

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б.Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е.О. Патона
д.т.н. С.И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
д.т.н. В.Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
д.т.н. Ю.С. Борисов,
д.т.н. Г.М. Григоренко,
к.ф.-м.н. А.Т. Зельниченко,
д.т.н. В.В. Кныш,
д.т.н. И.В. Кривцун, д.т.н. Ю.Н. Ланкин,
д.т.н. Л.М. Лобанов,
д.т.н. В.Д. Позняков,
д.т.н. И.А. Рябцев, д.т.н. К.А. Ющенко
Т.В. Юштина (отв. секр.)

Ученые университетов Украины
д.т.н. В.В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,
д.т.н. В.В. Квасницкий,
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,
к.т.н. Е.П. Четвертко,
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,
д.т.н. М.М. Студент, Физ.-механ. ин-т
им. Г.В. Карпенко НАНУ, Львов

Зарубежные ученые
д.т.н. Н.П. Алешин
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ
д.т.н. Гуань Цяо
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай
д.х.н. М. Зиниград
Ун-т Ариэля, Израиль
д.т.н. В.И. Лысак
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ
д-р инж. У. Райсген
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия
д.т.н. Я. Пилярчик
Ин-т сварки, Гливице, Польша
д.т.н. Г.А. Туричин
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Адрес редакции
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ
03150, Украина, Киев-150,
ул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Рекомендовано к печати
редакционной коллегией журнала

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

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная
Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

60 лет кафедре сварочного производства Национального
университета кораблестроения им. адмирала Макарова

Вклад Национального университета кораблестроения
им. адмирала Макарова в развитие сварочного производ-
ства и подготовку кадров 3

Квасницкий В.В., Матвиенко М.В., Бутурля Е.А., Квасниц-
кий В.Ф., Ермолаев Г.В. Напряженно-деформированное
состояние сварных и паяных узлов из разнородных мате-
риалов с мягкой прослойкой при температурно-силовом
нагружении 10

Костин А.М., Мартыненко В.А. Структура и свойства
износостойких материалов системы легирования
Co–Mo–Cr–Si–B 16

Квасницкий В.В., Мьяльница Г.Ф., Матвиенко М.В., Бутур-
ля Е.А., Dong Chunlin. Исследование взаимодействия
сплава на основе Ni₃Al с прослойками различных систем
легирования для TLP-соединения 22

Лебедев В.А., Драган С.В., Жук Г.В., Новиков С.В., Симу-
тенков И.В. Применение импульсных воздействий при
дуговой сварке плавящимся электродом в среде защит-
ных газов (Обзор) 30

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Интервью с директором НПФ «ВИСП»
Ю.А. Никитюком 41

Лобанов Л.М., Пащин Н.А., Черкашин А.В., Миходуй О.Л.,
Кондратенко И.П., Сизоненко А.Н. Перспективы приме-
нения обработки электромагнитным полем при сварке
и в родственных процессах 43

Покляцкий А.Г. Прогнозирование параметров процесса
сварки трением с перемешиванием тонколистовых алю-
миниевых сплавов 53

Марченко А.Е. Оборудование и технологии безопасного
измельчения ферросплавов электродного производства 60

ХРОНИКА

Международный научно-практический семинар произво-
дителей сварочных материалов

Григоренко Г.М. — 80

Демченко В.Ф. — 80

Автоматичне Зварювання

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Головний редактор **Б.Є. Патон**

ЗМІСТ

**60 років кафедрі зварювального виробництва
Національного університету кораблебудування
ім. адмірала Макарова**

- Внесок Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова в розвиток зварювального виробництва і підготовку кадрів 3
- Квасницький В.В., Матвієнко М.В., Бутурля Є.А., Квасницький В.Ф., Єрмолаєв Г.В.* Напружено-деформований стан зварних та паяних вузлів із різнорідних матеріалів з м'яким прошарком при температурно-силовому навантаженні 10
- Костін О.М., Мартиненко В.О.* Структура та властивості зносостійких матеріалів системи легування Co–Mo–Cr–Si–B 16
- Квасницький В.В., Мьяльніца Г.П., Матвієнко М.В., Бутурля Є.А., Dong Chunlin.* Дослідження взаємодії сплаву на основі Ni₃Al з прошарками різних систем легування для TLP-з'єднання 22
- Лебедєв В.О., Драган С.В., Жук Г.В., Новіков С.В., Сімутенков І.В.* Застосування імпульсних впливів при дуговому зварюванні плавким електродом в середовищі захисних газів (Огляд) 30

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- Інтерв'ю з директором НПФ «ВІСП»
Ю.А. Никитюком* 41
- Лобанов Л.М., Пащин М.О., Черкашин О.В., Міходуй О.Л., Кондратенко І.П., Сізоненко О.М.* Перспективи застосування обробки електромагнітним полем при зварюванні та в споріднених процесах 43
- Покляцький А.Г.* Прогнозування параметрів процесу зварювання тертям з перемішуванням тонколистових алюмінієвих сплавів 53
- Марченко А.Ю.* Устаткування та технології безпечного подрібнення феросплавів електродного виробництва 60

ХРОНІКА

Міжнародний науково-практичний семінар виробників зварювальних матеріалів

Григоренко Г.М. — 80

Демченко В.Ф. — 80

Журнал «Автоматичне зварювання» видається англійською мовою під назвою «The Paton Welding Journal»

Адреса редакції

03150, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-63-02
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

Editor-in-Chief **B.E. Paton**

CONTENTS

**60 years to Department of Welding Engineering
of Admiral Makarov National University
of Shipbuilding**

- Contribution of Admiral Makarov National University of Shipbuilding in development of welding engineering and training of specialists 3
- Kvasnytskyi V.V., Matviienko M.V., Buturlya E.A., Kvasnytskyi V.F., Ermolaev G.V.* Stress-strain state of welded and brazed assemblies of dissimilar materials with soft interlayer at temperature-strength loading 10
- Kostin A.M., Martynenko V.A.* Structure and properties of wear-resistant materials based on Co-Mo-Cr-Si-B system 16
- Kvasnytskyi V.V., Myalnitsa H.F., Matviienko M.V., Buturlya E.A., Dong Chunlin.* Investigation of interaction of Ni₃Al-based alloy with interlayers of different alloying systems for TLP-bonding 22
- Lebedev V.A., Dragan S.V., Zhuk G.V., S.V. Novikov, Simutenkov I.V.* Application of pulsed impact in consumable electrode gas-shielded arc welding (Review) 30

INDUSTRIAL

- Interview with Yu.A. Nikityuk Director of SPC «VISP»* 41
- Lobanov L.M., Pashchin M.O., Cherkashyn O.V., Mikhoduy O.L., Kondratenko I.P., Sizonenko O.M.* Prospects of application of electromagnetic fields in welding and related processes 43
- Poklyatskii A.G.* Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys 53
- Marchenko A.E.* Equipment and technologies of safe grinding of ferro-alloys of electrode production 60

NEWS

International Scientific-Practical Seminar of Consumables Manufacturers

Grigorenko G.M. — 80

Demchenko V.F. — 80

«Avtomaticheskaya Svarka» (Automatic Welding) journal is republished in English under the title «The Paton Welding Journal»

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-63-02
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

ВКЛАД НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ ИМ. АДМИРАЛА МАКАРОВА В РАЗВИТИЕ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПОДГОТОВКУ КАДРОВ

(к 60-летию кафедры сварочного производства)

В 2020 г. Национальному университету кораблестроения им. адмирала Макарова (НУК), ранее Украинскому государственному морскому университету имени адмирала Макарова (УГМТУ с 1994 г.), а в прошлом Николаевскому кораблестроительному институту им. адмирала С.О. Макарова (НКИ с 1930 г.), пожившему начало высшему техническому образованию в г. Николаеве, исполняется 100 лет.

В 1930-е годы в судостроении СССР начинается переход от сборки судов с помощью клепки на сварку. И на николаевских заводах — им. 61 коммунара (сегодня ГП «Николаевский судостроительный завод»), судостроительном заводе им. А. Марти (позднее — Черноморском судостроительном заводе (ЧСЗ), сегодня — «Николаевская верфь» ООО «Смарт Мэритайм Груп») сварочные технологии становились ведущими в корпусостроении. На Заводе им. 61 коммунара уже в 1932 г. началась постройка серии из 30 штук цельносварных подводных лодок. С 1934 по 1940 гг. завод построил четыре цельносварных плавучих дока грузоподъемностью 5000 т.

В 1950-е годы развитие сварочных технологий получило новый мощный импульс. Благодаря работам ИЭС им. Е. О. Патона, Николаевского филиала ЦНИИТС (НФ ЦНИИТС) и других разрабатывались теоретические основы сварки, создавались новые способы и высокопроизводительное оборудование, внедряемые в производство.

Вступившие в строй новые судостроительные заводы (Херсонский (1951 г.), «Океан» (1952 г.)) и восстановленные после войны — Завод им. 61 коммунара и ЧСЗ — наращивали производственные мощности, внедряли новые технологии и оборудование. Созданный учеными ИЭС им. Е.О. Патона способ электрошлаковой сварки и оборудование для его осуществления применялись при изготовлении крупных сварно-литых и сварно-кованых судовых корпусных конструкций. Дуговая сварка в углекислом газе, обладающая возможностями получения сварных соединений во всех пространственных положениях, повсеместно вытесняла ручную сварку и становилась основой для механизации сварочных работ в судостроении. Разработанные технологии и оборудование для автоматической сварки под флюсом обеспечили возможность перехода к поточному крупносекционному методу постройки судов.

«Узким» местом технологии судостроения в то время оставались трудоемкие радиационные методы контроля качества сварных соединений, не поддающиеся механизации и автоматизации, и требующие применения специальных мер радиационной безопасности. Кроме того, эти методы малоэффективны для угловых швов, которые по протяженности составляют около 80 % всех сварных швов в корпусе судна.

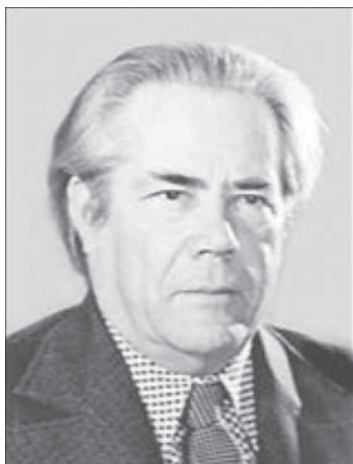
На заводах энергетического машиностроения при обработке специальных конструкционных материалов в середине 1950-х годов начинают применяться электронно-лучевые технологии (сварка, плавление, испарение и др.) и оборудование, разработанные в СССР (ИЭС им. Е.О. Патона, МЭИ и др.) и за рубежом. Для соединения разнородных материалов, жаропрочных сталей и сплавов в производство внедряются технологии диффузионной сварки в вакууме. В Николаеве для производства судовых газотурбинных двигателей в 1953 г. вводится в эксплуатацию Южный турбинный завод (ЮТЗ) и создается проектная организация СПБ «Машпроект» (1961 г.). Проектирование и изготовление узлов газотурбинных двигателей предусматривает использование новых конструкционных материалов, соединение которых невозможно обычными способами сварки. Специальные технологии соединения деталей из цветных сплавов требуются и при создании оборудования для кондиционирования и рефрижерации на судах и кораблях, выпуск которого с 1958 г. был налажен в отраслевом СКБ (позже ПО «Экватор»).

На судостроительных и машиностроительных предприятиях создавались структуры управления сварочным производством, появилась острая необходимость в соответствующих специалистах.

Знания общих основ технологии сварки, которые получали инженеры-кораблестроители, уже не могли удовлетворить все возрастающие потребности производства, поэтому приказом Минвуза СССР от 22 апреля 1959 г. № 464 принято решение создать в Николаевском кораблестроительном институте им. адмирала С.О. Макарова, на базе кафедры технологии судостроения и организации производства кафедру сварочного производства.

Первым заведующим кафедрой был участник Второй мировой войны, выпускник МВТУ им. Баумана Александр Иванович Сафонов, имевший большой производственный опыт и хорошие организаторские способности.

Неоценимую помощь кафедре в этот период оказали И.И. Джевага, первым на Юге Украины защитившим в 1962 г. кандидатскую диссертацию по сварке в ИЭС им. Е.О. Патона (научный руководитель



Доцент Сафонов А.И.

д-р техн. наук, профессор В.В. Подгаецкий), и канд. техн. наук М.Л. Фукельман — начальник сварочной лаборатории НФ ЦНИИ ТС. Иван Иванович Джевага работал начальником сварочной лаборатории на ЧСЗ, был ведущим в стране специалистом по сварке, наплавке, пайке меди и ее сплавов со сталями. В 1966 г. И.И. Джевага перешел на постоянную работу в НКИ на должность доцента, с 1975 по 1980 гг. заведовал кафедрой сварочного производства. Под руководством доцента И.И. Джеваги подготовили и защитили кандидатские диссертации аспиранты В.Я. Сагань, Л.Н. Симаненков и др. Впоследствии доценты В.Я. Сагань и Л.Н. Симаненков обеспечивали подготовку



Доцент Джевага И.И.

инженеров сварочной специальности, организованной в 1967 г., в Херсонском филиале НКИ. К сожалению, состояние здоровья не позволило Ивану Ивановичу завершить работу над докторской диссертацией, в 1981 г. он ушел из жизни.

С 1980 г. заведующим кафедрой сварочного производства является Квасницкий Вячеслав Федорович, д-р техн. наук, профессор, действительный член Королевского института кораблестроения и Института морской техники, науки и технологий (Великобритания), академик наук высшей школы, судостроения, инженерных наук Украины, член Координационного и научного советов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины и Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, заслуженный работник образования Украины, лауреат премии СМ СССР 1991 г. и лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники 2011 г.



Д-р техн. наук, профессор В.Ф. Квасницкий

С начала деятельности кафедры стали определяться направления научных исследований. Одним из первых было научное направление по исследованию ультразвукового контроля (УЗК) сварных соединений судовых конструкций. Результаты работ, выполненных в 1960-е годы, были одобрены Регистром СССР, внедрены в производство на заводах ЧСЗ, «Океан» и др. и рекомендованы для использования во всей системе судостроительной промышленности СССР.

Руководителем направления в 1976 г., после защиты кандидатской диссертации, стал доцент В.П. Савченко (1938–2001 гг.), который создал учебно-научную лабораторию ультразвукового контроля и возглавил подготовку инженеров по специализации «Контроль качества сварки». Разработанные методики и аппаратура для контроля были внедрены в производство на судостроительных заводах Николаева,

Киева, Херсона, Феодосии, Поти и организована подготовка дефектоскопистов.

Тематика исследований и разработок в данном направлении расширилась как в области контроля качества, так и в области голографии и медицинской техники с возвращением на кафедру, после окончания аспирантуры в МВТУ им. Н.Э. Баумана, кандидатов технических наук А.А. Ярового и Ю.И. Русанова. В лаборатории разрабатываются новые конструкции толщиномеров, создаются диагностические комплексы для сварных швов магистральных трубопроводов и труб АЭС, ряд медицинских приборов.

В дальнейшем были созданы методики и аппаратура для УЗК диффузионно-сварных и паяных соединений, в том числе из разнородных материалов.

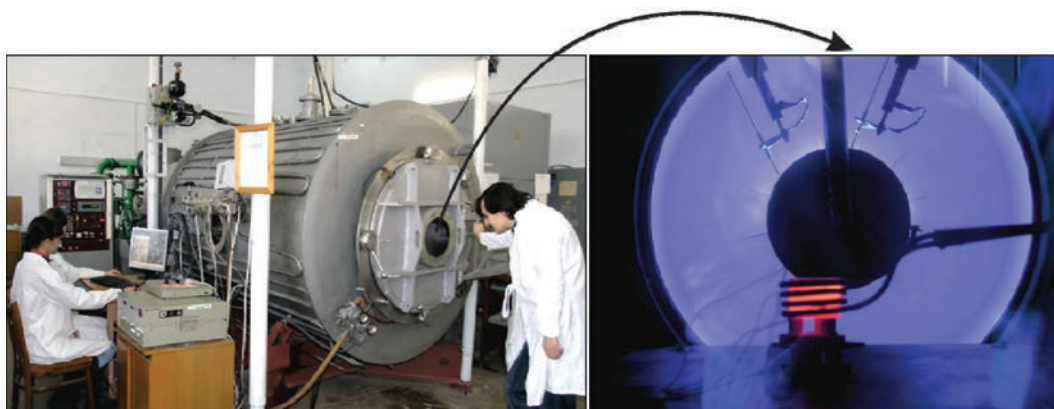
Решением вопросов регулирования остаточных деформаций и напряжений при изготовлении судовых корпусных конструкций занимался Г.В. Ермолаев. Впоследствии канд. техн. наук, доцент Г.В. Ермолаев стал руководителем научного коллектива по исследованию напряженно-деформированного состояния сварных и паяных узлов, в том числе в условиях термоциклирования.

Главное научное направление кафедры — сварка и родственные процессы в газотурбостроении, начало развиваться на кафедре с 1960 г. Применение специальных, отличных от авиационных, жаропрочных сплавов обусловило необходимость решения проблемы их соединения как в однородном, так и в разнородном сочетаниях. На кафедре под руководством В.Ф. Квасницкого создается творческий коллектив, работы которого постепенно вышли на всесоюзный, а затем и международный уровень, а также за рамки судостроения.

Разрабатываются и внедряются в промышленное производство технологии соединения конструкционных материалов на основе графита, керамических материалов со сплавами титана, электротехнической медью, нержавеющей сталью. Разработана принципиально новая технология изготовления токосъемных щеток для электрических машин.

В 1970-1980-х годах выполнен широкий комплекс исследований и разработано оборудование для сварки, пайки и электронно-лучевого напыления изделий космической техники и ядерной энергетики. Работы по сварке и пайке материалов и узлов газовых турбин, МГД-устройств входили в план фундаментальных НИР и государственных программ, выполнявшихся по Постановлению Правительства СССР.

В 1981 г. была разработана и введена в эксплуатацию не имевшая аналогов сверхвысоковакуумная установка ВВУ-1Д для диффузионной сварки, пайки и ионно-плазменного напыления (объем рабочей камеры около 4 м³, вакуум не ниже 10⁻⁵ Па), оснащенная управляемым извне манипулятором, получившая статус Национального достояния. В 1983 г. разработана и создана сверхвысоковакуумная установка



Установка ВВУ-1Д для диффузионной сварки, пайки и ионно-плазменного напыления

ка для электронно-лучевого напыления.

Все технические вопросы принципиального устройства оборудования решались совместно доцентами В.Ф. Квасницким и Г.В. Ермолаевым, функции главного строителя выполнял инженер Л.М. Петренко, строительство универсального сверхвысоковакуумного комплекса велось на ЧСЗ.

В 1985 г. в НКИ была создана отраслевая лаборатория Минсудпрома СССР по соединению жаропрочных материалов, научным руководителем был назначен доцент В.Ф. Квасницкий, заведующим лабораторией — Л.М. Петренко.

С помощью созданного уникального сверхвысоковакуумного оборудования для сварки, пайки и электронно-лучевого напыления проводили не только исследовательские работы, но и изготавливали штатные узлы промышленных изделий для НПО «Энергия».

Все работы по данному научному направлению выполнялись в тесном сотрудничестве с ЮТЗ «Заря», СПБ «Машпроект» (ныне ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»), с ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, Институтом проблем материаловедения (ИПМ АН УССР), ЦНИИ КМ «Прометей», НПО «Энергия» и др.

В 1975 г. в ИЭС им. Е.О. Патона кандидатскую диссертацию по пайке графита защитил Б.В. Бугаенко, проработавший длительное время преподавателем в зарубежных вузах (1972–1975 гг. — Алжирский университет (г. Алжир), 1986–1989 гг. — Институт механики (г. Бершар, Алжир), 1995–1999 гг. — Институт прикладной технологии (г. Надор, Марокко)).

В 1979 г. ассистент кафедры В.М. Емельянов совместно с сотрудниками ИПМ АН УССР за цикл работ по пайке графита с металлами стал лауреатом премии АН УССР для молодых ученых. В 1991 г. группа ученых и специалистов ИЭС им. Е.О. Патона, ЦНИИ КМ «Прометей», НПО «Энергия» за создание и разработку вакуумных технологий и оборудования получила премию Совета Министров СССР в области науки и техники. В составе творческого коллектива были заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор В.Ф. Квасницкий, заместитель руководителя НФ ЦНИИ ТСМ «Сириус», кандидат технических наук, доцент В.М. Емельянов и выпускник кафедры, заместитель главного инженера ЮТЗ «Заря» В.П. Николаенко.

В начале 2000-х годов с появлением новой вычислительной техники и благодаря активной поддержке и помощи академика НАН Украины, зав. отделом ИЭС им. Е.О. Патона В.И. Махненко дальнейшее развитие получило научное направление по исследованию напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке и пайке разнородных материалов.

По результатам работ в области диффузионной сварки и пайки разнородных материалов защитили докторские и кандидатские диссертации 13 аспирантов и преподавателей кафедры, среди которых В.Ф.

Квасницкий, В.В. Квасницкий, В.М. Емельянов, Б.В. Бугаенко, Н.В. Алтухов, С.М. Самохин, А.М. Костин, А.В. Лабарткава, М.В. Матвиенко и др. Ассистент кафедры Ал. В. Лабарткава за работу «Новейшие технологии создания материалов и покрытий в судостроении» в числе молодых ученых НУК в 2013 г. получил премию Президента Украины для молодых ученых, в 2016 г. он защитил кандидатскую диссертацию.

Научное направление по проблемам сварки закаливающих высокопрочных сталей на кафедре возглавлял д-р техн. наук, профессор Ю.М. Лебедев (1938–2009 гг.). Работы выполнялись в тесном содружестве с ИЭС им. Е. О. Патона. Были созданы оригинальные лабораторные установки для исследования структурных и фазовых превращений, построены диаграммы термокинетического превращения в сталях различных структурных классов. В 1995 г. доцент Ю.М. Лебедев защитил докторскую диссертацию. Под руководством профессора Ю.М. Лебедева подготовили и защитили кандидатские диссертации Л.П. Кравченко и В.А. Мартыненко.

Для решения задач повышения точности изготовления судовых сварных конструкций, разработки прогрессивных способов управления качеством сварных соединений на кафедре с середины 1970-х годов активно начало развиваться новое научное направление – автоматизация сварочного производства в судостроении. Работы по этому направлению относились к важнейшей тематике и выполнялись в тесном сотрудничестве с НФ ЦНИИТС. В 1985 г. была создана лаборатория автоматизации сборочно-сварочных процессов в судостроении, вошедшая в отраслевую лабораторию малотоннажного судостроения НКИ.

Научным руководителем направления и лаборатории автоматизации стал канд. техн. наук, доцент А.И. Дремлюга (1937–1991 гг.). К числу главных разработок лаборатории можно отнести создание уникального оборудования для автоматической сварки с прокаткой тонколистовых корпусных конструкций из алюминиевых сплавов (автоматы «Стык» и «Тавр»), нашедшее применение на ФПО «Море» (г. Феодосия) и судостроительных заводах г. Ленинграда.

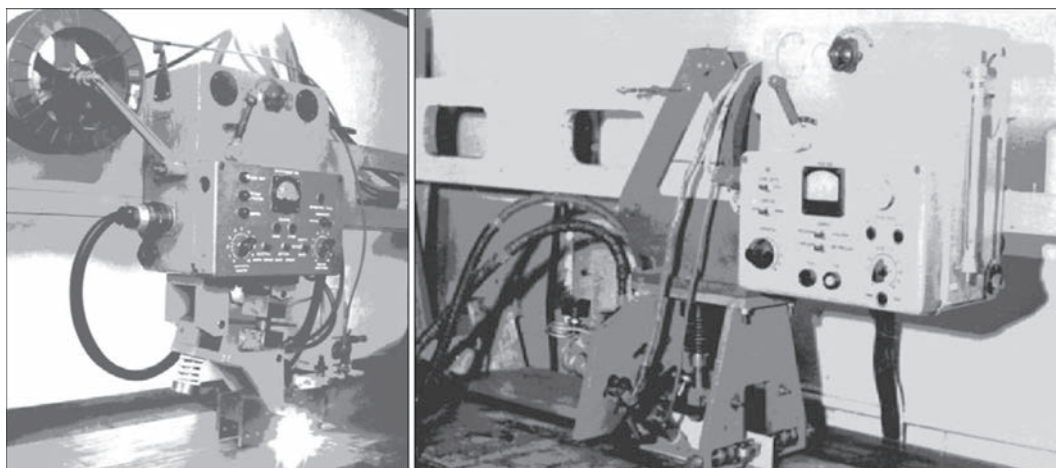
Разработанное оборудование обеспечивало совмещение операций сборки, автоматической сварки и устранения сварочных деформаций при изготовлении полотен и плоских секций. Авторы разработок, в том числе доценты А.И. Дремлюга и С.В. Драган, выпускник кафедры, ведущий инженер НФ ЦНИИТС В.П. Пшеничных, были награждены бронзовыми медалями ВДНХ СССР.

Для производства сварных панелей с минимальными сварочными деформациями были разработаны технология, оборудование и организация работ на механизированной сборочно-сварочной поточной линии, внедренной на судостроительном заводе «Балтия» (г. Клайпеда).

В конце 1990-х – начале 2000-х годов были выполнены работы, связанные с роботизацией сварки при изготовлении крупных судовых секций на заводе «Океан».

Для сварки толстолистовых полотен и восстановления наплавкой изношенных поверхностей колес грузовых железнодорожных вагонов были разработаны технология автоматической сварки и наплавки под флюсом током малой плотности с использованием сварочного выпрямителя с комбинированной вольт-амперной характеристикой. Разработанная совместно с НПФ «АМИТИ» (г. Николаев) конструкция выпрямителя отмечена Дипломом победителя Всеукраинского конкурса «Винахід – 2008» в номинации «Лучшее изобретение – 2008».

С 2010 г. проводятся исследования и разработки, связанные с использованием импульсного механического воздействия на процессы плавления и переноса электродного металла, формирования сварных швов. Работы проводятся в тесном сотрудничестве с ИЭС им. Е.О. Патона. Оборудование и



Лабораторные установки для сварки с прокаткой стыковых и тавровых соединений судовых конструкций из алюминиевых сплавов

технология автоматической наплавки под флюсом конструкционных сталей с высокочастотными колебаниями электрода внедрены в производство на судостроительных предприятиях Николаева и Херсона. По данному научному направлению защитили кандидатские диссертации восемь соискателей, в том числе С.В. Драган, А.Я. Каплун, В.Н. Христенко, Ю.А. Ярослав, И.В. Симутенков и др.

В соответствии с возрастанием на передовых предприятиях объемов применения компьютерных технологий и систем управления технологическими процессами, на кафедре было сформировано научное направление по источникам питания и машинам термической резки нового поколения. При непосредственном участии канд. техн. наук Е.Н. Верещаго, специалиста в области разработки новых образцов транзисторных источников питания, создана серия источников с квазирезонансными принципами коммутации для плазменной резки металлов и сплавов с улучшенными сварочно-технологическими свойствами. Источник PLASMA 110iHF отмечен дипломом во всеукраинском конкурсе-выставке «Лучший отечественный товар 2008 года».

