S. A., Konkevich V. Yu., Belotserkovets V. V. P. 12—18.

Agitation friction welding process advantages and disadvantages of the aluminium alloys of different classes, special features of agitation friction welding practice are analyzed; difference in mechanical properties of welds conducted by argon-arc welding and agitation friction welding are studied. Welds corrosive characteristics are estimated, welds macro- and microstructures are considered.

## **Low-temperature light-beam soldering process modeling for the electronic products.** Bazhanov A. V., Frolov V. A., Fiodorov S. A., Stepanov V. V. P. 19—23.

Basic approach to mathematical modelling of the electronic products low-temperature light-beam soldering process is formulated. Temperature fields, occurring in the soldered articles while light-beam heating, are studied; solder laying optimal technique is justified at soldering printed circuit board containing pin-type radio-frequency components.

## **Sandwiched composite materials creation to manufacture high-performance compact heat exchanging equipment by diffusion welding.** Barabanova O. A., Mogorychny V. I., Nabatchikov S. V. P. 24—28.

Scientific and technical concepts are formulated for creating metal-and-glass sandwiched composite materials by developing mechanism

and kinetics of the materials diffusive compounding. For all that the compound quality depends on the crystallization degree of the oxide melt and metal shards equitability in the glass layer.

## **Processing decision complex at welding large-dimension constructions from molybdenum alloys.** Boodkin Yu. V., Sivov Ye. N., Kazakov V. A., Podolsky A. Ya. P. 29—31.

Processing decision complex aimed at developing industrial process for large-dimension constructions from molybdenum is considered. Application of these decisions allows for significant weld up-grade due to selection of molybdenum alloy composition, to optimal processes enabling required metal weld content, structure and heat-affected zone, rational type of welded joints and following soldering as-welded. This allows for relieves weld and heat-affected zone from the exposure to external load and thus to improve operability of the whole construction.

## **Higher electrode working capacity at steel resistance-spot welding.** Menshikov G. A., Vlasenko A. N., Nevrovsky V. A., Vasin V. A. P. 32—34.

It is recommended to use carbide-chromium electrodes obtained by pyrolytic method in order to produce stable high-quality compounds of galvanized steels 01KOT, 08кп and of unplated steels. Spot weld optimal modes are established. It is shown that carbide-chromium electrodes have increased resistance to wear and mass transfer on the working surface, and welding process (over 10,000 spots selected) is characterized by higher consistency to incomplete penetration and spitting, enabling required weld quality as compared to normal weld schedule.

## **Powder soldering special features of the copper—manganese—nickel system.** Pashkov A. I., Gerasimov S. P., Pashkov I. N. P. 37—41.

Powders soldering special features of the copper—manganese—nickel system are considered, powder solders obtained by the mechanical doping method. Results of soldering hardware in inductor in the air applying flux and in the vacuum furnace are described. Powder solders properties are investigated in dependence on their milling time, speciality of gap filling in soldered articles are shown, soldered seam microstructures are studied, and X-ray spectrometry analysis of the seam is conducted.

## **Gas-thermal thickening (run-in) coating.** Frolov V. A., Ryabenko B. V., Kuedyukov A. V., Shifrin V. V. P. 42—44.

Flame spraying advantages of thickening coatings for gas turbine engine are considered. Thermo-boundary tamping material TBY is developed, working at the temperature of 1200—1400 °C; this material is meant for gas-thermal plasma spraying. Material properties and advantages of its application are covered.

## РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Москва, 109147, ул. Марксистская, 5. Тел./факс: (495) 926-47-49



**ЭЛСТАТ**  
16 лет на рынке



электростатические, механические, от сварочных и масляных аэрозолей, абразивной пыли, дымов при пайке, лужении и др., вытяжные устройства, гибкие воздуховоды

Публикуется на правах рекламы

### Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 07.08.2008. Подписано в печать 17.09.2008. Формат 60×84 1/8. Бумага мел. имп. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,53. Уч.-изд. л. 11,67. Заказ 19/08.

Отпечатано в типографии издательства "Фолиум", 127238, Москва, Дмитровское ш., 58, тел./факс: (495) 482 5590.

### Подписные индексы журнала "Сварочное производство":

70807 в каталоге Агентства "Роспечать"; 27860 в Объединенном каталоге "Пресса России"; 60256 в каталоге "Почта России".