Кафедра сварочного производства совместно с другими кафедрами НУК и организациями принимала активное участие в модернизации судостроительного производства Украины, разработке и внедрении европейских и мировых технологий. Свидетельством плодотворного сотрудничества служит присуждение в 2011 г. Государственной премии Украины сотрудникам НУК им. адмирала Макарова и ИЭС им. Е.О. Патона за работу «Создание универсальных транспортных судов и средств океанотехники» в области науки и техники. Среди лауреатов премии Главный сварщик завода «Океан» доцент Ю.В. Солониченко (выпускник кафедры), зав. кафедрой сварочного производства д-р техн. наук, проф. В.Ф. Квасницкий, зав. кафедрой теории и проектирования судов д-р техн. наук, проф. В.А. Некрасов (также выпускник кафедры сварочного производства).

С середины 1960-х годов кафедра включилась в международное сотрудничество. Тесная связь была установлена с институтом сварки Словении (г. Любляна), в 1990-х годах налаживаются научные и учебные связи с вузами Китая. Преподаватели получают возможность прохождения научной стажировки в зарубежных научных и учебных центрах. Научную стажировку по вопросам автоматизации и роботизации сварочных процессов прошел в Техническом университете Дрездена (ГДР) доцент С.В. Драган, в университетах г. Шеньян и г. Харбин (КНР) по теме управления качеством сварных конструкций стажировался доцент В.Н. Христенко, исследования по пайке жаропрочных сплавов проводил в Техническом университете г. Клаусталь-Целлерфельд (ФРГ) аспирант кафедры В.В. Квасницкий. Ведущих профессоров и доцентов кафедры ежегодно приглашают для чтения лекций аспирантам и выполнения научных исследований вузы Китая.

Международные связи способствуют совершенствованию материальной базы кафедры. Благодаря международному контракту НКИ с Восточно-Китайским судостроительным институтом, подписанному в 1992 г., на кафедре был создан компьютерный класс, приобретен исследовательский комплекс для растровой электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального микроанализа, открыта соответствующая лаборатория, обеспечивающая современный уровень исследований, в том числе высокотемпературную металлографию.

С 1995 г. кафедра ведет плодотворную работу с Учебно-исследовательским центром сварочной техники (SLV-1) земли Мекленбург-Форпоммерн (ФРГ). При активной поддержке президента НАН Украины академика Б.Е. Патона, помощи народного депутата Украины, профессора В.М. Емельянова и директора SLV-1 профессора П.И. Зайффарта работы УДМТУ по подготовке и аттестации инженеров сварочного производства по Европейским нормам были включены в межгосударственную украино-германскую программу «Трансформ». В 1997 г. УГМТУ и судостроительные предприятия Украины создали Судостроительный учебный центр сварочной техники, работающий совместно с SLV-1. В 1998 г. первой группе в составе 24 слушателей центра, ведущих специалистов сварочного производства судостроения, президентом НАН Украины Б.Е. Патонем и проф. П.И. Зайффартом (SLV-1) были вручены дипломы «Европейский инженер по сварке». Среди получивших дипломы были доценты кафедры Г.В. Еромолаев, В.В. Квасницкий, Л.П. Кравченко, которые спустя год получили также дипломы «Международный инженер по сварке».

Подготовка научных кадров на кафедре ведется с 1963 г. путем обучения в аспирантуре, а с 1997 г. — и в докторантуре. Докторами технических наук стали: В.Ф. Квасницкий — заведующий кафедрой сварочного производства (НУК), В.А. Некрасов — заведующий кафедрой теории и проектирования судов (НУК), А.Н. Дубовой — заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов (НУК), Л.М. Дыхта — работающий по совместительству профессором кафедры теории и проектирования судов (НУК), Д.И. Котельников — основатель и первый заведующий кафедрой сварки (Черниговский национальный технологический университет), В.В. Квасницкий — заведующий кафедрой сварочного производства (НТТУ «КПИ им. Игоря Сикорского») и др.

Также докторами наук стали кандидаты технических наук Э.Б. Хачатуров — д-р юридических наук, проректор (НУК) и В.М. Емельянов — д-р наук по государственному управлению, директор Института



Коллектив кафедры сварочного производства (2017 г.). Слева направо: зав. лаб. В.И. Кравченко, лаб. В.А. Кушнир, канд. техн. наук, доц. Б.В. Бугаенко, лаб. А.К. Плевако, канд. техн. наук, доц. Л.П. Кравченко, зав. каф., д-р техн. наук, проф. В.Ф. Квасницкий, канд. техн. наук, проф. НУК Г.В. Ермолаев, ассист. Ал. В. Лабарткава, зав. лаб. С.И. Алексеева, канд. техн. наук, проф. НУК А.М. Костин, лаборанты М.Н. Левковская, С.Ю. Крамаренко, канд. техн. наук, проф. НУК С.В. Драган, асп. А. Г. Иванова, канд. техн. наук, проф. НУК А.В. Лабарткава

государственного управления (ЧНУ им. Петра Могилы).

Все преподаватели кафедры имеют научные степени и ученые звания, участвуют в научных разработках, совершенствовании учебного процесса, активно работают над подготовкой учебной и научной литературы. Только за последние годы издано около 20 учебников и учебных пособий с грифом МОН Украины, монографий, а также десятки методических разработок.

Зав. кафедрой проф. В.Ф. Квасницкий является соавтором официального издания «Правил класифікації та побудови морських суден» (в шести томах) и «Правил классификации и постройки судов внутреннего плавания (в четырех томах) Регистра судоходства Украины. С участием кафедры издана Энциклопедия «Машиностроение», том III-IV, под ред. Б.Е. Патона.

За время существования кафедры высшее образование получили здесь более 3 тыс. выпускников — инженеров, бакалавров, магистров. Среди них более 100 докторов и кандидатов наук, заслуженные деятели науки и техники, заслуженные работники образования Украины, члены Королевского института кораблестроения (RINA), Института морской техники, науки и технологий (IMarEST), Академии наук судостроения Украины.

Сегодня на заводах ПАО «Николаевский судостроительный завод «Океан», ГП «Николаевский судостроительный завод», «Николаевская верфь» ООО «Смарт Мэритайм Групп», ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» на руководящих должностях, связанных со сварочным производством (главные сварщики, начальники лабораторий ОГСв, ведущие специалисты и др.), работают в большинстве выпускники кафедры, которые поддерживают постоянную связь с университетом и кафедрой сварочного производства.

Коллектив кафедры продолжает подготовку специалистов сварочного производства, научных кадров, активно участвует в развитии сварочной науки и техники, совершенствовании учебного процесса в Национальном университете кораблестроения им. адмирала Макарова.

Становление и развитие кафедры сварочного производства стало возможным благодаря огромной помощи и участию многих научных и производственных коллективов и учебных заведений, среди которых ИЭС им. Е.О. Патона, ИПМ НАН Украины, ЦНИИ КМ «Прометей», ЦКТИ им. И.И. Ползунова (г. Санкт-Петербург), ЦНИИТМаш (г. Москва), НПО «Ритм» (г. Санкт-Петербург), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Проблемная лаборатория диффузионной сварки в вакууме Московского авиационного технологического института (университета), Ленинградский кораблестроительный институт (университет), СПБ «Машпроект» (г. Николаев), ЮТЗ «Заря» (г. Николаев), НПО «Энергия», НИИ «Графит» (г. Москва), а также других организаций, ведущие ученые и специалисты которых лично участвовали как в учебном процессе, так и в научных разработках.



Некоторые издания кафедры

Список книг, изданных в 2002–2017 гг.

Учебники

1. Міцність зварних з'єднань (Г.В. Єрмолаєв, 2007).
2. Паяння матеріалів (Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, С.В. Максимова, В.Ф. Хорунов, В.В. Чигарьов, 2015).
3. Спеціальні способи зварювання (Г.В. Єрмолаєв, І.В. Кривцун, В.В. Квасницький, С.Ю. Максимов, 2017).
4. Напруження та деформації при зварюванні і паянні (Л.М. Лобанов, В.В. Квасницький, О.В. Махненко, Г.В. Єгоров, А.В. Лабарткава, Г.В. Єрмолаєв, 2017).

Учебные пособия

1. Джерела живлення для зварювання плавленням (С.В. Драган, 2002).
2. Теорія зварювальних процесів (В.В. Квасницький, 2002).
3. Спеціальні способи зварювання (В.В. Квасницький, 2003).
4. Зварювальні матеріали (А.М. Костін, 2004).
5. Паяння матеріалів (В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, Б.В. Бугасенко, Г.В. Єрмолаєв, 2006).
6. Напруження та деформації при зварюванні (В.І. Махненко, Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, 2011).
7. Основи технології дугового зварювання суднових конструкцій (Ж.Г. Голобородько, С.В. Драган, В.В. Квасницький, 2013.)
8. Основы технологии сварки низколегированных высокопрочных сталей (Г.В. Ермолаев, Г.В. Егоров, В.В. Квасницкий, В.Ф. Квасницкий, В.А. Мартыненко, М.В. Матвиенко, Л.П. Кравченко, 2014).
9. Технологія зварювання суднових корпусних конструкцій (проектування і організація) (С.В. Драган, Ж.Г. Голобородько, І.В. Сімутенков, 2017).
10. Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости (В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко, 2017).

Монографии

1. Машиностроение. Энциклопедия. Технология сварки, пайки и резки (III-IV том; В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, В.Ф. Квасницкий и др.; под ред. Б.Е. Патона, 2006).
2. Інноваційні технології проектування та побудови суден і засобів океанотехніки (С.С. Рижков, В.С. Блінцов, В.Ф. Квасницький та ін., 2009).

С.В. Драган, В.Ф. Квасницкий, А.Ф. Галь

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

В.В. Квасницкий¹, М.В. Матвиенко², Е.А. Бутурля², В.Ф. Квасницкий², Г.В. Ермолаев²

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) при температурно-силовом нагружении цилиндрических узлов из материалов одинаковой прочности, но отличающихся температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР), с мягкой (с меньшим пределом текучести, чем у основного материала) прослойкой и средним температурным коэффициентом линейного расширения. Анализировались поля и эпюры напряжений и пластических деформаций узлов. Исследования НДС показали, что эффект совместного температурного (охлаждением) и силового (сжатием) нагружения узлов с мягкими прослойками проявляется в увеличении радиальных и окружных напряжений в обоих материалах, увеличении эквивалентных в материале с большим ТКЛР и прослойке и осевых в соединяемых материалах и, соответственно, уменьшении эквивалентных в материале с меньшим ТКЛР. Касательные напряжения при этом остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении. При смене охлаждения нагревом материалы меняются местами. Величина максимальных пластических деформаций в материале прослойки по границе раздела с основными материалами вблизи внешней поверхности при совместном температурно-силовом нагружении достигает 2,3 %. При этом осевые напряжения растяжения в хрупких материалах с низким ТКЛР (керамика, графит и др.) при охлаждении в узлах с мягкой прослойкой уменьшаются на величину сжимающих внешних напряжений, т. е. риск хрупкого разрушения снижается. Библиогр. 7, рис. 8.

Ключевые слова: диффузионная сварка, пайка, разнородные материалы, мягкая прослойка, напряжения, деформация, компьютерное моделирование, совместное температурное и силовое нагружение

Основными проблемами соединения разнородных материалов являются процессы активации соединяемых поверхностей и формирование остаточных напряжений [1, 2]. Для решения этих проблем используют промежуточные прослойки. При пайке такой прослойкой является паяный шов. Остаточные напряжения играют важную роль также в работоспособности готовых узлов после остывания [3, 4]. Поэтому исследование таких узлов является актуальным.

Наиболее простыми методами оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) являются инженерные методы расчета в пределах упругости, основанные на гипотезе плоских сечений, однако они не позволяют учитывать влияние многих факторов даже для простых узлов. На современном этапе развития компьютерной техники и программирования наиболее универсальными и перспективными являются методы математического моделирования. В работах [5–7] методом конечных элементов с использованием компьютерного комплекса ANSYS исследованы процессы формирования НДС при соединении разнородных материалов, в том числе металлов с неметалла-

ми. В работах [6, 7] исследованы НДС соединений с прослойками при осевом и температурном нагружении соответственно. Поскольку во многих узлах происходит как осевое, так и термическое нагружение, то в данной работе исследовано НДС при совместном нагружении с учетом пластических деформаций.

Цель настоящей работы — установление влияния мягких промежуточных прослоек, имеющих меньший предел текучести по сравнению с соединяемыми материалами, на формирование НДС при дуговой диффузионной сварке и пайке.

Основной материал исследований. Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. Решали осесимметричные задачи для узлов типа цилиндр–цилиндр диаметром 20 мм, общей высотой $h = 21$ мм и с толщиной прослойки $s = 1$ мм (рис. 1). С учетом специфики узлов, наличия больших градиентов напряжений в узкой зоне вблизи прослойки использовалась градиентная разбивка с переменными размерами конечных элементов, размеры которых в зоне соединения выбирались так, чтобы по толщине

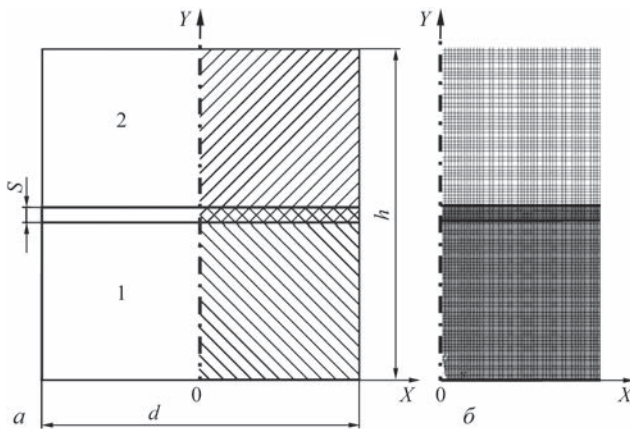


Рис. 1. Физическая (а) и КЭ (б) модели узлов с прослойкой (1, 2 — соединяемые материалы)

прослойки их было менее 10. Использовались конечные элементы типа PLANE 183. Соединяемые материалы 1 и 2 имели одинаковые пределы текучести, но отличающиеся температурные коэффициенты линейного расширения ($\text{ТКЛР} = 20 \cdot 10^{-6}$ и $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Мягкая прослойка имела значительно меньший предел текучести ($\sigma_T = 38$ МПа), чем у основного металла ($\sigma_T = 250$ МПа), и средний ТКЛР ($15 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Модули упругости и коэффициенты Пуассона всех материалов принимались одинаковыми и равными $2 \cdot 10^5$ МПа и 0,3 соответственно, что позволяет выделить влияние именно пластической составляющей деформаций на НДС узла. Принятые свойства материалов при данном нагружении обеспечили пластическое деформирование только прослойки. Соединяемые материалы при этом деформировались упруго по всему объему, что позволяет применить полученные результаты к соединениям хрупких материалов.

Нагружение выполнялось совместным сжатием усилием 40 МПа и снижением температуры узла (после образования соединения) на 100° . Полученные при таком нагружении результаты справедливы и при смене охлаждения нагревом (при сварке с термоциклированием), но материалы 1 и 2, имеющие разные ТКЛР, при этом меняются местами. Результаты моделирования сравнивались с аналогичными узлами при разных видах нагружения (только силовом и только температурном). Анализировались поля и эпюры всех составляющих напряжений и пластических деформаций узлов.

Как показал анализ результатов моделирования, характер НДС в целом соответствует общим принципам механики и закономерностям, установленным ранее [5–7]. Эффекты температурного и силового нагружения алгебраически суммируются, в результате чего поля радиальных и окружных напряжений остаются практически та-

кими же, как при чисто температурном нагружении. Осевые сжимающие напряжения в материале 1 увеличиваются, а растягивающие в материале 2 уменьшаются на величину сжимающей нагрузки. Касательные напряжения заметно увеличиваются на границе раздела «мягкой» прослойки с материалом 1 и уменьшаются на границе раздела с материалом 2 по сравнению с чисто температурным нагружением. Здесь наглядно проявляется алгебраическое суммирование эффектов от разности ТКЛР и пластического деформирования прослойки и значительно больший уровень напряжений при температурном нагружении по сравнению с силовым.

Аналогично изменяется и поле эквивалентных напряжений. Последние при совместном нагружении заметно увеличиваются в материале 1 и уменьшаются в материале 2 по сравнению с чисто температурным нагружением.

В соответствии с эквивалентными напряжениями изменяется и поле пластических деформаций. Как и при чисто температурном нагружении максимум последних сосредоточен вблизи внешней поверхности узла, но заметно изменяется их распределение по толщине прослойки. Они максимальны на границе раздела с материалом 1 и уменьшаются по мере удаления от нее.

Характер и уровень эпюр распределения радиальных напряжений вдоль стыка в соединяемых материалах при совместном температурном и силовом нагружении совпадает с характером соответствующих эпюр при чисто температурном нагружении (рис. 2). При этом максимальные радиальные напряжения в соединяемых материалах снижаются на 15...20 МПа. Аналогично радиальным распределены и окружные напряжения в соединяемых материалах.

В материале мягкой прослойки картина совершенно иная. Приложение давления при снижении температуры существенно (в несколько раз) увеличивает пластические деформации со стороны материала 1 (с большим ТКЛР) и в меньшей степени со стороны материала 2 (с меньшим ТКЛР), меняя при этом их знак (рис. 3).

Эпюры осевых напряжений вдоль образующей узла смещаются в сторону сжатия на величину осевой нагрузки 40 МПа (рис. 4). В результате растягивающие напряжения в материале 2 (с малым ТКЛР) уменьшаются, снижая риск его хрупкого разрушения.

Касательные напряжения, оставаясь неизменными на большей части стыка, увеличиваются вблизи внешней цилиндрической поверхности, увеличиваясь со стороны материала 1 на 10 МПа

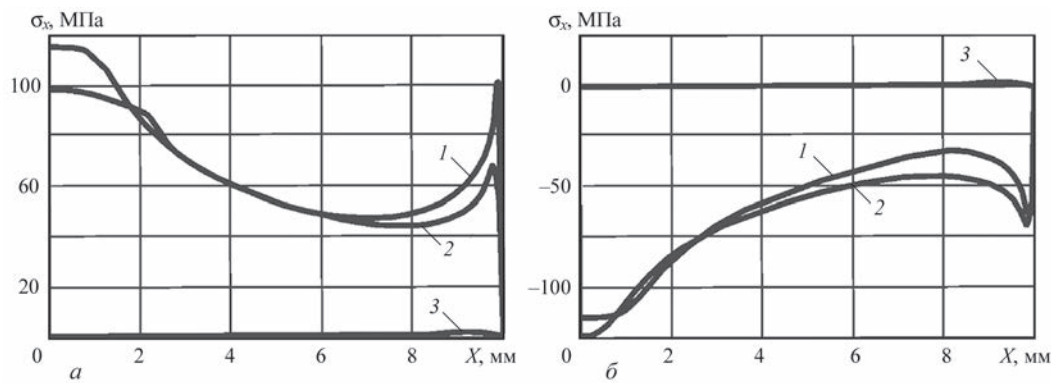


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений в материалах 1 (а) и 2 (б) по стыку с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

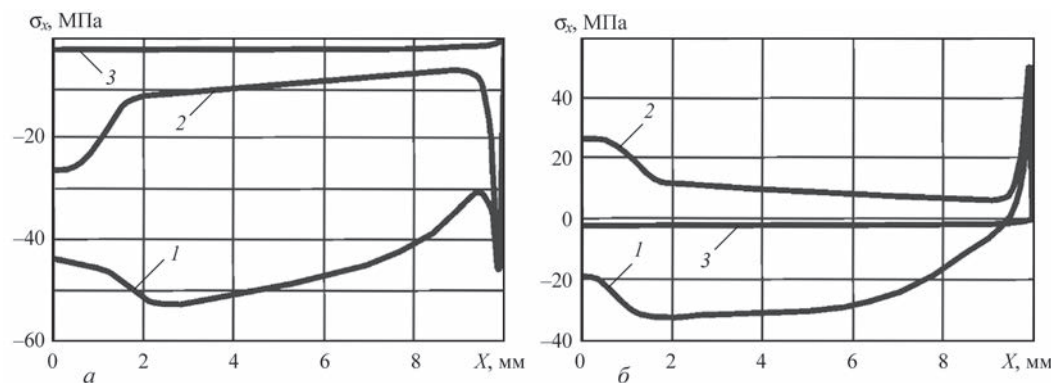


Рис. 3. Эпюры радиальных напряжений в материале «мягкой» прослойки по стыкам с материалом 1 (а) и 2 (б) при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

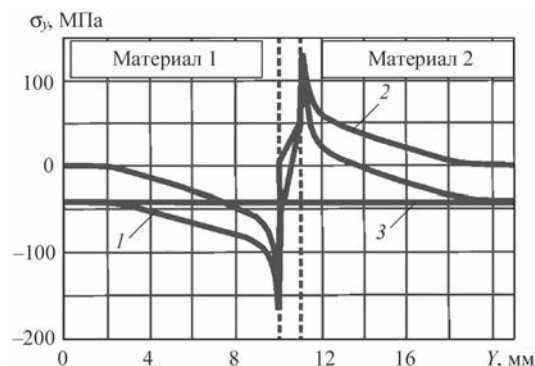


Рис. 4. Эпюры осевых напряжений по образующей узла с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

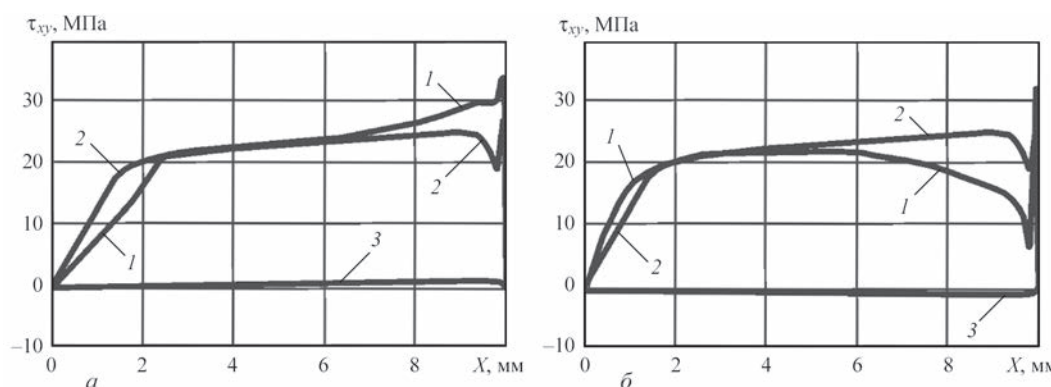


Рис. 5. Эпюры касательных напряжений по стыкам материалов 1 (а) и 2 (б) с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

(рис. 5, а) и уменьшаясь на 10 МПа со стороны материала 2 (рис. 5, б).

Соответственно изменяются и эпюры эквивалентных напряжений. Уровень этих напряжений увеличивается на величину приложенного давления 40 МПа в материале 1 (рис. 6, а) и уменьшается на 40 МПа в материале 2 (рис. 6, б). Распределение их в обоих соединяемых материалах остается близким к равномерному.

В материале «мягкой» прослойки, деформирующемся пластически, величина эквивалентных напряжений на большей части стыка остается на уровне около 40 МПа со стороны материала 2 с меньшим ТКЛР (рис. 7, б). Со стороны материала 1 с большим ТКЛР распределение неравномерное,

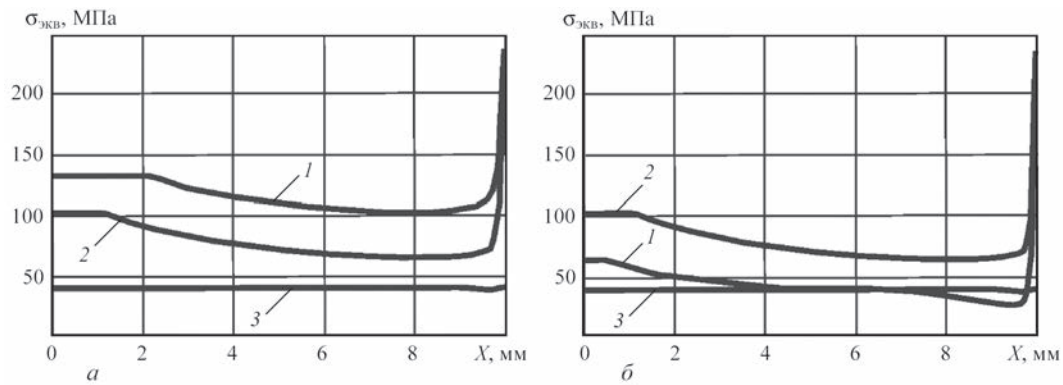


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений в соединяемых материалах 1 (а) и 2 (б) на стыке с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

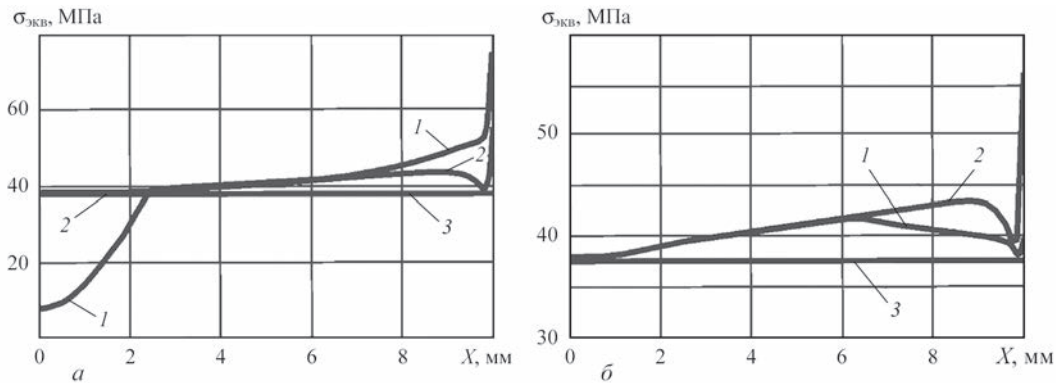


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений в материале прослойки на стыке с материалами 1 (а) и 2 (б) при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

имеется четко выраженная зона застоя вблизи оси узла, в которой эквивалентные напряжения снижаются до 10 МПа. Вблизи внешней поверхности узлов они напротив увеличиваются до 80 МПа (рис. 7, а).

Пластические деформации в материале «мягкой» прослойки распределены неравномерно, постепенно увеличиваясь от близких к 0, в зоне застоя, до 1 % и более, вблизи наружной поверхности. При этом на границе с материалом 1 в этой зоне при совместном нагружении они в несколько раз больше, чем при чисто температурном нагружении (рис. 8, а). На границе с материалом 2, напротив, распределение более равномерное, чем

при чисто температурном нагружении (рис. 8, б), но уровень их ниже.

Совместное силовое (сжатие) и температурное (охлаждение) нагружение создает более благоприятные условия для развития пластических деформаций в «мягкой» прослойке, чем чисто температурное. Со стороны материала 1 (с большим ТКЛР) растет их величина и неравномерность распределения, со стороны материала 2 (с меньшим ТКЛР) они уменьшаются, но распределение становится более равномерным. Очевидно, что при смене охлаждения нагревом материалы меняются местами, т. е. термоциклирование под давлением должно способствовать образованию

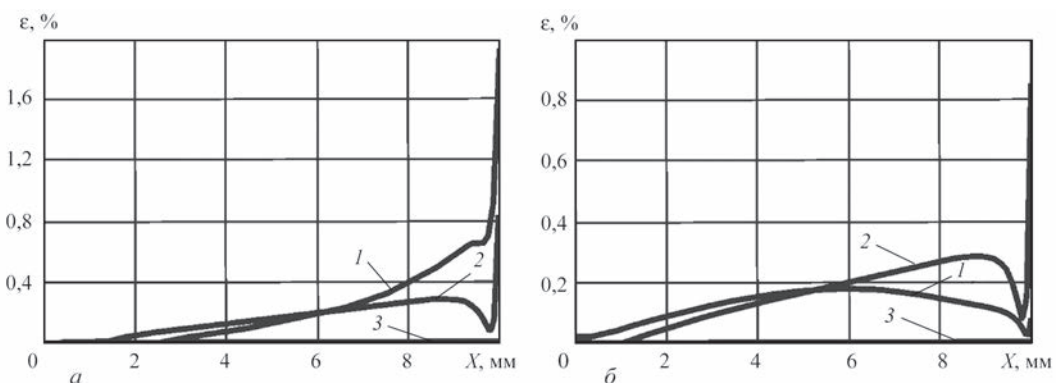


Рис. 8. Эпюры пластических деформаций в материале прослойки на стыке с материалами 1 (а) и 2 (б) при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

физического контакта и активации процессов формирования соединения.

Анализ результатов исследования НДС показал, что эффект совместного температурного и силового нагружения узлов с мягкими прослойками проявляется в некотором увеличении радиальных и окружных напряжений в обоих материалах, увеличении эквивалентных в материале 1 и прослойке и осевых в соединяемых материалах и, соответственно, уменьшении эквивалентных в материале 2, касательные напряжения при этом остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении.

Величина максимальных пластических деформаций в материале прослойки по границе раздела с основными материалами вблизи внешней поверхности при температурно-силовом нагружении значительно увеличивается и составляет около 2,3 %.

Выводы

1. При совместном нагружении сжатием и охлаждением (охлаждение под давлением) осевые напряжения растяжения в хрупких материалах с низким ТКЛР (керамика, графит и т. п.), ответственные за их разрушение при остывании после сварки (пайки) в узлах с «мягкой» прослойкой, уменьшаются на величину сжимающей нагрузки. Это означает, что при остывании под давлением в узлах с «мягкой» прослойкой уменьшается риск хрупкого разрушения.

2. Касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование металлического (физического) контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при совместном нагружении сжатием и охлаждением узлов с мягкой прослойкой заметно увеличиваются в материале с большим ТКЛР при охлаждении и материале с меньшим ТКЛР при нагреве. При этом распределение эквивалентных напряжений близко к равномерному. Таким образом, термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в узлах с «мягкой» прослойкой.

3. Пластические деформации в материале «мягкой» прослойки на границе с материалом с меньшим ТКЛР при совместном нагружении на стадии охлаждения распределены более равно-

мерно, но уровень их ниже, чем при чисто температурном нагружении. При совместном сжатии и нагреве то же происходит на границе с материалом с большим ТКЛР. Можно полагать, что сварка с термоциклированием под давлением в узлах с «мягкой» прослойкой обеспечивает более равномерное распределение пластических деформаций в прослойке.

Список литературы

1. Лобанов Л.М., Ермолаев Г.В., Квасницкий В.В. та ін. (2016) *Напруження та деформації при зварюванні і паянні. Підручник*. Лобанов Л.М. (ред.). Миколаїв, НУК.
2. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. (2017) *Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости*. Ермолаев Г.В. (ред.). Николаев, НУК.
3. Махненко В.И. (2006) *Ресурс эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Київ, Наукова думка.
4. Махненко В.И., Квасницкий В.Ф. (2006) Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке. *Автоматическая сварка*, 2, 5–10.
5. Ermolaev G.V., Martynenko V.A., Olekseenko S.V. et al. (2017) Effect of the Rigid Interlayer Thickness on the Stress-Strain State of Metal-Graphite Assemblies under Thermal Loading. *Strength of Materials*, 9, 422–428.
6. Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Chunlin Dong и др. (2018) Напряженное состояние сварных и паяных соединений узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке. *Автоматическая сварка*, 4, 3–13.
7. Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Матвиенко М.В. и др. (2019) *Напряженно-деформированное состояние сварных и паяных узлов из разнородных материалов с мягкой прослойкой при термическом нагружении*, 5, 18–24.

References

1. Lobanov, L.M., Kvasnytskyi, V.V. et al. (2016) *Stresses and strains in welding and soldering: Manual*. Ed. by L.M. Lobanov. Mukolaiv, NUK [in Ukrainian].
2. Kvasnytskyi, V.V., Yermolayev, H.V., Matviienko, M.V. (2017) *Mechanics of joints in diffusion welding, soldering and spraying of dissimilar materials under elasticity conditions*. Ed. by H.V.Yermolayev. Nikolaev, NUK [in Russian].
3. Makhnenko, V.I. (2006) *Service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Makhnenko, V.I., Kvasnitsky, V.F. (2006) Stress-strain state of assemblies of cylindrical shape in diffusion bonding. *The Paton Welding J.*, 2, 2-7.
5. Ermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain state of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, 9, 422-428.
6. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Dong Chunlin et al. (2018) Stressed state of welded and brazed assemblies from similar materials with a soft interlayer under axial loading. *The Paton Welding J.*, 4, 6-10.
7. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Matviienko, M.V. et al. (2019) Stress-strain state of welded and brazed assemblies from dissimilar materials with soft interlayer at thermal loading. *Ibid.*, 5, 13-17.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ ВУЗЛІВ ІЗ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В.В. Квасницький¹, М.В. Матвієнко², Є.А. Бутурля², В.Ф. Квасницький², Г.В. Єрмолаєв²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Досліджено напружено-деформований стан (НДС) при температурно-силовому навантаженні циліндричних вузлів з матеріалів однакової міцності, але різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення (ТКЛР), з м'яким (з меншою межою плинності, ніж у основного матеріалу) прошарком і середнім ТКЛР. Аналізувалися поля і епюри напружень і пластичних деформацій вузлів. Дослідження НДС показали, що ефект спільного температурного (охладження) і силового (стиснення) навантаження вузлів з м'якими прошарками проявляється в збільшенні радіальних і окружних напружень в обох матеріалах, збільшенні еквівалентних в матеріалі з більшим ТКЛР і прошарку і осьових в матеріалах, що з'єднуються, і, відповідно, зменшенні еквівалентних в матеріалі з меншим ТКЛР. Дотичні напруження при цьому залишаються практично такими ж, як при чисто температурному навантаженні. При зміні охолодження нагріванням матеріали міняються місцями. Величина максимальних пластичних деформацій в матеріалі прошарку по границі розділу з основними матеріалами поблизу зовнішньої поверхні при спільному температурно-силовому навантаженні досягає 2,3 %. При цьому осьові напруження розтягнення в крихких матеріалах з низьким ТКЛР (кераміка, графіт та ін.) при охолодженні в вузлах з м'яким прошарком зменшуються на величину стискаючих зовнішніх напружень, тобто ризик крихкого руйнування знижується. Бібліогр. 7, рис. 8.

Ключові слова: дифузійне зварювання, паяння, різнорідні матеріали, м'який прошарок, напруження, деформація, комп'ютерне моделювання, спільне температурне й силове навантаження

STRESS-STRAIN STATE OF WELDED AND BRAZED ASSEMBLIES OF DISSIMILAR MATERIALS WITH SOFT INTERLAYER AT TEMPERATURE-STRENGTH LOADING

V.V. Kvasnytskyi¹, M.V. Matvienko², E.A. Buturlya², V.F. Kvasnytskyi², G.V. Ermolaev²

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
37 Pobedy Ave., Kyiv, 03056. E-mail: kvas69@ukr.net

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 9 Geroev Ukrainy Ave, Mykolaiv, 54025

There was researched a stress-strain state (SSS) at temperature – strength loading of cylinder assemblies of materials of similar strength, but different by temperature coefficient of linear expansion (TCLE), with soft (with lower yield limit than in base metal) interlayer and average temperature coefficient of linear expansion. Fields and distribution diagrams of stresses and plastic deformations of assemblies were analyzed. Investigation of SSS showed that effect of mutual temperature (cooling) and strength (compression) loading of assemblies with soft interlayers appears in increase of radial and circumferential stresses in both materials, increase of equivalent ones in the material with high TCLE and the interlayer and axial ones in the joined materials, and, respectively, decrease of equivalent in the material with lower TCLE. Tangential stresses at that remain virtually the same as at purely temperature loading. In change of cooling by heating the materials change their places. The value of maximum plastic deformations in the interlayer material at interface with base material close to external surface at mutual temperature-strength loading reaches 2.3%. At that, axial tension stresses in brittle materials with low TCLE (ceramics, graphite etc.) during cooling in the assemblies with soft interlayer reduce by value of compression external stresses, i.e. risk of brittle fracture reduces. 7 Ref., 8 Fig. .

Keywords: diffusion welding, brazing, dissimilar materials, soft interlayer, stresses, deformation, computer modelling, mutual temperature and strength loading

Поступила в редакцію 08.05.2019

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ Co–Mo–Cr–Si–B

А.М. Костин, В.А. Мартыненко

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова. 54000, г. Николаев, просп. Центральный, 3.

E-mail: volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua

Целью работы являлось исследование структуры и свойств сплава системы легирования Co–Mo–Cr–Si–B применительно к использованию в качестве износостойкого материала для упрочнения контактных поверхностей рабочих лопаток судовых газотурбинных двигателей. В ходе исследований использовались методы высокотемпературного дифференциального термического анализа, электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного анализов, выполнялись замеры твердости, микротвердости фазовых составляющих, исследовалась адгезионная активность опытных сплавов методом лежачей капли. Показано, что экспериментальные составы имеют сбалансированную структуру на основе легированного молибденом и хромом твердого раствора кобальта, с упрочнением комплексными силицидами, боридами и карбидами, обладают приемлемыми механическими свойствами, имеют температуру плавления ниже температуры необратимого разупрочнения жаропрочных никелевых сплавов и характеризуются высокой адгезионной активностью, что создает благоприятные предпосылки к их использованию в судовом газотурбостроении. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, износостойкие материалы, структура, фазовый состав, твердость, температура плавления, адгезионная активность

Важной проблемой судового машиностроения является необходимость повышения эффективности, надежности и ресурса работы газотурбинных двигателей. В первую очередь эти параметры определяются интенсивностью изнашивания контактных поверхностей рабочих лопаток, которые находятся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. В этой связи, материалы и технологии упрочнения контактных поверхностей требуют разработки новых прогрессивных решений.

В настоящее время существует достаточно широкий выбор износостойких материалов, которые можно нанести на контактные поверхности с расплавлением либо без расплавления основного материала [1]. В этом случае, решающими критериями технологичности износостойких материалов являются их температура плавления и возможные способы нанесения. В условиях конкретного производства указанные критерии могут оказывать взаимоисключающее действие, что существенно осложняет выбор оптимальных составов и технологий [2].

В судовом газотурбостроении для изготовления турбинных рабочих лопаток используют жаропрочные никелевые сплавы типа ЧС88У-ВИ, ЧС70У-ВИ и др. Эти сплавы упрочняются дисперсными выделениями γ' -фазы $Ni_3(Al, Ti)$, которая имеет склонность к коагуляции в процессе контактного взаимодействия при высоких температурах, что создает благоприятные условия для увеличения интенсивности изнашивания, в том числе и за счет интенсификации процессов окис-

ления поверхностного слоя, который обедняется легирующими элементами.

Эти сплавы практически не свариваются традиционными способами сварки плавлением, поэтому температура их нагрева при нанесении износостойкого материала не должна превышать 1210...1220 °С. В противном случае наблюдается необратимое снижение прочности основного металла, вызванное деградацией γ' -фазы и образованием трещин в месте наплавки [1]. В этой связи сплав, который упрочняет контактную поверхность, должен при нанесении в жидком состоянии иметь температуру плавления не выше 1210...1220 °С. При более высокой собственной температуре плавления его соединение с основой можно выполнить, например, при помощи высокотемпературной пайки. Однако конструкция лопаток турбин не всегда позволяет использовать этот эффективный метод.

Таким образом, износостойкие материалы для судовых газовых турбин удобно классифицировать на две группы по температуре плавления: ниже и выше 1210...1220 °С.

Крайне сложной проблемой является разработка сплавов, которые относятся к первой группе, имеют необходимый уровень износостойкости при рабочих температурах (до 900 °С) и выдерживают кратковременные термические нагрузки при температурных «импульсах» до 1150 °С, что является близким к условиям растворения γ' -фазы в основном металле.

К известным сплавам первой группы относится, например, композиция КБНХЛ-2, кото-

рая имеет температуру плавления на уровне 1070...1090 °С, что не дает сплаву возможности выдерживать кратковременный нагрев до температур 1150 °С [3].

Все остальные известные сплавы на никелевой и кобальтовой основе можно отнести ко второй группе, например, сплавы ВЖЛ-2, ВКНА-2М [4], ВЗК-р [5], Stellite 12 [6], Х30Н50Ю5Т2 [7], Х25Н10В8 [4], ХТН-61 [8], ХТН-62 [9], Tribaloy Т-800, Т 400, Т 401 [10] и др. Перечисленные сплавы имеют температуру плавления выше 1220 °С, что крайне усложняет их использование при нанесении на контактные поверхности рабочих лопаток судовых газотурбинных двигателей способом наплавки.

Основным технологическим процессом, который используется для наплавки износостойких материалов на предприятии ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», является метод наплавки ацетилено-кислородным пламенем без расплавления основного металла. Для повышения адгезионной активности процесса используют дополнительное флюсование поверхности флюсом ПВ-200. Процесс наплавки сопровождается незначительным растворением основного металла на глубину до 0,1 мм, что гарантирует формирование общей переходной зоны, которая отвечает за прочность соединения. Таким образом, физико-химические и металлургические процессы, которые сопровождают процесс наплавки имеют много общего с процессом пайки. В этом случае, адгезионная активность наплавочных материалов имеет исключительно важное значение.

В этой связи, целью нашей работы являлась разработка жаропрочного материала с необходимым уровнем износостойкости при рабочих температурах (до 900 °С), с температурой плавления ниже 1210...1220 °С, который имел бы удовлетворительную адгезионную активность по отношению к судовым жаропрочным никелевым сплавам и мог выдерживать температурные и динамические условия их эксплуатации, что является актуальной проблемой.

В Национальном университете кораблестроения, совместно с ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», разработаны перспективные износостойкие жаропрочные материалы КМХ и КМХС, которые удовлетворяют перечисленным требованиям [2].

Сплавы КМХ и КМХС разработаны на основе классической системы Co–Mo–Cr–Si с дополнительным легированием бором и карбидом хрома [2]. Матрица сплавов представляет собой легированный молибденом и хромом твердый раствор кобальта (β -модификация), который хорошо выдерживает контактные и термические нагрузки до температур 1000 °С включительно. Совместное введение кремния и бора позволяет на стадии плавления снизить температуру сплавов до необходимого уровня и одновременно существенно повысить их адгезионную активность. После кристаллизации расплавов бор и кремний активно формирует равномерно распределенную, термодинамически устойчивую, высокодисперсную упрочняющую фазу, которая состоит из комплексных силицидов и боридов (CoB , Mo_2B , MoSi , CoSi), что придает сплавам необходимый уровень износостойкости. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием дифрактометра ДРОН-3. Дополнительное присутствие карбида хрома (Cr_2C_6) в сплаве КМХС несколько снижает температуру его плавления относительно сплава КМХ и стабилизирует структуру и свойства.

Опытные сплавы выплавлялись индукционной плавкой в вакууме порядка 10^{-2} Па с последующим отжигом при температуре 1100 °С в течение 1 ч. Характерная электронная структура сплавов показана на рис. 1. Оба сплава демонстрируют регулярную двухфазную структуру, плотность и однородность которой увеличивается при переходе от сплава КМХ к сплаву КМХС. Твердость сплава КМХ составляет порядка $HV_{10} - 710...715$, сплава КМХС — $HV_{10} - 735...740$. Средняя микротвердость $H_{\mu_{50}}$ фазовых составляющих сплава КМХ составляет 4771 МПа (рис. 1, область 1) и 2365 МПа (область 2), а для сплава КМХС, соответственно, 6661 МПа (область 3) и 3213 МПа (область 4).

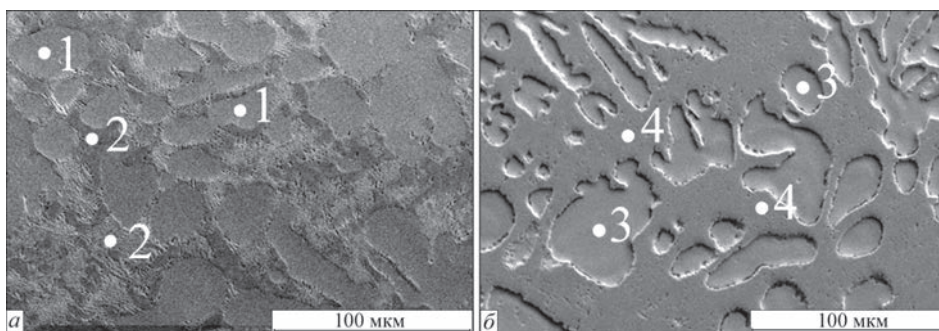


Рис. 1. Электронная структура сплавов КМХ (а) и КМХС (б) (описание 1–4 см. в тексте)

Концентрация легирующих элементов в фазовых составляющих опытных сплавов в соответствии с рис. 1

Номер области	Легирующий элемент				
	Co	Mo	Cr	Si	Ni
1	$\frac{50,78...46,03}{47,62 (48,41)}$	$\frac{33,60...26,37}{31,3 (29,99)}$	$\frac{16,60...12,25}{13,83 (14,43)}$	$\frac{7,75...6,25}{7,24 (7,00)}$	-
2	$\frac{68,25...63,73}{67,0 (65,99)}$	$\frac{8,37...4,55}{5,49 (6,46)}$	$\frac{26,11...24,98}{25,69 (25,55)}$	$\frac{2,11...1,52}{1,81 (1,82)}$	-
3	$\frac{46,06...45,33}{45,78 (45,70)}$	$\frac{32,33...29,79}{30,70 (31,01)}$	$\frac{14,01...12,22}{13,24 (13,12)}$	$\frac{8,78...8,55}{8,70 (8,67)}$	$\frac{1,81...1,45}{1,58 (1,63)}$
4	$\frac{59,06...56,41}{57,7 (57,74)}$	$\frac{9,15...11,96}{10,61 (10,56)}$	$\frac{26,38...25,67}{26,18 (26,03)}$	$\frac{2,98...2,64}{2,81 (2,81)}$	$\frac{3,06...2,35}{2,71 (2,72)}$

Примечание. Числитель — max и min значение, мас. %, знаменатель — среднее значение, мас. % (ат. %).

Распределение концентраций легирующих элементов в фазовых составляющих опытных сплавов определяли с помощью растрового электронного микроскопа-микроанализатора РЭММА 102-02. Результаты приведены в таблице. Анализ полученных результатов распределения концентрации легирующих элементов в фазовых составляющих показал, что основа сплавов на базе кобальта, до 67 мас. % для сплава КМХ и 59 мас. % для сплава КМХС, дополнительно содержит от 4 до 11 % молибдена и от 25 до 26 % хрома, с незначительным легированием кремнием до 2,5 мас. %. Упрочняющая фаза, напротив, одновременно со снижением базового уровня легирования кобальтом, до 50 мас. %, и хромом, до 16 мас. %, содер-

жит повышенную концентрацию молибдена, до 33 мас. %, и кремния, до 9 мас. %, что способствует образованию комплексно легированной упрочняющей фазы (CoB, Mo₂B, MoSi, CoSi). Основа сплавов и упрочняющие фазы содержат в различном соотношении одни и те же, входящие в сплав химические элементы, что обеспечивает их хорошую структурную совместимость и плавность изменения физических свойств при переходе через границу раздела. Концентрацию бора и углерода в работе не определяли в связи с ограниченными возможностями используемого оборудования.

Температуру плавления сплавов определяли методом высокотемпературного дифференциального термического анализа. Характерные

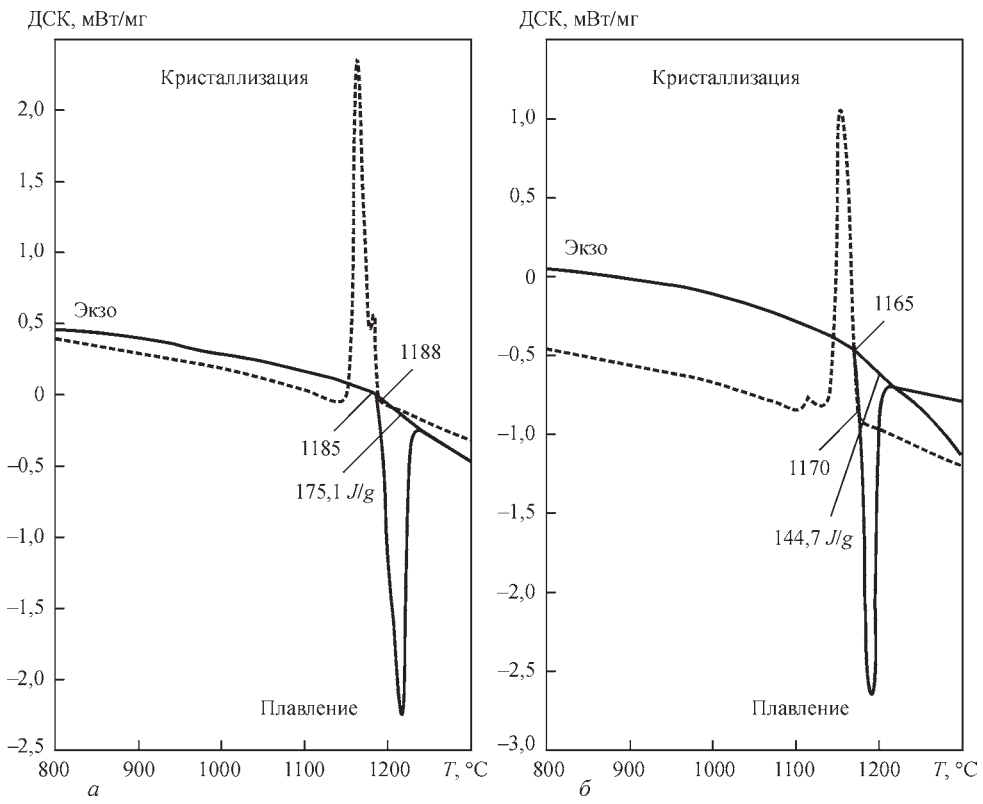


Рис. 2. Дифференциальная сканирующая калориметрия образцов сплавов КМХ (а) и КМХС (б)

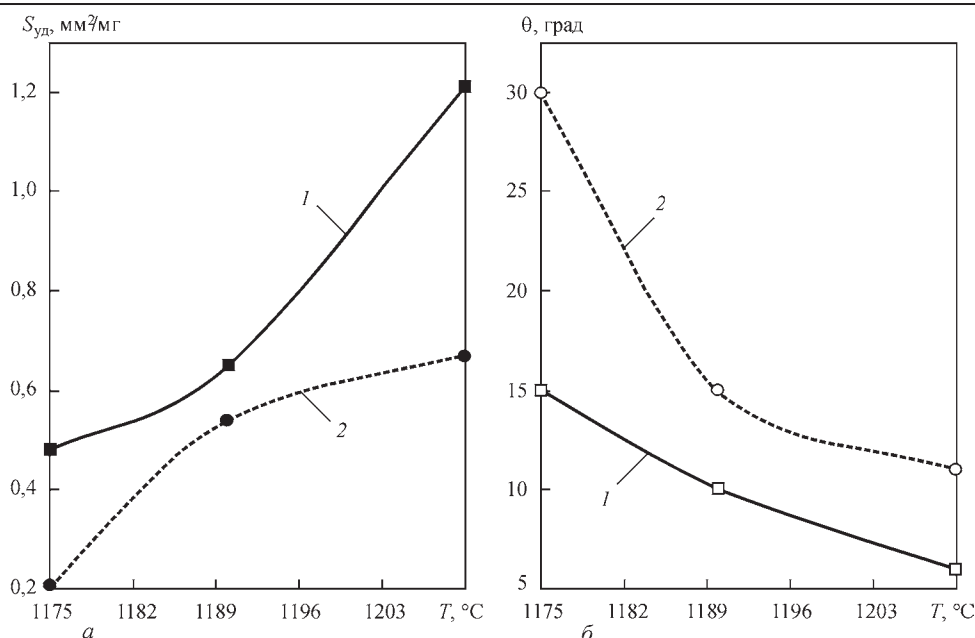


Рис. 3. Зависимость удельной площади растекания $S_{уд}$ (а) и краевых углов смачивания θ (б) сплавов КМХС (1) и КМХ (2) от температуры

термограммы плавления и кристаллизации сплавов КМХ и КМХС приведены на рис. 2. Данные термического анализа (ДСК) свидетельствуют о том, что при соблюдении оптимального соотношения в сплавах кремния и бора, сплавы КМХ и КМХС имеют только один термический эффект на кривых нагрева и охлаждения. Указанный эффект определяет температуру солидус для сплава КМХ на уровне 1185...1190 и 1165...1170 °C для сплава КМХС. При отклонении от рекомендованного соотношения стабильность фазового состава нарушается, возникает возможность протекания фазовой реакции с образованием неравновесных фаз, в результате чего на термических кривых появляются дополнительные эффекты, что приводит к повышению либо понижению температуры плавления сплавов и образованию расширенного интервала кристаллизации, что является нежелательным.

Адгезионную активность сплавов КМХ и КМХС исследовали методом лежащей капли при расплавлении в вакууме порядка 10^{-2} Па на подложке из стандартного жаропрочного никелевого

сплава ВЖ 98. Время выдержки при температурах от 1175 до 1210 °C составляло 3 мин. Замеры удельной площади растекания и краевых углов смачивания для указанных условий эксперимента показаны на рис. 3. Характерная макроструктура зоны взаимодействия сплавов КМХ и КМХС с жаропрочным сплавом ВЖ-98 показана на рис. 4.

Анализ полученных результатов показал, что при температурах нагрева 1175...1185 °C оба сплава имеют характеристики смачивания и растекания недостаточно стабильные, разброс измеряемых значений составляет более 15 %. Краевые углы смачивания превышают 12° для сплава КМХС и 20° для сплава КМХ, что является недостаточным с точки зрения технологичности.

Начиная с температуры 1190 °C, оба сплава демонстрируют высокую адгезионную активность в заданном рабочем температурном интервале наплавки (1190...1210 °C). Наиболее стабильные, установившиеся характеристики смачивания и растекания для обоих опытных сплавов фиксируются в температурном интервале 1190...1195 °C. Краевые углы смачивания находятся в пределах

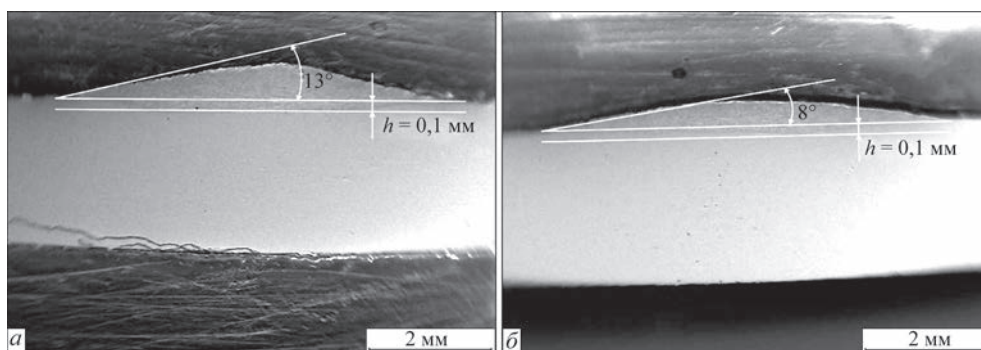


Рис. 4. Характерная макроструктура зоны взаимодействия сплавов КМХ (а) и КМХС (б) со сплавом ВЖ 98 ($T = 1210$ °C)

13...15° для сплава КМХ и 8...10° для сплава КМХС. Удельные площади растекания превышают 0,5 мм²/мг для обоих сплавов, что является более чем достаточным с точки зрения технологичности и создает благоприятные предпосылки к их промышленному использованию. Во всем температурном интервале наблюдается хорошая адгезия с материалом подложки без образования хрупких интерметаллидных составляющих. При этом глубина растворения остается минимальной вплоть до температуры 1210 °С и не превышает 0,1 мм (см. рис. 4), что гарантирует сохранение свойств наплавляемого материала и минимизирует его влияние на основной металл. Кроме того, температура плавления обоих сплавов превышает критическую температуру нагрева лопаток турбин во время возможных кратковременных рабочих забросов до 1150 °С, и не превышает предельно допустимую кратковременную температуру нагрева жаропрочных никелевых сплавов типа ЧС88У-ВИ (1210...1220°С), что является обязательным требованием к свойствам новых адгезионно-активных наплавочных материалов.

Выводы

1. Структура сплавов КМХ и КМХС представляет собой легированный молибденом и хромом твердый раствор кобальта (β-модификация) с упрочнением комплексными силицидами и боридами (CoB, Mo₂B, MoSi, CoSi), сплав КМХС дополнительно содержит карбид хрома (Cr₂C₆).

2. Температура плавления, определенная методом дифференциального термического анализа, для сплава КМХ составляет 1185...1190 °С, а для сплава КМХС — 1165...1170 °С.

3. Сплавы КМХ и КМХС характеризуются высокой адгезионной активностью по отношению к жаропрочному сплаву ВЖ 98. Установившиеся характеристики смачивания и растекания фиксируются при температурах выше 1190...1195 °С. Для сплава КМХ краевые углы смачивания составляют 13...15°, КМХС — 8...10°. Удельные площади растекания превышают 0,5 мм²/мг.

Список литературы

1. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Алешина Р.Ш. (2016) Исследование трибологических характеристик материалов, применяемых для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД. *Авиационные материалы и технологии*, S1 (43), 24–30.
2. Костин А.М., Мартыненко В.А., Малый А.Б., Квасницкий В.В. (2017) Адгезионно-активные жаропрочные износостойкие наплавочные материалы КМХ и КМХС. *Автоматическая сварка*, 1, 68–72.

3. Алтухов А.А., Гаврилов О.В. (2004) Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин. *Сварщик*, 2, 22–23.
4. Фарафонов Д.П., Базылева О.А., Рогалев А.М. (2016) Сплавы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД. *Труды ВИАМ*, 9 (45), 53–60.
5. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. (2009) Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей. *Вестник двигателестроения*, 2, 123–125.
6. Сом А.И., Ищенко В.Ю., Малый А.Б. (2004) Плазменно-порошковая наплавка стеллитом фиксаторов труб. *Сварщик*, 2, 18–19.
7. Костин А.М., Мартыненко В.А., Бутенко А.Ю. (2014) Сравнительная высокотемпературная износостойкость сплава ЧС88УВИ и стеллита Х30Н50Ю5Т2. *Збірник наук. праць НУК*, 4(454), сс. 55–59.
8. Дмитриева Г.П. и др. (2015) Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия. *Металлофизика и новейшие технологии*, 37, 7, 973–986.
9. Черепова Т.С. и др. (2014) Износостойкий сплав для защиты контактных поверхностей рабочих лопаток авиационных двигателей від окислення при високих температурах. *Наука та інновації*, 10, 4, 22–31.
10. Yao M.X., Wu J.B.C., Liu R. (2005) Microstructural characteristics and corrosion resistance in molten Zn–Al bath of Co–Mo–Cr–Si alloys. *Materials Science and Engineering A*, 408, 299–305.

References

1. Farafonov, D.P., Migunov, V.P., Alyoshina, R.Sh. (2016) Study of tribological characteristics of materials used for strengthening of flange platforms of GTE blades. *Aviats. Mater. and Technol.*, S1(43), 24–30 [in Russian].
2. Kostin, A.M., Martynenko, V.A., Maly, A.B. et al. (2017) Adhesion-active high-temperature wear-resistant surfacing consumables KMKh and KMKhS. *The Paton Welding J.*, 1, 58–61.
3. Altukhov, A.A., Gavrilov, O.V. (2004) Application of high-temperature material KBNKhL-2 for surfacing of gas turbine parts. *Svarshchik*, 2, 22–23 [in Russian].
4. Farafonov, D.P., Bazyleva, O.A., Rogalev, A.M. (2016) Alloys for strengthening of flange platforms of GTE blades. *Trudy VIAM*, 9(45), 53–60 [in Russian].
5. Pejtchev, G.I., Zamkovej, V.E., Andrejchenko, N.V. (2009) Comparative characteristics of wear-resistant alloys for strengthening of flange platforms of gas turbine engine blades. *Vestnik Dvigatelistroyeniya*, 2, 123–125 [in Russian].
6. Som, A.I., Ishchenko, V.Yu., Maly, A.B. (2004) Plasma-powder surfacing with stellite of pipe clamps. *Svarshchik*, 2, 18–19 [in Russian].
7. Kostin, A.M., Martynenko, V.A., Butenko, A.Yu. (2014) Comparative high-temperature wear-resistance of alloy ChS88UVI and stellite Kh30N50Yu5T2. *Zbirnyk Nauk. Prats NUK*, 4(454), 55–59. Mykolaiv [in Russian].
8. Dmitrieva, G.P. et al. (2015) Structure and properties of wear-resistant alloy based on cobalt with niobium carbide. *Metallrofizika i Novejshie Tekhnologii*. 37(7), 973–986 [in Russian].
9. Cherepova, T.S. et al. (2014) Wear-resistant alloy for protection of contact surfaces of aircraft engine blades from oxidation at high temperatures. *Nauka ta Innovatsii*, 10(4), 22–31 [in Ukrainian].
10. Yao, M.X., Wu, J.B.C., Liu, R. (2005) Microstructural characteristics and corrosion resistance in molten Zn–Al bath of Co–Mo–Cr–Si alloys. *Mater. Sci. & Engin. A*, 408, 299–305.

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ Co–Mo–Cr–Si–B

О.М. Костін, В.О. Мартиненко

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв, просп. Центральний, 3.

E-mail: volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua

Метою роботи було дослідження структури та властивостей сплаву системи легування Co–Mo–Cr–Si–B стосовно до використання в якості зносостійкого матеріалу для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток судових газотурбінних двигунів. В ході досліджень використовувались методи високотемпературного диференціального термічного аналізу, електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного аналізу, виконувались заміри твердості, мікротвердості фазових складових, досліджувалась адгезійна активність дослідних сплавів методом лежачої краплі. Показано, що експериментальні склади мають збалансовану структуру на основі легованого молібденом та хромом твердого розчину кобальту, із зміцненням комплексними силіцидами, боридами та карбідами, мають температуру плавлення нижче температури незворотної деградації жароміцних нікелевих сплавів та мають високу адгезійну активність, що створює сприятливі передумови до їх використання в судовому газотурбобудуванні. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, зносостійкі матеріали, структура, фазовий склад, твердість, температура плавлення, адгезійна активність

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT MATERIALS BASED ON Co-Mo-Cr-Si-B SYSTEM

A.M. Kostin, V.A. Martynenko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroev Ukrainy Ave., 54025, Mykolaiv, Ukraine.

E-mail: welding@nuos.edu.ua

The aim of the work was to study the structure and properties of the alloy of the Co-Mo-Cr-Si-B alloying system as-applied to its use as a wear-resistant material for hardening contact surfaces of working blades of ship gas turbine engines. The studies used the methods of high-temperature differential thermal analysis, electron microscopy, X-ray micro and X-ray structural analyzes, the hardness and microhardness of phase components were measured, the adhesion activity of experimental alloys was investigated using the sessile drop method. It is shown that experimental compositions have a balanced structure based on a solid solution of cobalt alloyed with molybdenum and chromium, with hardening by complex silicides, borides and carbides, possess acceptable mechanical properties, have a melting point below the temperature of irreversible softening of high-temperature nickel alloys and are characterized by high adhesive activity, which creates favorable prerequisites for their use in ship gas turbine construction. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: high-temperature nickel alloys, wear-resistant materials, structure, phase composition, hardness, melting point, adhesive activity

Поступила в редакцію 04.06.2019

Всеукраїнська конференція

ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Присвячується 60-річчю кафедри зварювального виробництва НУК

17–19 вересня 2019 р.

Миколаїв, Коблеве

Тематичні напрямки роботи конференції:

- Технології, матеріали та устаткування зварювання плавленням
- Зварювання у твердому стані
- Паяння та споріднені процеси
- Інженерія поверхні
- Нові конструкційні матеріали та покриття
- Міцність зварних та спаяних з'єднань
- Комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану зварних і спаяних з'єднань

Оргкомітет:

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

Вчений секретар оргкомітету — Костін Олександр Михайлович

тел. +38(050) 982-97-67; E-mail: koston.weld@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni_3Al С ПРОСЛОЙКАМИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ TLP-СОЕДИНЕНИЯ

В.В. Квасницкий¹, Г.Ф. Мьяльница², М.В. Матвиенко³, Е.А. Бутурля⁴, Dong Chunlin⁵

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²ГП «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект».

54018, г. Николаев, просп. Октябрьский, 42а

³Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова. 73022, г. Херсон, просп. Ушакова, 44

⁴Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова.

54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9.

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

Сварка плавлением литейных жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием упрочняющих дисперсных фаз является проблематичной. Еще более острой является проблема сварки материалов на основе интерметаллидов. Поэтому для соединения таких материалов наиболее широко применяют различные способы пайки. За границей наиболее часто используют термин TLP-соединение (Transient Liquid Phase Bonding). Учитывая, что припои имеют более низкую температуру плавления, чем основной металл, для повышения рабочей температуры TLP-соединений в процессе их формирования концентрация элементов депрессантов (снижающие температуру плавления припоя) в шве должна сводиться к минимуму. Депрессанты жаропрочных припоев разделяют на несколько групп. В работе исследовали взаимодействие сплава на основе Ni_3Al с припоями, содержащими кремний, бор, цирконий и гафний. По результатам исследований разработан припой SBM-3 системы Ni–Cr–Co–Al–Ti–Ta–Re–W–Mo–Hf–B. Библиогр. 19, рис. 7.

Ключевые слова: пайка, никелевые сплавы, упрочняющая фаза, депрессанты, разработка припоя, температура плавления

Эффективность газовых турбин существенно зависит от температуры рабочего газа. Поэтому для изготовления направляющих и рабочих лопаток разрабатываются материалы с более высокой жаропрочностью. Такими являются новые сплавы на основе интерметаллидов, в частности, на основе интерметаллида Ni_3Al . Перспективными способами их соединения являются сварка в твердом состоянии, например, сварка трением, диффузионная сварка в вакууме с расплавляющимися или нерасплавляющимися прослойками или пайка [1, 2]. Пайка является более универсальным способом соединения, но ее главной проблемой является обеспечение прочностных свойств паяных соединений, близких к свойствам основного металла. Хорошие результаты обеспечивает технология TLP-соединения.

Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al является конструкционным материалом газовых турбин нового поколения [3, 4]. Фаза Ni_3Al имеет гранцентрированную кубическую решетку, в которой ограниченно растворимы хром, молибден и вольфрам, причем растворимость элементов в этом ряду уменьшается. Металлы титан, тантал и ниобий растворяются в γ' -фазе, замещая алюминий и упрочняя

ее. Высокую растворимость в никеле имеет кобальт, замещая никель в γ -твердом растворе. Упорядоченная структура γ' -фазы обеспечивает ее высокую стабильность и работу сплава до 1200 °С. Интерметаллид, легированный небольшими количествами тантала и хрома, имеет высокую стойкость в окислительной среде при температурах до 1100...1200 °С.

При соединении различных конструкций на основе интерметаллида Ni_3Al , работающих при высоких температурах и повышающих эффективность газовых турбин, необходимы технологии соединения деталей как в однородном, так и в разнородном сочетаниях с другими жаропрочными сплавами. Решение такой проблемы является безусловно актуальным.

Постановка проблемы. Авиационное материаловедение успешно развивается и интерметаллидные материалы на основе Ni_3Al известны с конца прошлого века [5, 6]. Исследования способов их соединения начали активно проводиться только в последнее время, причем впервые в работах рассматривалась возможность применения существующих припоев для пайки жаропрочных никелевых сплавов. Эти припои можно разделить на три группы [2]:

1) легированные припои на основе никеля с использованием в качестве депрессантов кремния и бора, которые в большинстве случаев вводятся совместно для снижения температуры пайки и концентрации каждого из них;

2) припои на основе легированного никеля с применением в качестве депрессантов элементов IV и V групп таблицы Периодической системы химических элементов;

3) припои системы Ni–Pd.

Наиболее широко в Украине и за рубежом известны припои первой группы, например, ВПр11, ВПр11-40Н, ВNi1, ВNi2, ВNi5, ВПр42, НС12, НС12А, СТЕМЕТ 1301, СТЕМЕТ 1311. Сложнолегированными припоями, содержащими кремний и бор, являются ВПр24, ВПр27 и другие.

В работах [7–9] исследованы сложнолегированные припои ВПр36, ВПр37 и ВПр44 для пайки высокожаропрочных никелевых сплавов ЖС32, ЖС36 и сплава ЭП975 со сплавом ВКНА-4У на основе интерметаллида Ni_3Al . Полученные результаты описаны мало, но приведенные системы припоев показывают возможность повышения жаропрочности паяных соединений сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al .

Цель работы — исследование взаимодействия сплава на основе интерметаллида Ni_3Al с припоями различных систем и повышение прочности соединений, полученных по TLP-Bonding технологии, до уровня 70...80 % прочности основного металла.

Материалы и методика исследований. Для проведения исследований выплавлен экспериментальный высоколегированный сплав на основе интерметаллида Ni_3Al со следующим содержанием основных элементов (мас. %): 0,085 С; 6,6 Cr; 11,63 Со; 4,67 W; 1,49 Мо; 5,61 Si; 7,44 Та; 1,6 Нf; 2,0 Ti; Ni — остальное. Микроструктура сплава показана на рис. 1. В исходном термообработанном со-

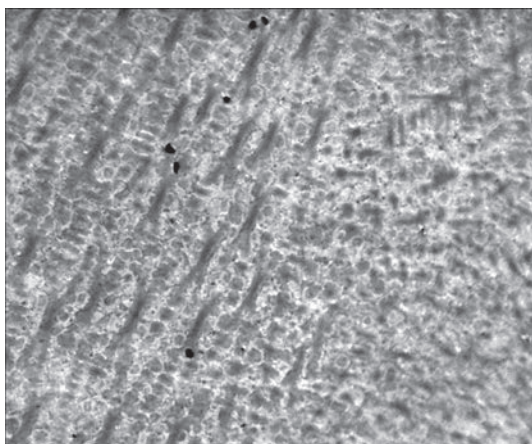


Рис. 1. Микроструктура ($\times 45$) выплавленного сплава на основе Ni_3Al (увел. в 1,5 раза)

стоянии сплаву присуща однородная структура $\gamma + \gamma'$ с высокой долей γ' -фазы (68...72 об. %).

Размеры и форма образцов для проведения исследований и механических испытаний, определялись согласно принятым стандартным методикам (ISO 783–89) и данным, приведенным в работе [10].

Основу исследованных припоев составлял никель, легированный теми же элементами, что и основной материал системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–Ta–W–Mo. Для этого использовали имеющиеся компьютерные программы расчета содержания фаз и критических температур. Для снижения температуры плавления в сплав вводили в качестве депрессанта бор и кремний вместе или раздельно и аналогично цирконий и гафний.

Качество смачивания жаропрочного сплава оценивали по краевому углу смачивания при различных температурах. Растекание припоя определяли по удельной площади растекания. После этого образцы разрезали по центру капли припоя и по фотографии макрошлифа определяли краевой угол смачивания.

Для исследования затекания припоя в зазор использовали клиновидные образцы размером $20 \times 12 \times 3$ мм нижний и $20 \times 6 \times 3$ мм верхний, которые выставляли один на другой по длине с нулевым зазором с одной стороны и зазором 0,3 или 0,6 мм с другой.

Формирование соединений стыковых швов исследовали на цилиндрических образцах диаметром 13 мм и длиной 35 мм.

Структурные исследования проводили с помощью оптической металлографии, растровой электронной микроскопии. Химический состав определяли локальным рентгеноспектральным микроанализом по отдельным точкам и по площади. Структуру жаропрочных сплавов выявляли при химическом травлении в растворе, состоящем из 10 г хлорного железа, 30 мл соляной кислоты и 120 мл спирта, или реактиве Марбле: 100 мл HCl, 20 г $CuSO_4$, 100 мл H_2O с добавлением H_2SO_4 (0...20 мл). Для дифференциации карбидов и σ -фазы применяли реактив Мураками: 10 г красной кровяной соли, 10 г едкого калия или 7 г едкого натрия.

Дифференциальный термический анализ проводили на термоанализаторе ВДТА-8М с одновременным измерением температуры исследуемого образца и эталона при нагреве и охлаждении в печи электросопротивления. Скорость нагрева и охлаждения автоматически поддерживалась постоянной.

Исследования по определению температур плавления и кристаллизации проводили в атмос-

фере высокочистого гелия. Скорость нагрева и охлаждения составляла $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Образцы массой 1 г помещались в тигли из оксида иттрия Y_2O_3 . Температуры фазовых превращений определяли с использованием градуировочной кривой, построенной по точкам плавления Al , Cu , Fe и Pt . Кривые охлаждения использовали для качественного контроля количества фазовых переходов и для определения температур начала кристаллизации. Погрешность результатов составляла $\pm 7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определение механических характеристик проводили при статических кратковременных и длительных испытаниях на растяжение цилиндрических образцов.

На первом этапе, применительно к выплавленному сплаву на основе Ni_3Al , по результатам анализа источников [7–9] для исследований и корректировки состава выбран припой ВПр36. Корректировка состава припоя ВПр36 с целью снижения температуры пайки проводилась также авторами работ [11, 12], которые для этого в припой вводили кремний, используя припой НС12, содержащий $12\text{ }\%$ Si . Для сплава на основе Ni_3Al нужна более высокая температура плавления припоя, а для повышения жаропрочности соединений содержание кремния в основном металле жестко ограничено. Поэтому в наших исследованиях кремний не использовался. Кроме того, в припое необходимо было использовать легирование по аналогии с жаропрочными сплавами нового поколения, что учтено в данной работе.

При выборе депрессантов учитывали исследования, изложенные в работе [13], в которой была установлена перспективность применения в припоях в качестве депрессантов циркония и гафния.

Поэтому на втором этапе исследований в припоях для пайки интерметаллидного сплава использовали в качестве депрессантов цирконий и гафний. Эти элементы образуют между собой неограниченные растворы и замещают один другого в интерметаллидах никеля в любых соотношениях. Температура пайки припоями с гафнием составляла $1225\text{...}1230\text{ }^{\circ}\text{C}$, а припоями с цирконием $1200\text{...}1210\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Растекание припоя с цирконием по интерметаллидному сплаву показано на рис. 2, из которого видно, что площадь растекания припоя состоит из центральной зоны припоя в точках 1 и 2, периферийной зоны в точке 3 и ореола капли в точке 4. Химический состав металла в этих зонах существенно отличается. В центральной зоне состав изменяется по высоте капли, но содержит элементы основы припоя. Дальше в периферийной зоне и в ореоле капли растет концентрация циркония и появляется эвтектический слой, который повто-

ряет микронеровности поверхности и обволакивает отдельные частицы припоя. При введении $2,5\text{ }\%$ Zr на отдельных участках поверхности его концентрация возрастает до $11\text{...}12\text{ мас. }\%$. При введении в припой $5,0\text{ }\%$ Zr на отдельных участках концентрация циркония достигает $21\text{ }\%$, резко увеличиваются концентрации ниобия (до $30\text{ }\%$) и вольфрама (до $14\text{ }\%$), снижается концентрация никеля ($21\text{...}25\text{ }\%$), алюминия и титана, что свидетельствует о формировании интерметаллидов.

Аналогом циркония является гафний, который, в отличие от циркония, имеет низкую диффузионную подвижность атомов. Оба элемента имеют низкую растворимость в никеле и аналогичные диаграммы состояния с никелем. Низкая растворимость гафния и циркония в никеле с образованием эвтектики расширяют температурный интервал плавления и кристаллизации припоев, что плохо для сплавов на основе Ni_3Al , предназначенных для работы при температурах до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Припои с цирконием и гафнием имеют хорошее смачивание сплава на основе Ni_3Al , при вакууме 10^{-3} Па , а также неравномерное распределение в паяном шве. Краевые углы смачивания в зависи-

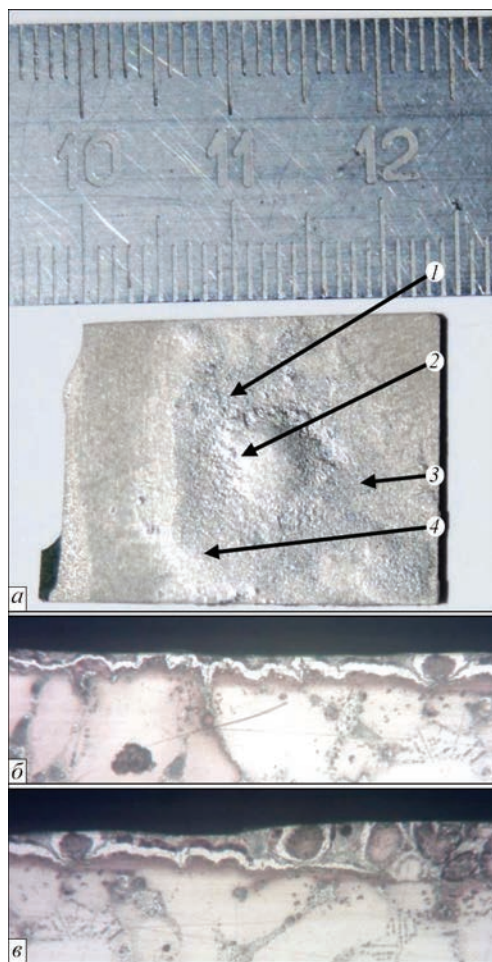


Рис. 2. Общий вид растекшейся капли (а) и микроструктура приповерхностного слоя сплава в ореоле капли (б) и ближе к ее центру (в) припоя с цирконием (описание 1–4 см. в тексте)

мости от состава припоя и температуры изменяются в пределах от 13 до 5 градусов. Учитывая высокое сродство циркония и гафния к кислороду при пайке необходимо жестко контролировать давление в рабочей вакуумной камере (не более $3 \cdot 10^{-3}$ Па) и величину натекания, не более $3 \cdot 10^{-5}$ Па·м²·с⁻¹.

Припой с цирконием использовали также для пайки сплава ЖС6У в работе [14]. Исследовали два припоя системы Ni–Co–Cr–Ti–Nb–Al–(Me)–Zr, содержащие 1 и 2 % Zr. Их температуры солидуса 1101 и ликвидуса 1231 °С с 2 % Zr и соответственно 1141 и 1259 °С с 1 % Zr. Рекомендован для применения припой с 1 % Zr. По температуре пайки припой не подходит для пайки сплава на основе Ni₃Al. Припой с цирконием и гафнием хорошо изучены в работах [15–18] применительно к жаропрочным никелевым сплавам с температурой пайки до 1210 °С. Повышение температуры пайки может привести к деградации структуры основного металла.

На третьем этапе исследовали припой с применением в качестве депрессанта бора. Эти припои наиболее изучены и распространены в промышленности. При разработке припоя решались две задачи: выбор основы припоя и определение необходимой концентрации бора для обеспечения необходимых температуры ликвидуса и солидуса. Припои с бором традиционно имеют высокую технологичность.

При выборе основы припоя использовали общие положения разработки жаропрочных сплавов, исходя из влияния каждого из легирующих элементов, в том числе сплавов нового поколения, на механические свойства, образование упрочняющих фаз, а также хрупких фаз, жаростойкость, температур ликвидуса, солидуса, сольвуса, температуры выделения и количество фаз, их состава и другие. Одновременно рассматривали авиационные материалы, в частности, интерметаллид Ni₃Al, и сплавы для морских газовых турбин, работающие при более низких температурах, но в условиях высокотемпературной солевой коррозии (ВСК). Условия работы морских турбин существенно влияют на содержание хрома в сплавах, снижая их жаропрочность.

Найденные пути повышения жаропрочности и стойкости против ВСК позволили создать сплавы для морских турбин нового поколения с повышением их рабочей температуры на 50...60 °С [19]. Соответственно необходимо повышать и жаропрочность соединений, а также температуру пайки. Для этого необходимо создать новые припои, используя те же принципы легирования, которые использованы при создании сплавов.

Многие другие проблемы являются общими для авиационного и судового газотурбостроения, что позволяет использовать одинаковые расчетные методы и компьютерные программы. При выборе основы припоев использовались также расчёты, но при одинаковых системах основы припоев концентрации ряда элементов в них существенно отличаются. Например, стойкость сплавов против образования σ -фазы зависит от группы элементов, в том числе от хрома. Поэтому при высоком содержании хрома, концентрации других элементов, упрочняющих твёрдый раствор, необходимо уменьшать при одном и том же числе электронных вакансий, для чего легировался сплав элементами, являющимися наиболее эффективными упрочнителями. Такое легирование используют в жаропрочных сплавах нового поколения.

Для расчета второй задачи (выбора концентрации бора) необходимо иметь регрессионное уравнение влияния бора на температуру ликвидуса и солидуса основы припоя. Статистических данных для этого пока мало. Поэтому задачу решали экспериментально. Было выплавлено несколько сплавов (основы припоя), к которым добавляли бор при трех различных концентрациях. Полученные образцы подвергали ВДТА, исследованиям на смачивание и растекание припоя. На рис. 3, а приведена термограмма одного из выплавленных сплавов (основы припоя), а на рис. 3, б — результаты ВДТА после добавления бора.

Растекание одного из припоев по сплаву на основе Ni₃Al показано на рис. 4.

В зависимости от основы припоя и концентрации бора краевые углы смачивания и удельные площади растекания изменяются. Главную роль играет температура пайки. Все выплавленные припои хорошо смачивают сплав, но температурный интервал применения припоя определяли по краевому углу смачивания не более 10°.

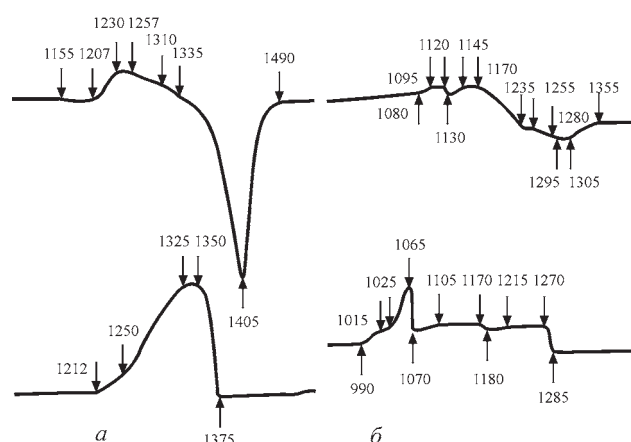


Рис. 3. Кривые ВДТА для основы припоя (а) и после введения бора (б)

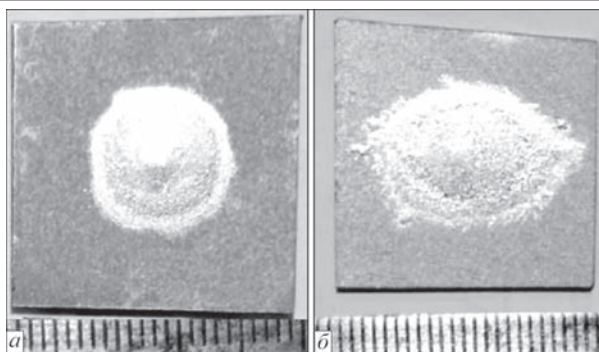


Рис. 4. Растекание навески 100 мг порошка припоя SBM-3 по сплаву Ni_3Al при температурах 1250 (а) и 1265 °С (б)

Оптимальным является угол 3...5°. Удельная площадь растекания при температуре исследований 1250...1265 °С составила 1,7...2,0 мм²/мг.

Формирование паяного соединения оценивали по структуре шва, его химическому составу (по площади и пофазно), а также по величине максимальных и минимальных зазоров, которые заполняются без дефектов при температуре пайки. Наиболее точно это можно определить при пайке клиновидных образцов с изменением зазора от нуля до 0,6 мм. На таких образцах определяли также глубину растворения основного металла. Независимо от химического состава припоя с повышением температуры пайки глубина растворения основного металла увеличивается и тем больше, чем шире зазор и выше концентрация бора. Изменение концентрации бора изменяет также количество и состав фаз: γ , γ' , M_xC_y , M_3B . При анализе по площадям состав сплава изменяется мало. Совместная объемная доля карбидной и боридной фаз возрастает уже при увеличении концентрации бора от 1,0 до 1,2 мас. %, а содержание хрома, молибдена и вольфрама уменьшается почти вдвое.

Микроструктура металла шва, паяного припоём, содержащим 2,5 % Re, показана на рис. 5.

По результатам анализа структуры и химического состава выплавленных образцов разработан припой SBM-3, микроструктура соединения которого показана на рис. 6.

Анализируя результаты исследований фаз и химического состава соединения сплава на осно-

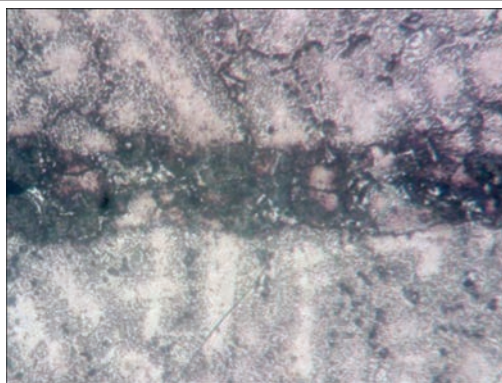


Рис. 6. Микроструктура (×250) соединения сплава на основе интерметаллида Ni_3Al при пайке с постоянным зазором 0,08 мм припоём SBM-3

ве Ni_3Al , полученных методом TLP-соединения с припоём SBM-3, следует отметить, что матрица припоя имеет состав, близкий к составу основного металла, плюс отдельные элементы, которых нет в основном металле, но они введены в припой. Структурное строение металла шва и основного металла близки. Структура соединения не имеет сплошных эвтектических прослоек, карбидных, боридных или карбоборидных выделений.

Паяные соединения проходят термическую обработку, включающую высокотемпературную гомогенизацию и ступенчатое охлаждение. Режим термической обработки сплава включает нагрев до 1180 °С с выдержкой 2 ч → нагрев до 1265 °С с выдержкой 2 ч и охлаждение на воздухе, нагрев до 1050 °С с выдержкой 4 ч и охлаждение на воздухе. После термической обработки боридная эвтектика отсутствует за счет образования высокодисперсных боридов и карбоборидов, для которых характерно наличие активных образователей карбидов и боридов, которые четко определяются на спектрах при локальном рентгено-спектральном анализе. Во всех таких включениях низкое содержание алюминия.

Механические испытания соединений проведены при температурах эксплуатации с определением кратковременной и длительной прочности на базе 50 и 100 ч испытаний. Испытание на кратковременную прочность поликристаллическо-

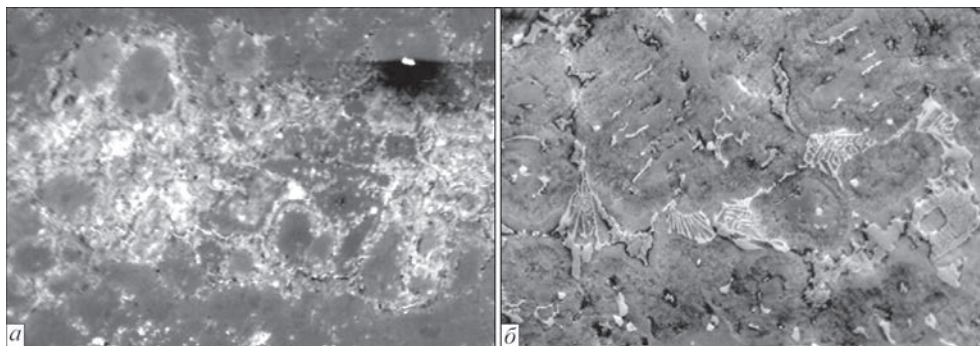


Рис. 5. Микроструктура металла шва при пайке клиновидного образца с зазором 361 (а) и 297 мкм (б)

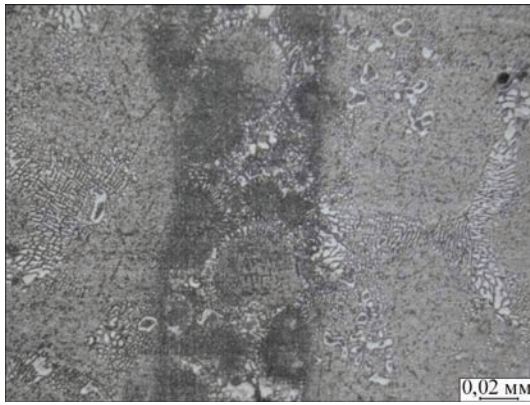


Рис. 7. Микроструктура соединения сплава на основе Ni_3Al с припоем SBM-3

го основного металла при 900°C показали среднее значение: $\sigma_b = 830$ МПа, $\sigma_{0,2} = 720$ МПа; при 1000°C — $\sigma_b = 530$ МПа и $\sigma_{0,2} = 460$ МПа. Прочность соединений находилась на этом же уровне. Разрушение образца происходило по основному металлу. Микроструктура соединения в зоне стыка показана на рис. 7.

Длительная прочность соединений сплава на основе Ni_3Al при температуре 900°C на базе испытаний 100 ч составила $\sigma_{100}^{900} = 280$ МПа, что составляет 81,9 % прочности основного металла, на базе 50 ч $\sigma_{50}^{900} = 320$ МПа, что составляет 85,6 % прочности основного металла.

На базе выполненных исследований разработан также припой SBM-3М для пайки жаропрочных никелевых сплавов морских газовых турбин, существенным отличием которого от припоя SBM-3 является более высокое содержание хрома. Оба припоя разработаны на основе системы $\text{Ni-Co-Cr-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-B}$.

Выводы

1. В работе предложены новые подходы к выбору легирующих элементов основы припоев, обеспечивающих твердорастворное и дисперсионное упрочнение. В частности, введение в припой тантала и рения, которые используются для легирования жаропрочных сплавов турбин нового поколения и имеют более высокую эффективность в повышении жаростойкости и жаропрочности и снижении концентрации молибдена и вольфрама или их замене.

2. При температуре пайки 1250°C краевые углы смачивания жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ni_3Al припоем SBM-3 не превышают 7° , по химическому составу и структуре металл шва близок к основному металлу, кратковременная прочность при 900°C находится на уровне основного металла, а длительная прочность TLP-соединений на базе 50 и 100 ч испытаний не ниже 80 % основного металла.

3. Результаты работы показали, что созданный припой SBM-3 и технология TLP-соединения соответствуют цели исследований.

4. По итогам работы для опытно-промышленного использования выплавлены припой системы $\text{Ni-Co-Cr-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-B}$ с Hf и без него.

Список литературы

1. Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Єрмолаєв Г.В. (2017) *Спеціальні способи зварювання*. Підручник. Патон Б.Є. (ред.). Миколаїв, НУК.
2. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. и др. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Хоруннов В.Ф., Квасницький В.Ф. (ред.). Миколаїв, НУК.
3. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **5**, 24–30.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. (2011) Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*, **9**, 13–19.
5. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Качанов Е.Б., Шалин Р.Е. (1994) Високотемпературные конструкционные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al . *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. Научно-технический сборник*. Москва, ВИАМ.
6. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. (1999) Сплавы на основе алюминидов никеля. *Металловедение и терм. обработка металлов*, **1**, 32–34.
7. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2012) Особенности пайки монокристаллических отливок и сплава ЖС32. *Сварочное производство*, **5**, 24–30.
8. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2010) Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36. *Технология машиностроения*, **5**, 21–35.
9. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Тимофеева О.Б. (2013) Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП 975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВК-НА-4У применительно к конструкции «Блиск». *Сварочное производство*, **7**, 19–25.
10. Xiong Yue, Fengmei Liu, Hexing Chen et. al. (2018) Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni_3Al based Superalloy IC10. *ICCEMS 2018, MATEC Web of Conferences* 206, 03004.
11. Малащенко И.С., Куренкова В.В., Белявин А.Ф., Трохимченко В.В. (2006) Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ-12У, полученных с использованием борсодержащих припоев с присадкой кремния. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.
12. Малащенко И.С., Мазурак В.Е., Кушнарева Т.Н. и др. (2014) Пайка в вакууме литого никелевого сплава ЖС6У композиционными припоями на основе ВПр36. Ч. 1. *Современная электрометаллургия*, **4**, 49–58.
13. Квасницький В.Ф., Костин А.М., Квасницький В.В. (2002) Влияние элементов-депрессантов на свойства никелевых припоев и жаропрочных сплавов. *Адгезия расплавов и пайка материалов*, **3**, 129–139.
14. Максимова С.В., Воронов В.В., Ковальчук П.В. (2017) Припой без бора и кремния для пайки жаропрочного никелевого сплава. *The Paton Welding J.*, **8**, 15–21.
15. Kvasnitskiy V.V., Timchenko V.L., Ivanchenko V.G., Khorunov V.F. (1998) The investigation of Ni (Nialloy)-Hf-Cr system for heat-proof nickel alloy brazing. *DVS-Berichte: Band 192. Dusseldorf: DVS – VERL*, ss. 262–264.
16. Kvasnitskiy V.V., Timchenko V.L., Ivanchenko V.G., Khorunov V.F. (1998) Die Untersuchung des System Ni(Niliq)-Hf—Zr- für das Loten warmfester Nickellegierungen. *Ibid*, ss. 257–259.
17. Kvasnitskiy V.V. (1998) Composite filler metal brazing of heat-proof nickel alloys. *Ibid*, ss. 260–262.

18. Khorunov V.F., Ivanchenko V.G., Kvasnitskiy V.V. (1998) Investigation des system Ni–Cr–Zr and Ni–Cr–Hf alloys. *Ibid*, ss. 59–61.
 19. М'яльниця Г.П., Максютя І.І., Квасницька Ю.Г., Михнян О.В. (2013) Вибір легуючого комплексу нового корозійно-стійкого сплаву для соплових лопаток ГТД. *Металознавство та обробка металів*, **2**, 29–34.
- References**
1. Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Yu., Yermolayev H.V. (2017) *Special methods of welding: Manual*. Ed. by B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 2. Yermolayev H.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov, V.F. Kvasnytskyi. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 3. Kablov, E.N. (2012) Strategic tendencies in development of materials and technologies of their processing for period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **5**, 24-30 [in Russian].
 4. Kablov, E.N., Ospennikova, O.G., Bazyleva, O.A. (2011) Materials for high-loaded parts of gas turbine engines. *Vestnik MGTU. Seriya Mashinostroenie*, **9**, 13-19 [in Russian].
 5. Buntushkin, V.P., Kablov, E.N., Kachanov, E.B., Shalin, R.E. (1994) High-temperature structural materials based on intermetallic Ni₃Al. In: *Aircraft materials at the turn of the XX-XXI centuries: Sci.-Techn. Transact. Moscow*, VIAM [in Russian].
 6. Buntushkin, V.P., Kablov, E.N., Bazyleva, O.A., Morozova, G.I. (1999) Alloys based on nickel aluminide. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 32-34 [in Russian].
 7. Lukin, V.I., Ryl'nikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N. (2012) Peculiarities of brazing single-crystal castings and alloy ZhS₃₂. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 24-30 [in Russian].
 8. Lukin, V.I., Ryl'nikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N. (2010) Peculiarities of producing of ZhS36 alloy brazed joint. *Tekhnol. Mashinostroeniya*, **5**, 21-35 [in Russian].
 9. Lukin, V.I., Ryl'nikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N., Timofeeva, O.B. (2013) Peculiarities of diffusion brazing technology of high-temperature alloy EP 975 and cast single-crystal intermetallic alloy VKNA-4U applying to structure «Blisk». *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 19-25 [in Russian].
 10. Xiong Yue, Fengmei Liu, Hexing Chen, et al. (2018) Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10. *ICCEMS 2018, MATEC Web of Conferences* **206**, 03004.
 11. Malashenko, I.S., Kurenkova, V.V., Belyavin, A.F., Trokhimchenko, V.V. (2006) Short-term strength and microstructure of brazed joints of alloy VJL12U produced using boron-containing brazing alloy with addition of silicon. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 23-38 [in Russian].
 12. Malashenko, I.S., Mazurak, V.E., Kushnareva, T.N. et al. (2014) Vacuum brazing of cast nickel alloy ZhS6U with composite brazing alloys on VPr-36 base. Pt 1. *Ibid.*, **4**, 49-58 [in Russian].
 13. Kvasnytsky, V.F., Kostin, A.M., Kvasnitsky, V.V. (2002) Influence of elements-depressants on properties of nickel brazing filler metals and high-temperature alloys. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, **5**, 129-139 [in Russian].
 14. Maksymova, S.V., Voronov, V.V., Kovalchuk, P.V. (2017) Brazing filler metal without boron and silicon for brazing of heat-resistant nickel alloy. *The Paton Welding J.*, **8**, 12-17.
 15. Kvasnitskiy, V.V., Timchenko, V.L., Ivanchenko, V.G., Khorunov, V.F. (1998) The investigation of Ni(Nialloy)-Hf-Cr system for heat-proof nickel alloy brazing. *DVS-Berichte: Band 192, Duesseldorf: DVS – VERL*, 262-264.
 16. Kvasnitskiy, V.V., Timchenko, V.L., Ivanchenko, V.G., Khorunov, V.F. (1998) Die Untersuchung des System Ni(Niliq)-Hf-Zr- fuer das Loten warmfester Nickellegierungen. *Ibid.*, 257-259 [in German].
 17. Kvasnitskiy, V.V. (1998) Composite filler metal brazing of heat-proof nickel alloys. *Ibid.*, 260-262.
 18. Khorunov, V.F., Ivanchenko, V.G., Kvasnitskiy, V.V. (1998) Investigation of systems Ni-Cr and Ni-Cr-Hf alloys. *Ibid*, 59-61.
 19. Myalnytsa, G.P., Maksyuta, I.I., Kvasnitska, Yu.G., Mykhnyan, O.V. (2013) Selection of alloying complex of new corrosion-resistant alloy for nozzle blades of GTE. *Metaloznavstro ta Obrobka Metaliv*, **2**, 29-34 [in Ukrainian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СПЛАВА НА ОСНОВІ Ni₃Al З ПРОШАРКАМИ РІЗНИХ СИСТЕМ ЛЕГУВАННЯ ДЛЯ TLP-З'ЄДНАННЯ

В.В. Квасницький¹, Г.П. М'яльниця², М.В. Матвієнко³, Е.А. Бутурля⁴, Dong Chunlin⁵

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

²ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект».
54018, м. Миколаїв, просп. Октябрський, 42а

³Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.
73022, м. Херсон, просп. Ушакова, 44

⁴Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9.

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,
Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

Зварювання плавленням ливарних жароміцних нікелевих сплавів з високим вмістом зміцнюючих дисперсних фаз є проблематичним. Ще більш гострою є проблема зварювання матеріалів на основі інтерметалідів. Тому для з'єднання таких матеріалів найбільш широко застосовують різні способи пайки. За кордоном найбільш часто використовують термін TLP-з'єднання (Transient Liquid Phase Bonding). З огляду на те, що припої мають більш низьку температуру плавлення, ніж основний метал, для підвищення робочої температури концентрація елементів депресантів (що знижують температуру плавлення припою) у шві повинна зводитися до мінімуму. Депресанти жароміцних припоїв поділяють на кілька груп. В роботі досліджували взаємодію сплаву на основі Ni₃Al з припоями, що містять кремній, бор, цирконій та гафній. За результатами досліджень розроблено припой SBM-3 системи Ni-Cr-Co-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-Hf-B. Бібліогр. 19, рис. 7.

Ключові слова: пайка, нікелеві сплави, упрочняющая фаза, депресанти, розробка припою, температура плавлення

INVESTIGATION OF INTERACTION OF Ni₃Al-BASED ALLOY WITH INTERLAYERS OF DIFFERENT ALLOYING SYSTEMS FOR TLP-BONDING

V.V. Kvasnytskyi¹, H.F. Myalnitsa², M.V. Matvienko³, E.A. Buturlya⁴, Dong Chunlin⁵

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37 Pobedy ave., Kyiv, 03056. E-mail:kvas69@ukr.net

²SE «Scientific-production gas turbine construction complex «Zorya»-«Mashproekt», 42a Oktyabrskii Ave, Mykolaiv, 54018

³Kherson Branch of National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, 44 Ushakova Ave, Kherson, 73022

⁴Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Geroev Ukraine Ave, Mykolaiv, 54025

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,

Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

Fusion welding of cast high-temperature nickel alloys with high content of strengthening disperse phases is problematic. Even more serious problem is welding of intermetallic-based materials. Therefore, different methods of brazing are widely used for such materials joining. TLP-bonding (Transient Liquid Phase Bonding) is a term which has the most often application abroad. Considering that brazing filler materials have lower melting temperature than base metal the concentration of depressants (reducing brazing filler metal melting temperature) in brazed weld shall be reduced to the minimum in order to increase working temperature of brazed joints in brazing process. The depressants of high-temperature brazing filler metals are divided on several groups. Interaction of Ni₃Al-based alloy with brazing filler metals containing boron, zirconium and hafnium was investigated in the work. SBM-3 brazing filler metal of Ni-Cr-Co-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-Hf-B system was developed based on research results. 19 Ref., 7 Fig.

Keywords: brazing, nickel alloys, strengthening phase, depressants, brazing filler metal development, melting temperature

Поступила в редакцию 14.06.2019

Крупнейшая сварочная выставка в азиатском регионе

С 25 по 28 июня 2019 г. в Шанхайском новом международном выставочном центре была проведена BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING, крупнейшая сварочная выставка в азиатском регионе.

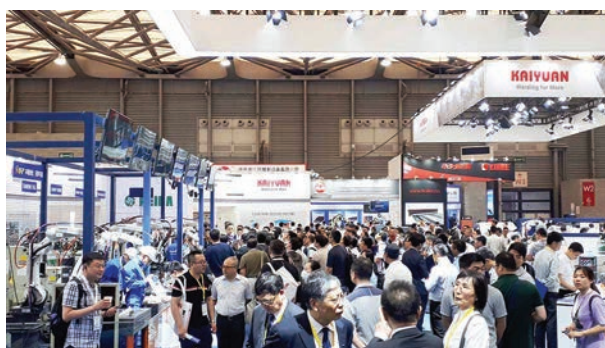
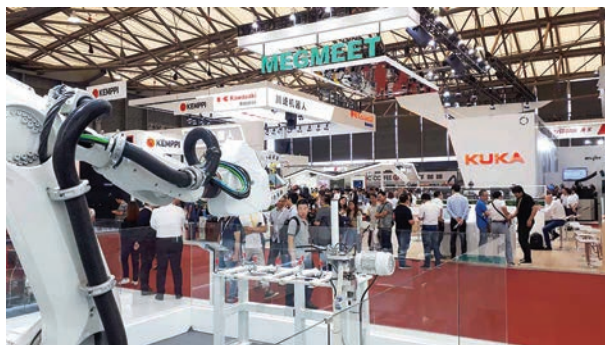
BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING, ведущая отраслевая выставка сварки в азиатском регионе, проводится уже в 24-й раз. Более 1000 экспонентов представили свои продукты и услуги на экспозиции площадью более 87000 м² в Шанхайском выставочном центре.

Продукты, относящиеся к сварке и резке, пользуются большим спросом в Китае: при ежемесячном производстве стали в 85 млн т стали эта страна является мировым лидером и, следовательно, также имеет соответствующие требования для дальнейшей обработки. BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING предложила посетителям идеальную платформу для поиска информации об инновациях в ключевых технологиях, связанных с соединением, резкой и нанесением покрытий, а также для обмена идеями и заказа продукции.

Компании имеют возможность предложить свои услуги на многочисленных международных стендах, в том числе в павильоне Германии, который увеличился в размере на 38 % по сравнению с последним мероприятием в Шанхае в результате высокого спроса. 25 компаний присутствуют на стенде павильона, который продвигает Федеральное министерство экономики Германии, где они продемонстрируют свою продукцию «Сделано в Германии».

В дополнение к высококачественным презентациям для экспонентов, BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING предлагает множество возможностей для дальнейшего обучения. Эксперты поделятся своими знаниями на конференции под названием «IFWT 2019 Сварка и соединение» и на «Китайском форуме сварочной промышленности 2019».

В этом году организаторы мероприятия также рады участию таких известных компаний, как KUKA, Yaskawa, ESAB, ABB и Golden Bridge. Эта выставка с участием более 1000 экспонентов из 30 стран мира является крупнейшим зарубежным проектом Messe Essen.



ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ (Обзор)

В.А. Лебедев¹, С.В. Драган², Г.В. Жук¹, С.В. Новиков¹, И.В. Симутенков²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова.
54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Рассмотрены и проанализированы основные технические средства и способы импульсного управления процессом дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, разработанные в последнее время в ИЭС им. Е.О. Патона и Национальном университете кораблестроения им. адмирала Макарова. Значительное внимание уделено способам с использованием систем импульсного воздействия на процессы переноса электродного металла, формирование сварных швов и структуру наплавленного металла. Показана перспективность применения систем с импульсной, дозированной подачей электродной проволоки, приведены результаты эффективного управления сварочными и наплавочными процессами. Рассмотрены способы дуговой сварки с импульсной подачей защитного газа и с двухструйной газовой защитой и указаны проблемы, препятствующие широкому использованию этих способов. Приведены результаты некоторых исследований по влиянию внешних электромагнитных воздействий на перенос электродного металла, формирование и кристаллизацию швов и приведены примеры эффективного применения данного способа управления сварочным процессом. Выполнен анализ способов механического воздействия на сварочный процесс с использованием различных систем колебателей. Показана возможность комбинированного управления переносом электродного металла, формированием наплавленного валика и структурой его металла в зависимости от схемы ввода колебаний и параметров колебательного процесса. Указано на перспективность применения способа для наплавочных работ. Библиогр. 34, табл. 2, рис. 12.

Ключевые слова: сварное соединение, свойства, управление, технические средства, анализ, применение

Сварка и родственные технологии непрерывно, активно и всесторонне развиваются. Создаются теоретические и технологические предпосылки, технические разработки для изготовления новых изделий в традиционных областях сварочного производства, а также освоение других сфер применения, которые ранее считались недоступными для широкого круга задач, например, подводная сварка мокрым способом [1].

Сварной шов, наплавленный слой являются результатом, достигаемым посредством механизированного или автоматического оборудования для дуговой сварки и наплавки. От структуры наплавленного металла и зоны термического влияния, формы поверхности шва, геометрических параметров зоны проплавления зависят эксплуатационные (служебные) характеристики сварных, восстановленных или упрочненных изделий (конструкций) [2].

Существует достаточно много способов и методов влияния на характеристики сварного соединения или наплавленного слоя, среди которых технологические, технические и такие, которые связаны с электродными материалами и защитными средами. При этом следует учитывать также влияние свариваемого материала, условий и среды, в которой осуществляется дуговой процесс.

Цель настоящей работы — анализ и перспективы применения технических средств, входящих в системы сварочного оборудования, а также вспомогательных систем.

Для анализа основных технических средств, используемых для импульсного управления параметрами сварного шва и наплавленного слоя, рассмотрены разработки ИЭС им. Е.О. Патона и НУК им. адмирала Макарова. Укрупнено разнообразие технических средств и представлено на рис. 1.

Широкое распространение в сварочном и наплавочном оборудовании любого назначения, реализующие электродуговой процесс с использованием плавящегося электрода, получили импульсные источники сварочного тока инверторного типа. Форма импульсов выходного напряжения, их частота зависят от решаемых задач. В основном это задачи по управлению переносом электродного металла, в том числе и создание условий для оптимального перехода капель расплавленного металла в жидкую ванну.

Широко распространены процессы с алгоритмами управления, где используются в разных вариантах обратные связи [3]. В качестве примера отметим процесс переноса капель электродного металла при непрерывной подаче электродной проволоки, в котором на стадии формирования капли стабилизируется напряжение источника, а



Рис. 1. Технические средства воздействия на свойства шва или наплавленного слоя

на стадии разрыва шейки капли между электродом и ванной подается импульс тока (рис. 2) [4].

Импульсное воздействие источника сварочного тока позволяет:

управлять переносом электродного металла путем отрыва капли и ее транспортирования в сварочную ванну как основное воздействие импульса тока дугового процесса;

создавать вибрационные колебания ванны расплавленного металла как сопутствующее воздействие электродинамических сил.

Управляемый перенос электродного металла можно также получить, используя импульсную подачу электродной проволоки. Это направление получает все большее распространение, что во многом определяется возможностями совершенствования технических средств и технологическими разработками в этом направлении. Можно отметить различные конструкции механических безредукторных преобразователей вращательного движения вала приводного электродвигателя в импульсы перемещения движителей проволоки [5]. Такие технические решения позволяют задавать заранее выбранный режим подачи электродной проволоки по шагу перемещения и скважности

импульсов. Однако такие конструкции ограничены в применении. Исключение составляют устройства импульсной подачи с квазиволновым преобразователем [6]. Как правило, в качестве приводных электродвигателей в таких устройствах применяются достаточно дешевые коллекторные электродвигатели постоянного тока.

В настоящее время разработаны и продолжают развиваться системы импульсной подачи с применением бесколлекторных электродвигателей – шаговых и вентильных, параметры работы которых обуславливаются программно на основе цифровых систем управления. Использование таких электродвигателей предполагает безредукторную конструкцию механизма подачи проволоки, что повышает быстродействие системы. В качестве электроприводов с шаговыми электродвигателями, в основном, используются серийно выпускаемые комплекты. Такие комплекты с успехом использованы в автомате для подводной сварки мокрым способом [7] и в других типах оборудования [8].

Электроприводы с вентильными электродвигателями и цифровым управлением разрабатывались в Украине специально для сварочного оборудования различного назначения [9], но наибольшее распространение они получили в системах подачи электродной проволоки для реализации импульсного движения с управляемыми характеристиками, например, для сварки в водной среде мокрым способом. Возможности влияния импульсной подачи на формирование валиков иллюстрируют примеры наплавки в воде порошковой проволокой (рис. 3). При этом снижается количество неметаллических включений, улучшаются механические свойства наплавленных слоев.

Современные вентильные электроприводы обеспечивают частоту импульсной подачи элект-

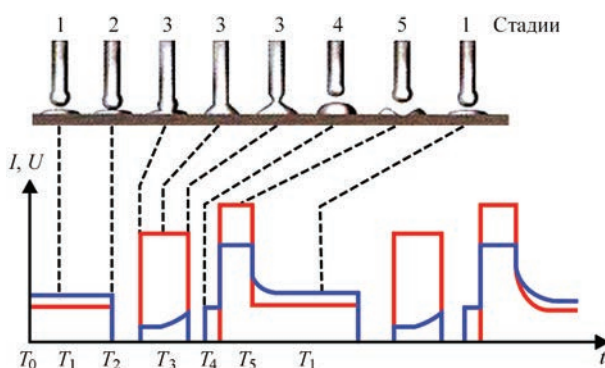


Рис. 2. Алгоритм работы системы управления импульсного источника сварочного тока

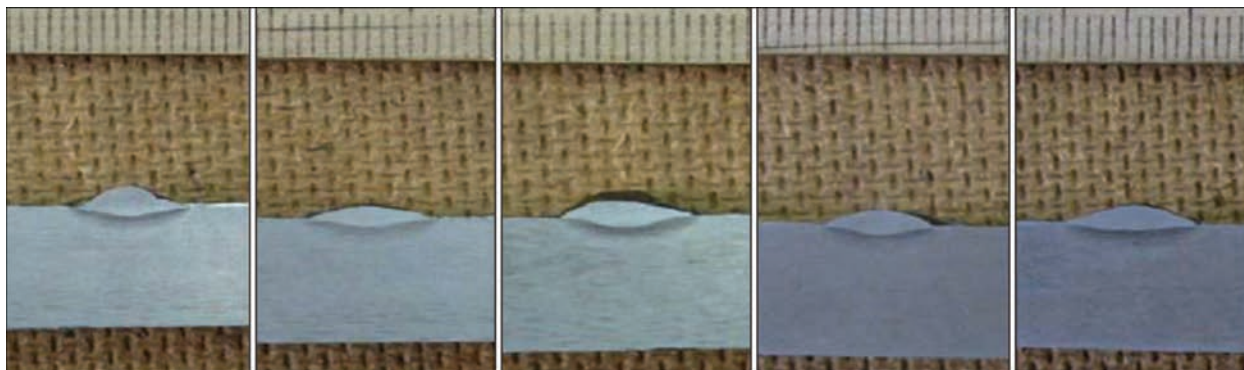


Рис. 3. Микрошлифы валиков, наплавленных с управляемыми импульсами подачи электродной проволоки

родной проволоки до 50...60 Гц с регулируемыми параметрами (шаг, амплитуда, скважность) и возможность реверса движения в цикле импульса подачи. Кроме того, в регулятор вентильного электропривода может быть введен сигнал обратной связи по параметрам дугового процесса. Примером может служить привод с обратной связью по току или напряжению, реализующий дозированную подачу электродной проволоки [10, 11]. Изменяя параметры дозированной подачи электродной проволоки, можно управлять формой шва при неизменных параметрах режима сварки или наплавки (среднего тока, напряжения и скорости перемещения дуги).

Также одним из базовых эффектов при импульсной подаче проволоки является возможность получения дезориентированной структуры наплавленного металла. Детальные металлографические исследования образцов, наплавленных в одинаковых условиях и с одинаковыми энергетическими параметрами процесса, но с использованием разных способов подачи проволоки, свидетельствуют о существенных изменениях в структуре металла наплавки, снижении количества неметаллических включений [12].

Следует также отметить большую стабильность процесса переноса металла при применении

систем с дозированной подачей проволоки. На осциллограммах процесса наплавки, осуществляемого с дозированной подачей проволоки (рис. 4), наблюдается четкая регулярность управляемого переноса электродного металла, что в итоге приводит к улучшению структуры металла. Вместе с тем наблюдается снижение степени выгорания легирующих элементов. Полученные дуговой сваркой швы и наплавленные слои имеют также улучшенные механические свойства, например, прочность, износостойкость и вязкость [13].

Доказательством эффективности применения дозированной подачи электродной проволоки могут служить результаты сварки (наплавки) электродной проволокой диаметром 1,0 мм пластин толщиной 0,9 мм из алюминиевого сплава (рис. 5) [14]. Соединения по показателям качества практически не отличаются от швов, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, но по производительности процесс с дозированной подачей электродной проволоки в 1,5...2,0 раза превосходит аргонодуговую сварку.

Относительно новыми способами управления процессом дуговой сварки является импульсная подача защитного газа и с двухструйной газовой защитой.

Во время импульса подачи защитного газа возрастает скорость истечения газового потока из

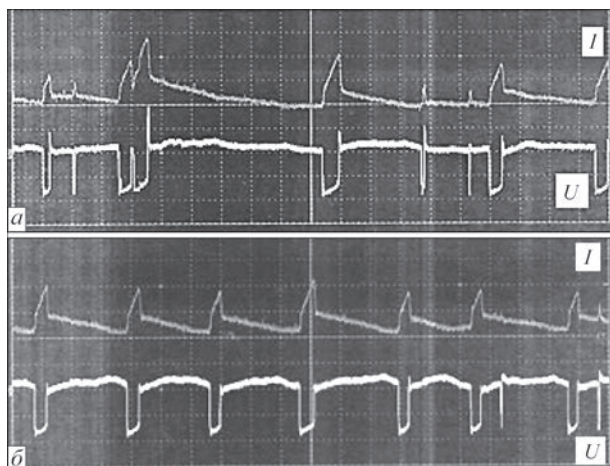


Рис. 4. Осциллограммы процесса наплавки с подачей электродной проволоки: а — непрерывной; б — дозированной

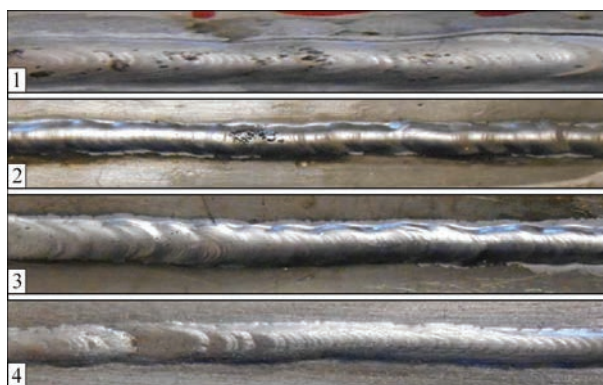


Рис. 5. Внешний вид валиков, полученных с дозированной подачей электродной проволоки, на тонколистовых металлоконструкциях: 1 — наплавка полуавтоматом; 2, 3 — сварка полуавтоматом стыкового шва; 4 — наплавка автоматом

сопла, растет газодинамическое давление на каплю у торца электродной проволоки и в ванну переходят более мелкие капли, но с большей частотой [15]. При этом, вследствие снижения времени перехода капли в жидкую ванну, изменяется интенсивность выгорания легирующих элементов.

Среди различных вариантов импульсной подачи защитных газов основными являются два: с подачей одного типа газа и с поочередной подачей нескольких типов газов, причем второй вариант более эффективен. Показано в работе [16], что при подаче поочередно аргона и гелия получается новый технологический процесс, в котором благодаря импульсному изменению давления в дуговом промежутке (из-за разной плотности и потенциалов ионизации аргона и гелия) возникает эффект импульсного воздействия на сварочную ванну. Это способствует получению металла сварного шва и наплавленного слоя с мелкозернистой структурой металла с высокими показателями пластичности и прочности металла.

Внешний вид швов (форма поверхности, чешуйчатость) зависят не только от рода защитного газа, но и от частоты импульсной подачи. Подача газа с частотой импульсов до 20 Гц оказывает преимущественное влияние на геометрию шва [17–19].

Несмотря на очевидные достоинства дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей защитного газа, широкому распространению способа, по нашему мнению, препятствует инерционность системы подачи защитного газа. При этом размещение газового клапана даже непосредственно у сопла не может эффективно решить проблему. Следует также учитывать то, что с увеличением частоты импульсной подачи сложнее обеспечить подачу защитных газов отдельными порциями без смешения.

Процесс сварки с двухструйной газовой защитой интересен с точки зрения влияния на сварной шов и совершенствование системы подачи защитного газа [20]. При таком способе сварки внутрен-

няя струя газа защитного охватывается наружной струей, которая стабилизирует внутреннюю струю, снижает ее турбулентность, ограничивает подсос воздуха в зону горения дуги и обеспечивает защиту околошовной зоны. Повышенное газодинамическое давление внутренней газовой струи способствует охлаждению капли расплавленного электродного металла при движении от торца электрода и снижает выгорание легирующих элементов. В сварочной ванне происходит более интенсивное перемешивание основного и электродного металлов.

Большой интерес представляют разработки систем сварочного оборудования с комбинированными воздействиями на сварочный процесс, формирование сварного соединения и наплавленного слоя. В работе [21] исследованы технические возможности использования способа управления переносом электродного металла при одновременном воздействии на плавление электродной проволоки источника сварочного тока и механизма импульсной подачи с различными алгоритмами работы. Для экспериментальных исследований использовали механизм импульсной подачи с односторонними захватами и электромагнитами, позволяющий синхронизировать импульсы подачи проволоки с частотой питающей сети [22].

Установлено, что импульс тока всегда должен предвзвешивать импульсное движение электродной проволоки. При оптимальных параметрах синхронизации достигается управляемый перенос электродного металла при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка и, в ряде случаев, возможен управляемый перенос без фазы короткого замыкания с потерями электродного металла менее 3 %. Используя импульсную подачу, можно управлять формированием сварного соединения (рис. 6).

В целом, преимущества применения комбинированного импульсного воздействия источника сварочного тока и механизма подачи электродной проволоки заключаются в следующем:

- расширяется диапазон устойчивых режимов сварки, возможность управления геометрическими характеристиками сварного соединения и наплавленного слоя;
- достигается высокий уровень управления переносом электродного металла как при сварке с короткими замыканиями, так и без него;
- облегчаются условия работы импульсных механизмов подачи, так как нет необходимости формирования импульсов с высокими значениями ускорений движения проволоки в импульсе;
- решаются на достаточно высоком уровне задачи структуризации металла шва со снижением



Рис. 6. Валики, наплавленные при различных параметрах процесса управления переносом электродного металла за счет комбинированного воздействия импульсов источника тока и механизма подачи электродной проволоки (1–4 — неэффективная синхронизация импульсов)

размеров кристаллов и соответствующим повышением механических свойств свариваемого или наплавляемого изделия;

– капля электродного металла меньшее время находится в зоне действия высоких температур, а, следовательно, снижено выгорание легирующих элементов.

Задача комбинированного воздействия на перенос металла решена в ИЭС им. Е.О. Патона при разработке нового способа дуговой механизированной и автоматической сварки с дозированной подачей электродной проволоки. При этом используются обратные связи по параметрам дугового процесса для подачи импульса тока от источника питания в любое время на этапе действия импульса подачи электродной проволоки. Это перспективное направление, которое может найти применение при сварке и наплавке разных сталей и сплавов алюминия и с использованием как сплошных, так и порошковых электродных проволок.

Продолжаются исследовательские работы в направлении, связанном с комбинированным импульсным воздействием от источника сварочного тока и системы импульсной подачи защитного газа. Некоторые результаты исследований [18] содержат материалы по двум способам сварки: с переменной подачей нескольких видов защитных газов и импульсно-дугового процесса с импульсной подачей защитного газа.

Комбинированное воздействие на процесс сварки по второму способу обеспечивает формирование шва с высоким качеством поверхности и оказывает положительное влияние на структуру металла шва, улучшая его механические характеристики.

К общим недостаткам описанных выше оригинальных способов сварки с комбинацией импульсных воздействий защитного газа и источника сварочного тока можно отнести, учитывая инерционность системы подачи газа, сложность в выборе газовой аппаратуры, а также определенные проблемы в обеспечении синхронизации работы источника сварочного тока и системы подачи защитного газа.

Далее рассмотрим перспективные разработки по управлению формированием сварного соединения и наплавленного слоя с помощью технических средств, которые, как правило, не входят в число основных систем сварочно-наплавочного оборудования и используются для существенно повышения их эффективности. Особенно следует отметить тот факт, что различные способы влияния на формирование сварочной ванны при помощи технических средств, реализующие раз-

личного рода импульсные или колебательные воздействия, отличаются по частотному спектру их эффективного воздействия, так как часть из них действует на весь объем расплавленного металла, а часть — локально.

Колебания горелки сварочного автоматизированного оборудования проводят, в основном, с целью заполнения широких разделок или увеличения ширины наплавленного валика [23]. Частота этих колебаний обычно составляет 0,2...2,0 Гц и ограничивается инерционными свойствами колебательной системы горелки. Сопутствующий результат работы колебателей горелок — влияние на структуру металла шва и наплавленного слоя. Установлено, что поперечные колебания дуги позволяют уменьшить дендритную неоднородность металла шва и ширину зоны термического влияния, что способствует улучшению механических свойств сварного шва и наплавленного слоя [24]. Поперечные колебательные движения горелки могут быть осуществлены двумя основными способами — качаниями горелки или параллельными смещениями каретки с закрепленной на ней сварочной горелкой. В первом случае изменяется вылет электродной проволоки, что также оказывает влияние на формирование сварного соединения или наплавленного валика.

Примером оригинального и эффективного применения колебаний горелки для решения задачи сварки по увеличенному зазору является разработка устройства для вварки заглушек внутри трубы диаметром 157 мм и толщиной стенки 10 мм в жидкой среде мокрым способом на глубине более 200 м, выполненная в ИЭС им. Е.О. Патона [25]. Колебания горелки осуществляются от привода механизма подачи электродной проволоки посредством специального эксцентрикового механизма, позволяющего регулировать амплитуду колебаний. Особенности и результаты сварки с применением разработанного колебателя горелки иллюстрирует рис. 7.

В частности, на осциллограмме (рис. 7, б) отчетливо видны импульсы тока дугового процесса, возникающие вследствие изменения вылета электрода в крайних точках колебаний. Такие импульсы близки к импульсам тока при сварке с модуляцией режима и оказывают соответствующее влияние на характеристики сварного шва.

Кратко остановимся на рассмотрении известных систем управления сварочным процессом и формированием сварного соединения и наплавленного слоя с использованием магнитных полей [26]. Зачастую сложность применения этих технических систем ограничивает их установку в системах автоматического оборудования для

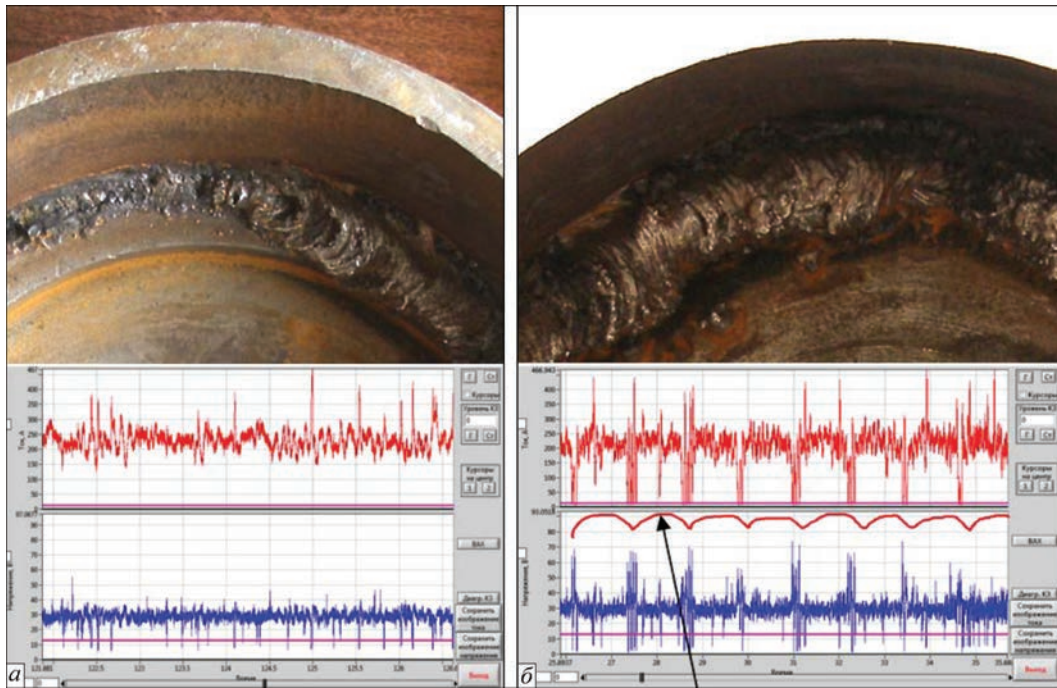


Рис. 7. Внешний вид швов и осциллограммы тока и напряжения при варке заглушки: *а* — обычный процесс; *б* — с колебаниями горелки (стрелкой показано колебание токоподвода)

сварки и наплавки, однако, в ряде случаев их использование необходимо и имеет дальнейшую перспективу.

Эффективность управления указанными процессами с помощью внешних импульсных магнитных полей доказана экспериментально [27]. Установлено, что применение аксиальных импульсных полей позволяет не только управлять частотой переноса и размерами капель электродного металла, но и изменять тип переноса, например, с крупнокапельного на струйный. С повышением частоты электромагнитных импульсов снижаются потери металла электродной проволоки на разбрызгивание. Управляемое электромагнитное поле, воздействуя на жидкий металл сварочной ванны, обеспечивает возможность изменения геометрии шва и тем самым служит средством повышения стойкости металла против горячих трещин.

При наплавочных работах для получения требуемой структуры и геометрии наплавленного слоя используют различные методы, основанные на регулировании тепловложения в обрабатываемый металл и физико-химическом воздействии на дугу и сварочную ванну [13, 28]. Управление структурой обеспечивает необходимые механические характеристики металла наплавки, а управление размерами проплавления способствует повышению производительности наплавочного процесса и сокращению участия основного металла в наплавленном слое.

На решение этого комплекса задач направлены работы, связанные с созданием высокочастотного

непосредственного (без дополнительных преобразователей) колебателя электродной проволоки с использованием новых технических средств и оригинального применения ряда физических эффектов [29, 30]. Механический генератор высокочастотных колебаний электрода обеспечивает комбинированное воздействие, при котором реализуются условия одновременного управления переносом металла через дугу и геометрией наплавленного слоя при автоматической наплавке под флюсом.

Генератор отличается способностью создания высокочастотных колебаний электрода, состоящих из двух гармоник с необходимыми значениями частоты и амплитуды. Гармоника с большей частотой обеспечивает повышение стабильности плавления электрода, а гармоника с меньшей частотой, но большей амплитудой, способствует увеличению ширины наплавленного валика и уменьшению глубины проплавления основного металла. Усовершенствованная конструкция механического генератора колебаний (рис. 8) позволяет, в отличие от предыдущих разработок, создавать колебания электрода вдоль или поперек наплавленного валика и регулировать их амплитуду независимо от технологически обусловленной величины вылета электрода [31].

Размещение механического генератора на стандартном оборудовании для автоматической сварки позволяет достичь следующих результатов в зависимости от амплитудно-частотных характеристик создаваемых колебаний:

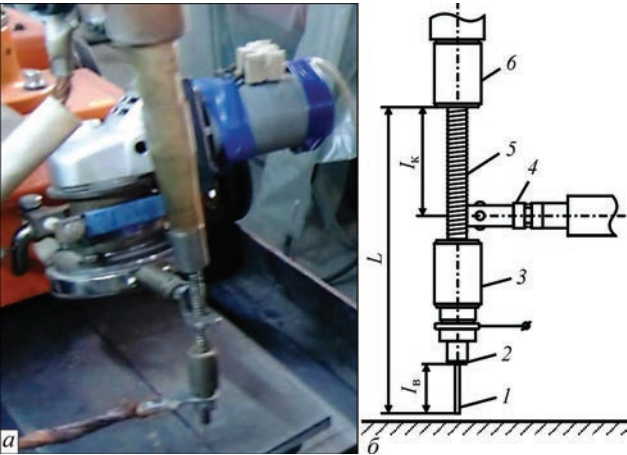


Рис. 8. Общий вид устройства (а) и схема создания высокочастотных колебаний электродной проволоки (б): 1 — электродная проволока; 2 — токоподвод; 3, 6 — узлы крепления токоподвода; 4 — вибрационный узел механического генератора; 5 — гибкая спираль; L — длина подвижной (эластично закрепленной) части токоподвода с электродом; l_k — плечо приложения усилия от механического генератора; l_v — вылет электрода

- обеспечить микрокапельный перенос металла в результате гравитационно-капиллярного распыления;
- управлять переносом металла;
- управлять геометрией наплавляемого слоя за счет рассредоточения теплового потока.

Возможности комбинированного управления характеристиками наплавочного процесса с помощью высокочастотных поперечных механических колебаний электрода можно оценить по результатам, представленным в табл. 1 [32]. Особенно существенное влияние оказывают колебания с частотами, близкими к резонансным.

Учитывая хорошие технологические результаты (структура металла, геометрические параметры наплавленных слоев), полученные при наплавке с высокочастотными управляемыми колебаниями электродной проволоки, считаем целесообразным применить их и в других процессах с использованием плавящегося электрода.

В ИЭС им. Е.О. Патона ведутся работы по применению других колебательных процессов, в том числе и с более низкой частотой. Отмечено выше,

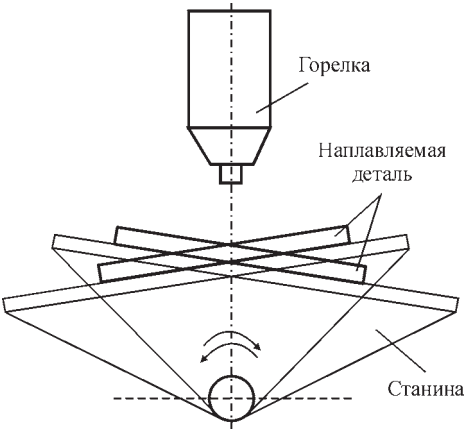


Рис. 9. Схема гармонических колебаний сварочной ванны

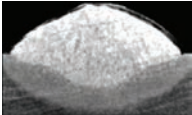
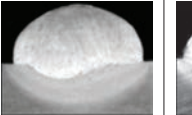
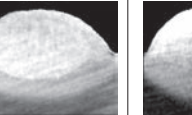
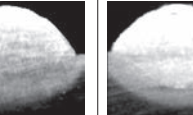
что вибрации сварочной ванны приводят к изменению структуры металла шва или наплавленного слоя. Для возбуждения колебаний расплавленного металла ванны обычно применяют плоские или плоскопараллельные движения вибростолов различной конструкции.

Основываясь на достижениях современной мехатроники с компьютеризованным управлением приводными системами, предложены новые технические решения и технологические приемы для воздействия на сварочную ванну с управляемыми параметрами колебаний — частотой, амплитудой, формой. На рис. 9 приведена схема создания поперечных относительно шва колебаний наплавляемого изделия, на рис. 10 — фрагмент экспериментальной установки, на рис. 11 — внешний вид наплавленных валиков.

В качестве привода для поперечных колебаний использовали шаговый двигатель с безредукторной передачей движения непосредственно на рабочий стол. С помощью установки была выполнена экспериментальная проверка разработанной математической модели процесса наплавки с колебаниями изделия [33], которая показала удовлетворительную сходимость результатов (табл. 2).

Существенное увеличение ширины наплавленного валика при соответственно уменьшенной высоте в результате колебаний сварочной ванны свидетельствует о большей производительности

Таблица 1. Влияние частоты колебаний электрода на показатели наплавки

Частота колебаний, Гц	0	680 (резонанс)	1295	3820 (резонанс)	5800
Макрошлиф наплавленного валика					
Доля основного металла в наплавленном валике	0,36	0,13	0,30	0,22	0,25
Коэффициент расплавления электрода, г/(А·ч)	$\frac{15,0...15,2}{15,1}$	$\frac{16,5...17,2}{16,9}$	$\frac{15,1...15,5}{15,3}$	$\frac{18,0...18,9}{18,6}$	$\frac{15,8...16,3}{16,1}$

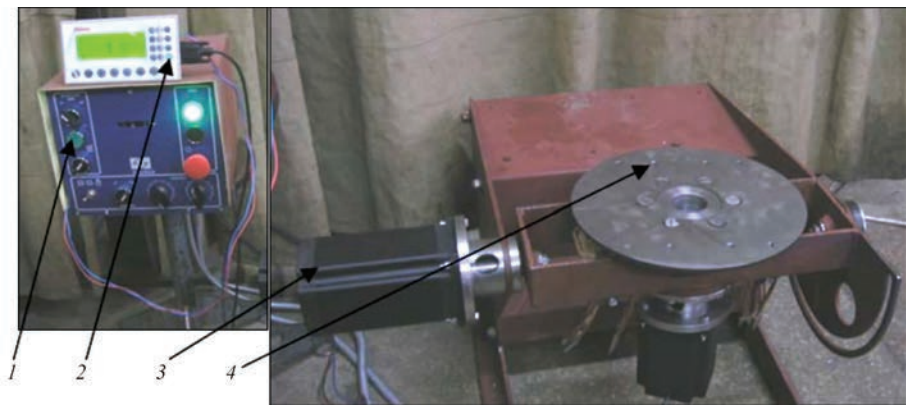


Рис. 10. Установка для поперечных колебаний наплавляемого изделия: 1 — блок управления; 2 — регулятор параметров колебаний; 3 — электродвигатель привода колебаний; 4 — рабочий стол

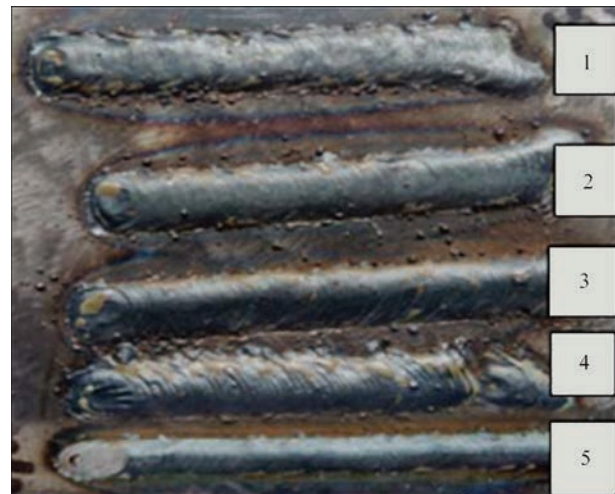


Рис. 11. Валики, наплавленные с колебаниями рабочего стола установки с частотой, Гц: 1 — 4,67; 2 — 4,0; 3 — 3,0; 4 — 2,0; 5 — без колебаний

данного способа наплавки по сравнению с обычным способом, выполняемым в условиях неподвижности наплавляемого изделия. Кроме этого,

Таблица 2. Результаты проверки адекватности математической модели

Номер опыта	Частота колебаний, Гц	Ширина наплавленного валика, мм		Погрешность, %
		расчет	эксперимент	
1	4,67	15,4	14,0	10,0
2	4,0	13,6	13,0	4,6
3	3,0	12,0	14,0	14,3
4	2,0	11,0	14,0	21,4
5	0	-	8,0	-

улучшенная структура наплавленного металла обеспечивает более высокие эксплуатационные характеристики поверхностного слоя [34].

Результаты выполненных исследований дают основание считать, что технологию наплавки с колебаниями изделия следует развивать в направлении использования других параметров колебательного процесса. Рассмотренный способ наплавки может быть использован при изготовлении или ремонте деталей сельскохозяйственной техники, узлов штампового и металлорежущего инструмента [34] и т. п.

В последнее время предложен и испытан способ сварки-наплавки с введением механических колебаний в сварочную ванну с помощью дополнительного вибратора (рис. 12).

При ведении сварочного или наплавочного процессов волновод вибратора, погруженный в жидкий металл сварочной ванны за дугой, перемещается вместе с ней со скоростью $V_{св}$. Положение рабочего торца волновода (расстояние от сварочной дуги l_n , глубина погружения h_n , угол наклона α_n) определяются размерами сварочной ванны, параметры колебательного процесса (частота и амплитуда) задаются генератором колебательного механизма. Эффект механического перемешивания сварочной ванны заключается в структуризации наплавленного металла и, как следствие, в повышении механических свойств соединения или наплавленного слоя.

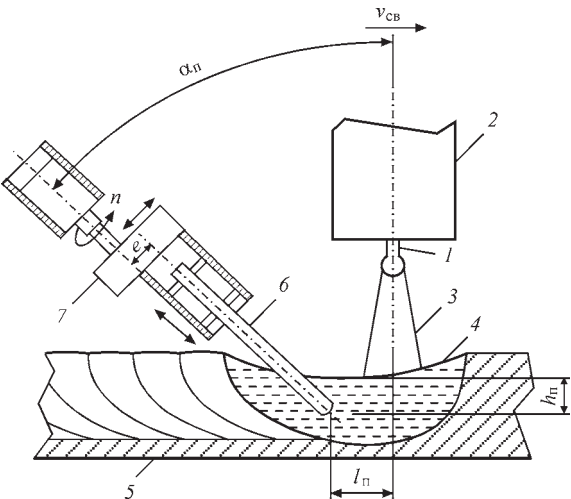


Рис. 12. Схема сварочно-наплавочного процесса с использованием механического вибратора сварочной ванны: 1 — электродная проволока; 2 — горелка; 3 — сварочная дуга; 4 — сварочная ванна; 5 — изделие; 6 — волновод вибратора; 7 — генератор; n — частота вращения волновода; e — полуамплитуда колебаний волновода

Выводы

1. При большом разнообразии методов и способов управления эксплуатационными свойствами сварных соединений, определяющим фактором для получения соединения с требуемыми механическими и специальными характеристиками является правильный выбор способа и режимов сварки. Однако универсальный способ сварки, обеспечивающий, с учетом разных внешних условий ведения процесса, абсолютную равнопрочность и качество соединений, еще не разработан.

2. Основными направлениями эффективного повышения качества сварного соединения являются рациональное применение способов импульсного и вибрационного воздействия на сварочный процесс с помощью систем собственно сварочного оборудования, а также вспомогательных систем, позволяющих управлять свойствами наплавленного металла.

3. Существенно повысить результативность механического влияния на характеристики сварного соединения или наплавленного слоя можно с использованием различных способов комбинированного воздействия, выбирая наиболее действенные из них с учетом экономической эффективности применения.

Список литературы

- Патон Б.Е. (2003) Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций. *Автоматическая сварка*, № 1, 7–13.
- Маковецкая О.К. (2012) Основные тенденции на рынке сварочной техники в 2008–2011 гг. и прогноз его развития (Обзор). *Там же*, 6, 44–50.
- Миронов С. (2003) Инверторные источники питания для дуговой сварки. *Сварочное производство*, 4, 41–43.
- Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Григорьева А.А. и др. (2015) Управление структурой и свойствами сварных соединений технических систем ответственного назначения методами адаптивной импульсно-дуговой сварки. *Вопросы материаловедения*, 1, 127–131.
- Патон Б.Е., Лебедев В.А., Полосков С.И., Лендел И.В. (2013) Использование механических импульсов для управления процессами автоматической и механизированной сварки плавящимся электродом. *Сварка и диагностика*, 6, 16–20.
- Патон Б.Е., Лебедев В.А., Пичак В.Г., Полосков С.И. (2009) Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки. *Там же*, 3, 46–51.
- Максимов С.Ю., Лебедев В.А., Лендел И.В. (2015) Герметизация труб теплообменников «мокрой» сваркой на глубине 200 м. *Вопросы материаловедения*, 1, 199–204.
- Лебедев В.А., Драган С.В., Трунин К.К. (2016) Автоматическая сварка под флюсом с импульсной подачей шаговым двигателем электродной проволоки. *Сварочное производство*, 2, 27–34.
- Лебедев В.А., Гулый М.В. (2014) Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. *Мехатроника. Автоматизация. Управление*, 6, 47–51.
- Лебедев В.А., Жук Г.В. (2017) Управление переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. *Тяжелое машиностроение*, 6, 27–32.

- Лебедев В.А. (2016) Механизированная синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2, 19–24.
- Lebedev V., Reigen U., Lendel I. (2016) Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wirefeed. *Welding in the World*, February, 9–14.
- Патон Б.Е., Лебедев В.А., Жук Г.В., Драган С.В. (2017) Механические импульсные и вибрационные воздействия в оборудовании и технологиях механизированной сварки и наплавки. *Збірник тез доповідей 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції 26–27 жовтня 2017 р. «Вібрації в техніці та технологіях»*. Вінниця, сс. 10–16.
- Лебедев В.А., Жук Г.В. (2017) Решение задачи механизированной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов на основе применения программируемых электроприводов механизма подачи. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, 9, 21–24.
- Денисов Л.С., Барсуков И.В., Аполоник С.А. (1998) Разработка и анализ оборудования для сварки с попеременной подачей газов. *Тр. научн. конф. «Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства»*. Киев. Т.4, сс. 310–313.
- Тарасов Н.М., Тулин В.М. (1982) Управление переносом электродного металла кратковременным повышением скорости истечения защитного газа. *Сварочное производство*, 8, 23–25.
- Жерносеков А.М. (2012) Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор). *Автоматическая сварка*, 1, 33–38.
- Жерносеков А.М., Сидорец В.Н., Шевчук С.А. (2013) Комбинированное импульсное воздействие защитных газов и сварочного тока при сварке плавящимся электродом. *Сварочное производство*, 1, 9–13.
- Kitsch M. (2006) Metall-inert gas schweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr. *Schweißen und Schneiden*, 58, 1, 19–22.
- Чинахов Д.А. (2009) Влияние двухструйной газовой защиты на эксплуатационные свойства сварных соединений судостроительной стали GL-E36. *Автоматическая сварка*, 9, 39–42.
- Патон Б.Е., Лебедев В.А., Микитин Я.И. (2006) Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке. *Сварочное производство*, 8, 27–32.
- Федько В.Т., Солодкий С.А., Крюков А.В. (2004) Импульсная подача сварочной проволоки с управляемым переносом электродного металла. *Материалы научно-технической конф. «Наука–Образование–Производство»*. Нижний Тагил. Т.2, сс. 100–103.
- Макара А.М., Кушнirenко Б.Н. (1967) Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений. *Автоматическая сварка*, 1, 31–35.
- Болдырев А.М. (1976) О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну. *Сварочное производство*, 2, 1–3.
- Лебедев В.А. (2019) Автоматическая подводная сварка по увеличенному зазору. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 3, 16–20.
- Сидоренко П.Ю., Рыжов Р.Н. (2010) Использование импульсных электромагнитных воздействий для управления процессом переноса электродного металла при дуговой сварке. *Автоматическая сварка*, 6, 52–53.
- Рыжов Р.Н. (2007) Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов. *Там же*, 2, 56–58.
- Лебедев В.А., Тищенко В.А., Лой С.А. (2019) Техно-технологические эффекты при механизированной наплавке с модуляцией режимов. *Materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar: February 18–23. «Modern question of production and repair in industry and transport»*. Kosice, pp. 106–109.
- Голобородько Ж.Г., Драган С.В., Симутенков И.В. (2013) Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных

- сталей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода. *Автоматическая сварка*, **6**, 35–38.
30. Симутенков И.В., Драган С.В., Ярослав Ю.А. (2014) Стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода. *Зб. наук. пр. НУК*, **4**, 43–48.
 31. Симутенков И.В., Ярослав Ю.О., Драган С.В., Галь А.Ф. (2015) Пристрій для автоматичного наплавлення під флюсом. Україна Пат. 10288, МПК B23K 9/00. № u 201504821.
 32. Драган С.В., Симутенков И.В., Игнатенков О.В. (2012) Методика определения параметров высокочастотных механических колебаний электрода при автоматической наплавке под флюсом. *Вісник державної машинобудівної академії*, **3(8)**, 124–129.
 33. Лебедев В.А., Новиков С.В., Жук Г.В. и др. (2018) Математическое моделирование процесса дуговой наплавки с управляемыми изменениями длины дугового промежутка. *Технология машиностроения*, **3**, 56–62.
 34. Lebedev V.A., Solomichuk T.G., Novykov S.V. (2019) Study if a Welding Harmonic Oscillation in flurence on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width. *Journal of engineering sciences*, **6**, 16–21.
 15. Denisov, L.S., Barsukov, I.V., Apolonik, S.A. (1998) Development and analysis of equipment for welding with alternate gas supply. In: *Proc. of Sci. Conf. on Advanced Engineering and Technology of Machine Building, Instrument Making and Welding Production*. Kiev, Vol. 4, 310–313 [in Russian].
 16. Tarasov, N.M., Tulin, V.M. (1982) Control of electrode metal transfer by short-time increase of rate of shielding gas flow. *Svarochn. Proizvodstvo*, **8**, 23–25 [in Russian].
 17. Zhernosekov, A.M. (2012) Tendencies in development of control of metal transfer processes in shielding gases (Review). *The Paton Welding J.*, **1**, 29–33.
 18. Zhernosekov, A.M., Sidorets, V.N., Shevchuk, S.A. (2013) Combined pulsed action of shielding gases and welding current in consumable electrode welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 9–13 [in Russian].
 19. Kitsch, M. (2006) Metall-Inert Gas Schweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr. *Schweißen und Schneiden*, **58(1)**, 19–22 [in German].
 20. Chinakhov, D.A. (2009) Effect of double-jet gas shielding on performance of welded joints on GL-E36 shipbuilding steel. *The Paton Welding J.*, **9**, 29–32.
 21. Paton, B.E., Lebedev, V.A., Mikitin, Ya.I. (2006) Method of combined control of electrode metal transfer process in mechanized arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **8**, 27–32 [in Russian].
 22. Fedko, V.T., Solodsky, S.A., Kryukov, A.V. (2004) Pulsed welding wire feed with controlled transfer of electrode metal. In: *Proc. of Sci.-Techn. Conf. on Science-Education-Production*. Nizhny Tagil, Vol. 2, 100–103 [in Russian].
 23. Makara, A.M., Kushnarenko, B.N. (1967) Transverse arc movements as the factor of improvement of structure and properties of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 31–35 [in Russian].
 24. Boldyrev, A.M. (1976) On mechanism of formation of weld metal structure at low-frequency oscillations in weld pool. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 1–3 [in Russian].
 25. Lebedev, V.A. (2019) Automatic underwater welding on increased gap. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, **3**, 16–20 [in Russian].
 26. Sidorenko, P.Yu., Ryzhov, R.N. (2010) Application of pulse electromagnetic effects to control the process of electrode metal transfer in arc welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 44–45.
 27. Ryzhov, R.N. (2007) Influence of pulse electromagnetic actions on formation and solidification of welds. *Ibid.*, **2**, 49–50.
 28. Lebedev, V.A., Tishchenko, V.A., Loj, S.A. (2019) Technical-technological effects in mechanized surfacing with modulation of modes. In: *Proc. of 19th Intern. Sci. and Techn. Seminar on Modern Question of Production and Repair in Industry and Transport (Slovak Republik, Kosice, February 18–23)*, 106–109.
 29. Goloborodko, Zh.G., Dragan, S.V., Simutenkov, I.V. (2013) Automatic submerged-arc surfacing of structural steels with transverse high-frequency movements of electrode. *The Paton Welding J.*, **6**, 34–37.
 30. Simutenkov, I.V., Dragan, S.V., Yaros, Yu.A. (2014) Stability of arc process in automatic submerged-arc surfacing with high-frequency electrode oscillations. *Zb. Nauk. Prats NUK*, **4**, 43–48 [in Russian].
 31. Simutenkov, I.V., Yaros, Yu.O., Dragan, S.V., Gal, A.F. (2015) *Device for automatic submerged-arc surfacing*. Ukraine Pat. 10288, Int. Cl. B23K 9/00, No. u 201504821 [in Ukrainian].
 32. Dragan, S.V., Simutenkov, I.V., Ignatenkov, O.V. (2012) Procedure for determination of parameters of electrode high-frequency mechanical oscillations in automatic submerged-arc surfacing. *Visnyk Derzh. Mashynobudivnoi Akademii*, **3(8)**, 124–129 [in Russian].
 33. Lebedev, V.A., Novikov, S.V., Zhuk, G.V. et al. (2018) Mathematical modeling of arc surfacing process with controlled variations of arc gap length. *Tekhnologiya Mashinostroyeniya*, **3**, 56–62 [in Russian].
 34. Lebedev, V.A., Solomichuk, T.G., Novykov, S.V. (2019) Study if a welding harmonic oscillation influences on the welded metal hardness and weld bead width. *J. of Eng. Sci.*, **6**, 16–21.

References

ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВІВ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ В СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНИХ ГАЗІВ (Огляд)

В.О. Лебедєв¹, С.В. Драган², Г.В. Жук¹, С.В. Новіков¹, І.В. Сімутенков²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Розглянуто та проаналізовано основні технічні засоби та способи імпульсного управління процесом дугового зварювання електродом, що плавиться, в середовищі захисних газів, розроблені останнім часом в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова. Значну увагу приділено способам з використанням систем імпульсного впливу на процеси перенесення електродного металу, формування зварних швів і структуру наплавленого металу. Показано перспективність застосування систем з імпульсною, дозованою подачею електродного дроту, наведені результати ефективного управління зварювальним та наплавочним процесами. Розглянуто способи дугового зварювання з імпульсною подачею захисного газу і з двоштрумним газовим захистом та вказано проблеми, що перешкоджають широкому використанню цих способів. Наведено результати деяких досліджень щодо впливу зовнішніх електромагнітних впливів на перенесення електродного металу, формування та кристалізацію швів і наведено приклади ефективного застосування даного способу управління зварювальним процесом. Виконано аналіз способів механічного впливу на зварювальний процес з використанням різних систем коливання. Показана можливість комбінованого управління перенесенням електродного металу, формуванням наплавленого валика і структурою його металу в залежності від схеми введення коливань і параметрів коливального процесу. Зазначено на перспективність застосування способу для наплавочних робіт. Бібліогр. 34, табл. 2, рис. 12.

Ключові слова: зварене з'єднання, властивості, управління, технічні засоби, аналіз, застосування

APPLICATION OF PULSED IMPACT IN CONSUMABLE ELECTRODE GAS-SHIELDED ARC WELDING (Review)

V.A. Lebedev¹, S.V. Dragan², G.V. Zhuk¹, S.V. Novikov¹, I.V. Simutenkov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str.
03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy, 54025, Mykolaiv. E-mail: welding@nuos.edu.ua

The papers presents the main technical means and methods of pulsed control of the process of consumable electrode gas-shielded arc welding, developed over the recent years at PWI and Admiral Makarov National University of Shipbuilding. A lot of attention is given to methods using systems of pulsed impact on the processes of electrode metal transfer, weld formation and deposited metal structure. Good prospects for application of systems with pulsed dozed feed of electrode wire are shown, and results of effective control of welding and surfacing processes are given. Methods of arc welding with pulsed feed of shielding gas and two-jet gas shielding are considered, and problems are indicated, which prevent extensive application of these processes. The paper gives the results of some studies of the influence of external electromagnetic impact on electrode metal transfer, weld formation and crystallization, and presents some examples of effective application of this method of welding process control. Analysis of the methods of mechanical impact on the welding process using different oscillator systems was performed. The possibility is shown of combined control of electrode metal transfer, deposited bead formation and its metal structure, depending on the scheme of oscillation application and oscillation process parameters. The good prospects for this method application for surfacing operations are pointed out. 34 Ref., 2 Tabl., 12 Fig.

Keywords: welded joint, properties, control, technical means, analysis, application

Поступила в редакцію 21.06.2019





ЖУРНАЛИ для професіоналів

Журнали входять до Переліку
наукових фахових видань України
(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Интервью с директором НПФ «ВИСП» Ю.А. Никитюком



Юрий Анатольевич, НПФ «ВИСП» — название вашей фирмы, ассоциируется у многих сварщиков с названием довольно известного в СССР Всесоюзного института сварочного производств ВИСП, который прекратил свое существование в начале 1990-х годов и был преобразован в Украинский конструкторско-технологический институт сварочного производства (УкрИСП). Есть здесь какая-то связь? Какие основные направления деятельности Вашей фирмы?

Да, определенная связь имеется. Как известно, ВИСП, а потом и УкрИСП, были главными в Союзе и Украине разработчиками механического сварочного оборудования, средств комплексной механизации и автоматизации сварочного производства, установок для нанесения газотермических покрытий. В процессе становления рыночной экономики УкрИСП не смог адаптироваться к новым вызовам и прекратил свое существование в 2004 г. Часть работников института занялась другой деятельностью, а часть профессионалов пыталась продолжить работу по сварочной тематике.

Именно эти люди составили костяк нашей фирмы, которая была зарегистрирована в 2007 г. С течением времени фирма пополнялась более молодыми специалистами, имеющими опыт работы в других организациях.

Основная тематическая направленность работ, свойственная ВИСП и УкрИСП, сохранилась. Отдавая должное вкладу ВИСП в развитие сварочного производства и деятельности профессионалов, многие из которых были нашими учителями, мы и сохранили историческую память о нем в названии фирмы.

Ваша фирма уже достаточно длительное время работает в условиях рыночной экономики. Какие составляющие успешной деятельности НПФ «ВИСП» сегодня, в сложный период существования страны? Какие возникают проблемы?

Прежде всего я бы выделил в работе комплексный подход, охватывающий цикл: «разработка—изготовление—своевременная поставка оборудования—наладка—обучение специалистов заказчика—сервис».

В едином ключе у нас работает подразделение технологов, конструкторов-механиков, электриков, электронщиков, программистов и наладчиков. Это грамотные специалисты и замечательные люди, которые всегда помогают друг другу.

Выиграть тендер на поставку оборудования можно только при условии, что у фирмы есть определенная история успешного создания современной конкурентоспособной продукции. Например, в прошлом году мы изготовили и внедрили в г. Мариуполе в одном из подразделений фирмы «Метинвест» уникальный станок для наплавки валков. В этом году мы выиграли тендер на разработку, изготовление и поставку этому предприятию еще трех серьезных установок. А что касается проблем, то их немало. Одна из них — финансирование заказов. Большинство их выполняем без авансирования работ заказчиком за счет банковских кредитов.



Какова политика кредитования банками в нашей стране всем хорошо известно. Рисуем. По мере роста объемов работ еще больше обострилась проблема кадров. Радикальным, системным ее решением в стране реально никто не занимается.

Многие говорят, что в стране практически прекратили существовать отраслевые институты. А какая главная причина? Нет общегосударственных механизмов, позволяющих отрегулировать эту проблему. Говорить сейчас о восстановлении отраслевых институтов, по-моему, бесперспективно. На мой взгляд, на смену отраслевым институтам должны приходить инновационные мобильные комплексные фирмы, которым правительство должно оказывать соответствующую поддержку, в том числе и за счет создания экспертно-кредитного агентства.

Юрий Анатольевич, расскажите о своих последних разработках. Какие перспективы развития Вашей фирмы?

Приведу несколько примеров работ, выполненных нами за последние годы. Многолетнее сотрудничество у нас сложилось с предприятиями «Укрзалізниці». Мы изготовили для них оборудование индукционного нагрева поверхностей с целью их закалки, рихтовки и посадки. Разработали ряд установок для индукционной наплавки плоских поверхностей (фрикционные планки, автосцепные устройства и др.). Спроектирована и изготовлена установка для газотермического восстановления поверхностей коленчатых валов. Разработана и изготовлена серия автоматов для наплавки различных запчастей железнодорожного транспорта (валики, шпинтоны, подпятники, надрессорные балки, боковые рамы железнодорожных тележек).

Для предприятий горно-металлургического комплекса разработаны наплавочные установки, технология и оборудование вибрационной обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений.

Разработан и изготовлен уникальный кантователь сварных конструкций грузоподъемностью 10 т для Кременчугского завода «Креддормаш». По отзывам производителей он существенно улучшил условия труда сварщиков и повысил производительность.

В Турцию поставлена оборудованная автоматическая линия, автоматические перегрузчики, дозирующие устройства применительно к изготовлению картриджей самоспасателей.

НПФ «ВИСП» активно сотрудничает с предприятиями оборонного комплекса страны. Что касается перспектив развития НПФ «ВИСП», то мы их видим в интенсификации работ по выходу на зарубежные рынки как с поставкой традиционной нашей продукции, так и принципиально нового оборудования и технологий, которые мы разрабатываем совместно с учеными ИЭС им. Е.О. Патона, ИСМ им. Бакуля и других институтов НАН Украины.

Редакция журнала

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА В СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.В. Черкашин¹, О.Л. Міходуй¹, І.П. Кондратенко², О.М. Сізоненко³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

³Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України.

54018, м. Миколаїв, просп. Богоявленський, 43А. E-mail: office.iipt@nas.gov.ua

Розробка і впровадження нових енергозберігаючих технологій відповідає сучасним запитам України. В роботі розглянуто передпосилки, сучасний стан та напрямки розвитку вивчення впливу електромагнітних полів на механічні властивості і напружений стан металевих матеріалів та зварних з'єднань. Показана можливість їх застосування для керування напруженим станом, еволюцією структури, властивостями, подовженням ресурсу зварних конструкцій. Бібліогр. 49.

Ключові слова: електромагнітні технології обробки, електромагнітні поля, зварні з'єднання, конструкції, металеві матеріали, імпульсні іскрові і струмові розряди, електропластичний ефект, напружено-деформований стан, нанодисперсні модифікатори

Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює зростання вимог до металевих матеріалів, комплексу їх основних та спеціальних властивостей, методів їх нероз'ємного з'єднання.

Враховуючи сучасні труднощі України, перспективним резервом покращення стану її промислової індустрії є розробка і впровадження нових енергозберігаючих технологій. Підвищення міцності, пластичності та інших механічних характеристик можливо досягти через комбіновану обробку металевих матеріалів імпульсним електричним струмом (ІЕС) і електромагнітним полем (ЕМП) високої інтенсивності за малий відрізок часу. Результати досліджень електрофізичних процесів, що протікають в металевих матеріалах при дії ЕМП, дають підставу вважати, що засади керування механічними властивостями із застосуванням ЕМП є альтернативою традиційним технологіям, маючи при цьому низку переваг, таких як енергоефективність та технологічність.

Метою статті є аналіз розвитку, сучасного стану та напрямків вирішення проблеми впливу ЕМП на механічні характеристики і напружений стан металевих матеріалів та зварних з'єднань. При цьому питання керування структурою і механічними властивостями рідкого металу із застосуванням ЕМП у процесі зварювання, що є окремим (і досить актуальним) питанням інженерної практики [1], у даній роботі не розглядається.

Перспективи застосування імпульсного іскрового та струмового розрядів для обробки зварних з'єднань. До методів підвищення механічних характеристик металів і сплавів відносяться різні види їх обробки ІЕС та ЕМП [2]. Високовольт-

ний імпульсний розряд в рідині використовується в промисловій технології як джерело динамічного тиску, під дією якого матеріали, що оброблюються, можуть піддаватися руйнуванню, формоутворенню, змінювати структуру і механічні характеристики. Електрогідроімпульсна обробка (ЕГІО) являє собою вплив на об'єкт механічного навантаження, яке ініціюється високовольтним імпульсним розрядом електричного струму в струмопровідному середовищі (воді). Є численні результати, що підтверджують можливість використання ЕГІО для зниження залишкових технологічних напружень. Дослідження впливу ЕГІО на напружено-деформований стан зварних з'єднань показали, що вона зменшує напруження розтягування в зварних конструкціях до 90 % завдяки активації дислокаційних процесів. За результативністю зниження рівня залишкових зварювальних напружень ЕГІО порівняна з високим відпуском [3].

При цьому методу ЕГІО притаманний ряд недоліків, до яких можна віднести необхідність використання металоємних технологічних ємностей з водою, які характеризуються достатньою складністю конструкції за рахунок збільшеної жорсткості, аби протистояти хвилям стиснення — розтягування, що ініціюються електрогідравлічним ефектом.

Водночас ЕГІО є доцільним для використання при виробництві габаритних зварних виробів, наприклад, зварювально-литих станин. В останні роки ЕГІО не набула подальшого розвитку в Україні, що помітно за відсутності відповідних публікацій і пов'язано із скороченням обсягів важкого машинобудування, але має перспективи за

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.В. Черкашин, О.Л. Міходуй, І.П. Кондратенко, О.М. Сізоненко, 2019

умов відновлення темпів зростання вітчизняного виробництва металоконструкцій.

Близькою до ЕГЮ за засобом реалізації (але не за призначенням) можна вважати електроіскрову обробку, поширену в технології машинобудування. При електроіскровій обробці на поверхні заготовки, що входить до складу розрядного контуру і знаходиться в діелектричній рідині (гас, масло) ініціюється розряд ІЕС, під час якого виділяється тепло, що витрачається на плавлення, часткове випаровування і вибуховий викид частинок оброблюваного металу. Подібність електроіскрової обробки і ЕГЮ полягає в тому, що при їх виконанні розряд струму відбувається в рідкому середовищі, а енергія розряду забезпечується ємнісним накопичувачем. При цьому якщо для реалізації ЕГЮ необхідно струмопровідне середовище, то для електроіскрової обробки — діелектричне. Даний метод застосовується при калібруванні, прошивці отворів і фильер, різанні і шліфуванні. Водночас реалізація електроерозійних процесів без застосування струмопровідних і діелектричних середовищ різко розширює можливості застосування електроіскрової обробки великогабаритних металоконструкцій, наприклад, для зміцнення ріжучих поверхонь деталей сільгосптехніки [4]. При цьому можливості даного способу дозволяють реалізовувати процеси наноструктурування поверхневих шарів конструкційних сталей та наплавлених поверхонь, спрямовані на підвищення їх трибологічних характеристик.

Обробка ІЕС використовується для зміцнення поверхонь фрикційного контакту, який визначається взаємодією пари колесо-рейка [5]. Принцип зміцнення рейки полягає в електроіскровому нанесенні покриття дискретного типу з ділянками, що мають різні характеристики твердості, ударної в'язкості та коефіцієнта тертя. Формування дискретного покриття контактної поверхні рейки здійснювали з використанням електроіскрової обробки. Однією з переваг дискретного покриття є його несплошність, яка забезпечує мінімальний рівень залишкових напружень у порівнянні з суцільним покриттям. Нанесення покриття здійснювали за допомогою переміщення електрода з різних металевих матеріалів у формі диска по оброблюваній поверхні. Між електродом і рейкою ініціювали ІЕС заданої тривалості і конфігурації, що забезпечувало дискретний перенос металу з електрода на рейку. Застосування методу забезпечило високі трибологічні характеристики як контактної поверхні рейки, так і пари колесо-рейка [6]. Електроіскрове структуроутворення є перспективним з позиції його реалізації стосовно зварних з'єднань. Розробка електроімпульсних

методів наноструктурування, а так само імплантування наноструктур на заданих ділянках перетину зварного з'єднання представляється перспективним методом підвищення ресурсу металевих конструкцій.

Дослідження електропластичного ефекту, що є базою перспективних технологій обробки зварних з'єднань. Дослідження в галузі фізики твердого тіла, що проводяться з 1960-х рр., дозволили встановити явище різкого підвищення пластичності та зниження опору металу деформації за рахунок одночасної дії активного механічного навантаження і ІЕС високої щільності. Явище було названо електропластичним ефектом (ЕПЕ), а деформація, ініційована ЕПЕ — електропластичною деформацією (ЕПД). Практичне використання ЕПЕ відкрило нові можливості як для технологій механічного формоутворення металів і сплавів, включаючи тугоплавкі [7], так і для регулювання їх напруженого стану [8]. У 1925 р. Хекман, вивчаючи властивості кристалів, висловив ідею про взаємозв'язок між їх механічними, електричними і тепловими характеристиками. Оскільки основними «носіями» електричних властивостей в металах є електрони і зв'язок між атомами здійснюється електростатичними силами, то вплив на енергетичний спектр вільних електронів призводить до зміни механічних властивостей металів [9]. Було досліджено питання прискорення руху дислокацій під дією спрямованого потоку електронів і показано, що таке прискорення може відбуватися за умови, якщо швидкість електронів вище швидкості дислокацій. Було встановлено, що вплив ІЕС викликає стрибок, знижуючий величину деформуючого зусилля, причому це явище спостерігалось лише в області пружно-пластичних деформацій.

Основна мета більшості проведених в 1970–80-і рр. досліджень полягала у вивченні механізму ЕПЕ. Це стало стимулом до вивчення впливу побічних факторів: теплової та механічної (пондеомоторної) дії ІЕС, а також впливу нерівномірності розподілу щільності струму по перетину зразка (скін-ефект) на зниження опору металів деформуванню.

При цьому для розглянутих матеріалів і параметрів ІЕС в наведених вище роботах товщина скін-шару перевищувала діаметр зразків, тобто скін-ефект був практично відсутній.

Результати вивчення впливу пінч-ефекту на реалізацію ЕПЕ показали, що останній визначається напруженістю H магнітного поля та магнітною проникністю матеріалу, а також площею поверхні зразка [10]. Значення H прямо залежить від величини сили струму і зворотно — від перетину зразка. На поверхні зразка внаслідок пінч-ефекту розвивається тиск P , який визначається виразом:

$$P = 0,5\mu_0 H^2, \quad (1)$$

де μ_0 — абсолютна магнітна проникність матеріалу.

Оцінка впливу пінч-ефекту на зниження опору деформації зразків показала, що його внесок не перевищує 0,4...6,0 % межі плинності металевих матеріалів. Це підтверджує його незначний вплив на ЕПД [11].

При проходженні ІЕС через метал відбувається підвищення його температури за рахунок джоулева розігріву. При дії ІЕС зростання внутрішньої енергії в матеріалі визначається тривалістю імпульсу, амплітудою струму і величиною електричного опору. Дисипація теплової енергії в металі може як знизити опір його деформації в момент дії ІЕС внаслідок термічної втрати міцності, так і викликати зміну механічних характеристик [12].

Слід зазначити, що основна спрямованість досліджень впливу електричного струму на пластичну деформацію металів була орієнтована як на встановлення фізичної суті явища, так і на технологічні додатки ЕПЕ в інженерній практиці. Дослідження фізичної моделі ЕПЕ виконані для великої кількості металів і сплавів різних класів, при різних режимах виконання ІЕС, видах навантаження, в широкому діапазоні температур. На даний час існує ряд трактувань і описів механізмів ЕПД та ЕПЕ. Найбільш відомою є дислокаційна модель ЕПЕ, в основі якої лежить електронно-дислокаційний взаємодія, що приводить до зриву дислокацій зі стопорів і до захоплення їх рухомими електронами провідності. Але у роботі [13] запропоновано інше трактування ЕПЕ, у якому за базу приймається градієнтно-дислокаційна модель, де градієнт хімічного потенціалу ϕ (ϕ — мінімальна енергія, необхідна для розриву зв'язку електронів з атомами кристалічної решітки) вакансій в полікристалічних металевих матеріалах є визначальним руху дислокацій в імпульсному електромагнітному полі (ІЕМП). Дислокаційна і градієнтно-дислокаційна фізичні моделі дозволяють пояснити тільки підвищення пластичних властивостей металів. У роботі [14] запропоновано градієнтно-дифузійну фізичну модель, яка дає можливість пояснити основні ефекти, які проявляються в металах при обробці ІЕС. Відповідно до цієї моделі, при впливі ІЕС за рахунок концентрації силових ліній електромагнітного поля на дефектах структури, таких як мікропори, тріщини і розшарування, утворюється не тільки $\text{grad } \phi$ по межах цих дефектів, але також і локалізовані поля термопружних напружень.

Супутній нагрів при обробці ІЕС зразків металу в термопружній області температур приводить до зменшення рівня початкових напружень

розтягування [15]. При аналогічному нагріванні без застосування ІЕС рівень напружень в металі після охолодження до кімнатної температури повертався до початкового рівня. При цьому ефект впливу ІЕС (без урахування джоулева розігріву) знижувався зі збільшенням тривалості окремого імпульсу, а при багаторазовій обробці ІЕС опір матеріалу деформації зростав зі збільшенням кількості розрядів струму. З позицій електронно-дислокаційної взаємодії це пояснюється тим, що при одноразовому впливі ІЕС одиничний імпульс діє на матеріал, що має значний дислокаційний потенціал. При багаторазових режимах впливу попередні імпульси виводять з релаксаційних процесів частину дислокацій і реакція матеріалу на дію ІЕС знижується. Зміна полярності ІЕС також впливає на прояв ЕПЕ. У роботі [16] показано, що при однаковій кількості електрики і амплітуді ІЕС, що пропускаються через навантажений зразок, біполярні імпульси викликають меншу релаксацію (стрибок) напружень, ніж монополярні. Це викликане тим, що послідовні ІЕС різної полярності, ініціюючи рух дислокацій в протилежних напрямках, протидіють один одному, внаслідок чого результуюча їх дії менша, ніж при однополярних ІЕС. Вплив ІЕС на пластичність металів відбувається в області пластичної деформації, що супроводжується скиданням деформуючого зусилля, в той час як в області пружної деформації ЕПЕ не спостерігається. У роботі [17] на базі механізму електропластичної деформації запропоновано метод визначення частини енергії імпульсу електричного струму, яка безпосередньо витрачається на роботу пластичної деформації. Це дозволяє визначати напруження початку пластичної течії, ініційованої ІЕС, для матеріалів різних класів в інтервалі температур 293...4,2 К.

В даний час закономірності ЕПЕ найдетальніше досліджені відповідно до вимог інженерної практики з пошуку ефективних способів збільшення пластичності металевих матеріалів, що застосовуються в промисловості. Для зменшення впливу теплової дії ІЕС та магнітного поля одним з напрямків досліджень ЕПЕ було їх проведення при криогенних температурах [18], що має важливе значення у науковому та прикладному аспектах. Науковий інтерес обумовлений тим, що зі зниженням температури від 293 К до значень, близьких до криогенних, посилюється вплив ІЕС, оскільки в таких температурних умовах електронна в'язкість (через відсутність джоулева тепла) стає головним джерелом зниження рухливості дислокацій, що приводить до змін механічних властивостей металевих матеріалів [19]. Прикладний аспект пов'язаний зі створенням високоенергетичних виробів, які використовують ефект

надпровідності (кріотурбогенераторів, термоядерних реакторів). Специфічна дія ІЕС на реалізацію ЕПЕ при криогенних температурах проявляється в тому, що величина стрибка напружень при дії розряду струму збільшується з пониженням температури випробувань, зростанням амплітуди ІЕС і його тривалості. Проходження ІЕС в області пружних напружень викликає появу залишкової деформації при напруженнях, які в залежності від температури випробувань, параметрів імпульсу і класу матеріалу на 10...35 % менше, ніж його межа плинності. Причому зазначені зміни посилюються зі зниженням температури досліджень від 293 до 4,2 К, а амплітуда ІЕС є більш сильнотіючим фактором, ніж його тривалість [20].

Методи обробки металевих матеріалів і зварних з'єднань електромагнітними полями. На основі результатів досліджень електромагнітної дії ІЕС на механічні характеристики металів і сплавів, розроблено технологічні процеси металообробки. Змінюючи тривалість і енергію ІЕС і ІЕМП, в результаті активації спектру дислокаційних, фазових та інших фізичних процесів можна отримувати вироби і деталі з заданими експлуатаційними характеристиками. Вплив ІЕС та ІЕМП різної тривалості та конфігурації, що реалізовано в різних технологіях металообробки, викликає структурні зміни в металах і сплавах [21], що впливають на їх характеристики. Відзначається підвищення зносостійкості різального інструменту [22], корозійної стійкості [23], зниження концентрації напружень в оброблених деталях і елементах конструкцій, ліквідація тріщин втоми, подовження ресурсу штампованих деталей з легких і спеціальних сплавів. Встановлено, що при оптимальних параметрах електроімпульсних впливів підвищується тимчасовий опір відриву матеріалу, межа витривалості і довговічності без зниження пластичних властивостей матеріалу [24]. Наведені технологічні процеси металообробки є перспективними для підвищення механічних характеристик і експлуатаційних властивостей зварних конструкцій з урахуванням особливостей структури і напружено-деформованого стану зварних з'єднань. Це підтверджується формуванням відповідних дослідних програм у таких європейських дослідних організаціях, як: University of Birmingham (UK), University of Hertfordshire (UK), Imperial College (UK), Katholieke Universiteit Leuven (Belgium), EBF-Dresden (Germany), Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS (Germany). Велика увага дослідженням у даному напрямку приділяється у КНР і Японії, наприклад: Sichuan University, China University of Geosciences, Army Academy of Armed Forces, Process Institute of Inner Mongolia First Machinery

Group, Wuhan University of Technology, Beijing Institute of Technology, Nagoya University.

При експлуатації металевих конструкцій, у тому числі і зварних, під впливом навантажень в металі виникають та розвиваються мікротріщини, які викликають зниження його механічних властивостей, що призводить до руйнування виробів. Проблема «заліковування» таких дефектів є актуальною і в даний час відомо кілька способів її реалізації: відновна термічна обробка (ВТО); механіко-термічна обробка (МТО); дифузійна металізація (ДМ) [7]. Ці методи мають недоліки, до яких можна віднести високе енергоспоживання, обмеженість застосування для великогабаритних металоконструкцій, велика тривалість процесу. Енергетичний вплив на тріщину, що поширюється, може реалізовуватися при її обробці ІЕС і ІЕМП, яка здатна не тільки загальмувати її розвиток, але і підвищити міцність металу в зоні вершини дефекту [25]. Пропускання ІЕС по деталі з крайовою тріщиною супроводжується мікровибухом в її вершині, що призводить до утворення кратера, на видаленні від якого на 5...10 мм метал нагрівається на кілька десятків градусів. Це явище може бути використане для притуплення вершини тріщини. Запропоновано метод заліковування мікротріщин в сталі 65Г і армо-залізі за допомогою схрещених полів ІЕС і ІЕМП. У зоні відновленої сплошності спостерігається диспергування структури при супутньому підвищенні мікротвердості по відношенню до вихідного матеріалу [26].

При циклічних випробуваннях вплив ІЕС і ІЕМП призводить до підвищення опору втомі металевих матеріалів, яке пов'язують із заліковуванням мікротріщин, еволюцією дефектної структури і фазового складу, а також усуненням концентраторів напружень. Встановлено позитивний вплив ІЕС на технологічні напруження розтягування у напилених поверхнях інструментальних сталей [27]. Але наведені результати не знайшли подальшого розвитку.

Аналізуючи вцілому результати досліджень ЕПЕ при регулюванні напружено-деформованого стану металевих матеріалів, слід зазначити, що застосування електромагнітних дій проводилися, в основному, в пластичній області навантаження в зв'язку з орієнтацією на практичне застосування ЕПЕ у технологіях формоутворення. При цьому область пружного деформування металевих матеріалів при електромагнітних діях залишається маловивченою [28]. Водночас дослідження особливостей релаксації пружних напружень в металах і сплавах при їх електромагнітній обробці є актуальним для регулювання напруженого стану зварних конструкцій. Результати досліджень впли-

ву ІЕС і ІЕМП на керування залишковими зварювальними напруженнями показали, що реалізація ЕПЕ при обробці зварних з'єднань обмежена особливостями формування розрядного контуру, до складу якого входить конструкція, що обробляється. Так, в більшості випадків розміри зварної конструкції не дозволяють забезпечити необхідну щільність струму j в зоні дії ІЕС. Винятком є обробка ІЕС малогабаритних зварних виробів, наприклад, наплавлених поверхонь деталей різального інструменту, перетини яких дозволяють забезпечувати значення щільності струму, необхідні для реалізації ЕПЕ. Досліджували вплив ІЕМП на зниження залишкових напружень стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву, використовуючи систему плоских індукторів, жорстко закріплених на поверхні пластин, що оброблюються і входять до складу розрядного контуру [29]. Проведені дослідження показали принципову можливість зниження зварювальних напружень при впливі ІЕМП, хоча їх початковий рівень після обробки знизився не більше, ніж на 30 %. Вплив ІЕМП на зниження залишкових напружень в зварних і наплавлених зразках низьковуглецевих сталей, що базується на інтенсифікації динамічного ефекту магнітострикції [30], забезпечив зниження початкового рівня напружень до 40 %. При цьому особливості закріплення зварних з'єднань впливають на ефективність впливу ІЕМП. Так, при обробці зразків в умовах жорсткого закріплення релаксація залишкових зварювальних напружень проходить більш інтенсивно, ніж в умовах вільного обпирання.

У роботі [31] проведено дослідження дії електромагнітних впливів на зміну механічних властивостей зварних з'єднань вуглецевих і низьколегованих сталей, які показали істотне збільшення значень ударної в'язкості після обробки зразків сталей марки сталь 20 і 09Г2С при збереженні їх характеристик тимчасового опору розриву. Пояснення отриманих результатів засновано на теорії електронно-дислокаційної взаємодії, а також магнітопружною взаємодією міждоменних кордонів (стінок Блоха) з дислокаціями, що стимулюють їх рух при намагнічуванні [32]. Неоднозначні результати досліджень впливу ІЕМП на зміну залишкових зварювальних напружень показано в роботі [33]. Так, залишкові напруження в зразках сталей Ст2пс і 20ХМФЛ в активній зоні знижуються на 3...25 %, при цьому в реактивній зоні підвищуються до 15 %. Разом з тим ІЕМП знижує напруження II роду до рівня, що забезпечується відпаленням при температурі 1060 °С, а також призводить до більш рівномірного розподілу α -фази за обсягом обробленого металу.

Виходячи з представлених результатів за оцінкою впливу ІЕС і ІЕМП на регулювання напру-

жено-деформованого стану зварних з'єднань із сталей та сплавів алюмінію, можна зробити висновки, що, незважаючи на очевидний ефект, максимальне зниження початкового рівня напружень не перевищує 40 %. Перспективною видається розробка та вдосконалення енергоефективних технологій електромагнітних впливів на зварні з'єднання, наплавленні та напиленні поверхні, за яких зниження напружень наближалось б до 100 %.

Реалізація ЕПЕ при прямому пропусканні ІЕС скрізь елементи металоконструкцій є досить складним завданням через необхідність забезпечення щільності струму $j \geq 10^3$ А/мм² в перетинах, площа яких значно перевищує 100 мм². Складність пов'язана з розсіюванням силових ліній струму, що має місце вже на незначній відстані від точок підключення розрядного контуру до деталі. Мінімізувати фактор розсіювання можливо за рахунок локалізації ділянки проходження струму в зоні обробки, а його щільність j , що необхідна для реалізації ЕПЕ, досягається за рахунок динамічного контакту електроду, що проводить струм, з поверхнею, яка обробляється. Дану схему дії ІЕС досліджували стосовно новітнього методу неруйнівного контролю напружено-деформованого стану зварних з'єднань [34], де показано, що додаток динамічного навантаження до електроду в період дії ІЕС збільшує надійність контакту електроду з поверхнею зварного з'єднання. При цьому динамічне навантаження інтенсифікує рух і розмноження дислокацій, яке визначає ступінь пластичної деформації полікристалічних структур в умовах дії ІЕС. Керуючий механізм впливу динамічного навантаження, розглянутий у фізичній моделі переривчастої текучості металу при криогенних температурах [7], поширено на область температур в діапазоні 273...293 К стосовно магніто-імпульсної формозміни феромагнітних матеріалів [35]. Встановлено, що малий стрибок напруження, що викликається динамічним або тепловим навантаженням [36], служить ініціатором та синхронізатором пластичної деформації, яка визначається масовим проривом бар'єрів дислокаціями по всьому об'єму полікристалічної структури, яка піддається активному механічному навантаженню. При цьому спрямований рух електронів провідності в момент дії ІЕС сприяє просуванню дислокацій, збільшуючи ступінь пластичної деформації матеріалу у порівнянні з випадком застосування чисто механічного навантаження. У роботі [37] представлено результати досліджень впливу механічного та електромагнітного ефектів при сумарному і розділеному впливах ІЕМП та механічних імпульсів тиску на рухливість крайових дислокацій в кристалах NaCl і LiF. В якості

характеристики імпульсних впливів на рухливість дислокацій брали довжину l їх пробігу. Встановлено, що середня довжина пробігу $\langle l \rangle$ значно зростає при спільному впливі ІЕМП та імпульсів механічного навантаження в порівнянні зі значеннями $\langle l \rangle$, що реєструються при дії кожного з факторів окремо. Зростання $\langle l \rangle$ при впливі струму пов'язано з підвищенням інтенсивності електромагнітного накачування кристала, а суперпозиція імпульсних впливів різної природи ініціює в кристалах досить протяжні за часом релаксаційні процеси, що впливають на їх напружений стан. Дана фізична модель є справедливою і для металевих полікристалічних структур, що знайшло своє підтвердження в роботі [38], де представлено результати оцінки впливу імпульсів струму та механічного навантаження σ на швидкість пластичної деформації $\dot{\epsilon}$ в зразках Zn. Показано, що вплив ІЕС при значенні щільності струму j вище порогового збільшує швидкість v дислокацій, що рухаються у напрямку дії струму. Збільшення $j > 1,0 \text{ кА/мм}^2$ ініціює вказаний процес, причому вплив ІЕС прискорює рух дислокацій завдяки їх взаємодії з носіями заряду (електронами).

На основі аналізу попередніх досліджень було обґрунтовано можливість спільного використання електроімпульсних і механічних впливів для обробки зварних конструкцій з метою продовження їх ресурсу [39], що послужило базою для створення нового виду обробки зварних з'єднань — електродинамічної (ЕДО) [40]. При ЕДО метал піддається об'ємному електродинамічному впливу, який характеризується спільним протіканням електроімпульсного і динамічного процесів, перший з яких викликає ЕПЕ в зоні обробки, а другий — формування хвиль напружень із заданою амплітудою, пластичне деформування та подрібнення структури металу. Взаємодія хвиль напружень зі статичним полем залишкових зварювальних напружень може ініціювати релаксацію останніх, наслідком чого є зниження їх значень. Локалізація ІЕС в зоні деформування зменшує фактор розсіювання силових ліній струму, забезпечуючи тим самим досягнення порогової щільності, яка є необхідною умовою реалізації ЕПЕ. Взаємодія складових електродинамічного впливу в період проходження ІЕС через метал визначає ефективність впливу ЕДО на залишкові напруження, еволюцію структури, точність і довговічність зварних конструкцій із легких сплавів [41].

Базуючись на механізмі електрон-дислокаційної взаємодії для створення умов кристалізації, яка забезпечує формування дрібнозеренної структури, перспективною вважається розробка технології модифікування зварного з'єднання нано-

структурними високодисперсними матеріалами, що буде предметом подальших досліджень новітніх методів обробки конструкційних матеріалів.

Для оцінки впливу електрофізичної та динамічної складових електродинамічних дій, що визначають зміну характеристик залишкових зварювальних напружень, розроблено математичну модель процесу ЕДО. Це дозволило провести оптимізацію режимів обробки з метою керування напружено-деформованим станом зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг6 [42–44]. Удосконалення існуючої моделі дозволить проводити розрахунок напружено-деформованого стану зварних конструкцій в умовах супутнього підігріву зварного шва, при різних схемах закріплення конструкції, що обробляється, та при дії магнітного поля.

Враховуючи результати роботи [8], де показано, що супутній підігрів стимулює релаксацію напружень при електроімпульсній обробці тонких стрижнів зі сталі, перспективними є дослідження ефективності ЕДО зварного шва, що охолоджується, яку виконують впродовж термодформаційного зварювального циклу. Розробка гібридних технологій (автоматичне зварювання + ЕДО) дозволить знизити енергоємність процесу обробки, зменшити робочий час виготовлення металевої конструкції при підвищенні її якості [45].

Серед новітніх засобів зовнішнього впливу на якість металовиробів активно розвиваються дослідження дії постійних магнітних полів (ПМП), що накладаються на розплав в процесі його твердіння під час отримання литих заготовок та деталей із неферромагнітних матеріалів, наприклад, сплавів алюмінію. Визначено, що дія ПМП сприяє еволюції їх структури, підвищення спротиву корозійного ураження. Механізм структуроутворення ґрунтується на проявах дії ПМП — зменшення структурних складових, зміни морфології інтерметалідних фаз, підвищення їх мікротвердості, зміна їх розмірів та конфігурації, що є відповідним процесам твердіння при високих швидкостях охолодження [46]. Слід зазначити, що рідкий метал ванни при зварюванні плавленням є, за певних умов, подібним за властивостями (при значно меншому об'ємі) металу при литті, тобто придатним для обробки ПМП. Враховуючи умови формування заднього фронту ванни, перспективною є обробка ПМП вистигаючого металу зварного шва в якості засобу керування напруженим станом і структурою металу з'єднання. Це може стимулювати створення перспективного методу обробки ПМП зварних з'єднань у продовж термодформаційного зварювального циклу та спонукати розробку гібридних технологій (автоматичне зварю-

вання + обробка ПМП») для неферомагнітних металевих матеріалів на основі Al, Mg, Fe.

Модифікування металів і сплавів введенням в розплав невеликих кількостей наномодифікаторів різко впливає на кристалізацію, наприклад, викликає диспергування структурних складових та зміни їх розподілу. В результаті модифікування покращуються механічні властивості сплаву. Якісними характеристиками модифікаторів є розмір окремих тугоплавких частинок, його хімічна чистота та ціна. Певну кількість модифікаторів виготовляють методами порошкової металургії, або із застосуванням шарових млинів. Відомо, що висковольтний електричний розряд (ВЕР) в дисперсній системі металевий порошок–газ дозволяє не тільки подрібнювати частинки металу, а й ініціювати протікання хімічних реакцій. При використанні ВЕР можливість виготовлення високодисперсних наноструктурованих модифікаторів та їх ціна є привабливою для комерційного застосування в металообробці. Технологія диспергування із застосуванням ВЕР подібна за діючим механізмом методу ЕГЮ, що показаний вище. Слід зазначити, що було розроблено наукові засади ВЕР обробки у газі сумішей порошків Al, Ti при яких здійснюється диспергування та синтез тугоплавких складових, зокрема TiC , $AlTi_3$, $AlTi$, Al_2Ti , Al_3Ti , Ti_3AlC , Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC та лонсдейліта [47, 48]. Окрім ливарного виробництва, наномодифікування є застосовним в технологіях зварювання та наплавлення шляхом введення наночастинок тугоплавких хімічних сполук в зварювальну ванну в процесі лазерного і електрошлакового зварювання, електронно-променевого наплавлення. При напавленні жаростійкими сплавами на основі заліза, нікеля та хрому і вуглецевими сталями, які модифіковані наночастинами, підвищується стійкість напавленого інструменту, який зазнає циклічного температурно-силового впливу. При модифікуванні наночастинами усуваються зони транскристалізації в напавленому або зварному металі, зменшуються розміри дендритів, поліпшується морфологія і топографія зміцнюючих фаз, що сприяє підвищенню жароміцності та опору втомі сплавів [49]. Є певні обмеження наномодифікування металу при автоматичному і ручному дуговому зварюванні. Основною проблемою застосування нанокомпозитів при зварюванні плавленням є проблема введення останніх у зварювальну ванну. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є розробка новітніх технологій виготовлення зварювальних і наплавлювальних матеріалів (електроди, флюси, порошкові драти) із додаванням високодисперсних наноструктурних модифікаторів, отриманих на базі енерго-

фективного методу ВЕР. Це є новим підходом до підвищення службових характеристик зварних конструкцій, що базується на електроімпульсних процесах.

Таким чином, досвід багаторічних досліджень впливу електромагнітних технологій на метали і сплави доводить можливість їх застосування для керування напруженим станом, еволюцією структури, трибологічними і механічними характеристиками, подовженням ресурсу зварних конструкцій в різних галузях машинобудування, металургійного комплексу, авіакосмічної та військової промисловості.

Перелік літератури

1. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматическая сварка*, **3**, 24–29.
2. Дубоделов В.І., Горюк М.С. (2018) Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2–х т. Т.2. Київ, Академперіодика, сс. 24–50.
3. Опара В.С., Резникова Л.Я., Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю. (1998) Электрогидроимпульсная обработка – универсальный и эффективный метод повышения служебных характеристик металлоконструкций с технологическими напряжениями. *Тяжелое машиностроение*, **9**, 7–9.
4. Хромов В.Н., Кузнецов И.С., Петрашов А.С. (2009) Электроискровая обработка поверхностей деталей для создания износостойких объемных наноструктурных покрытий на режущих деталях сельхозтехники. *Вестник ОрелГАУ*, **1**, 6–8.
5. Узлов И.Г. (2003) Прогрессивные процессы производства и качество железнодорожных колес. *Сталь*, **5**, 69–72.
6. Волкогон В.М., Аврамчук С.К., Стрилец Е.В. (2005) Формирование упрочняющих покрытий под действием мощного электрического разряда. *Материалы 5-ой Междунар. научн.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий»*, Ялта, 21–24 мая, сс. 48–51.
7. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработки и новые материалы*. Москва, МГИУ.
8. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. (2004) Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, **4**, 60–67.
9. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.
10. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Гуревич Л.И. (1990) Действие импульсов электрического тока на подвижность дислокаций в монокристаллах Zn. *Металлофизика*, **12(4)**, 11–15.
11. Okazaki K., Kagana M., Conrad H. (1979) Evaluation of the contour, of skin, pinch and heating to the electroplastic effect in titanium. *Scr: Metal*, **3**, 473–500.
12. Braunovic M. (1986) The effect of electric current on the stress relaxation of aluminium wire conditions. *Strength metals and alloys (ICSMA 7)*. Oxford e.a., **1**, 619–624.
13. Громов В.Е. (1989) О механизмах электропластического эффекта в металлах. *Известия вузов. Черная металлургия*, **9**, 71–75.
14. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. (1984) Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность прово-

- дящих материалов. *Известия Академии Наук СССР. Металлы*, **4**, 184–187.
15. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А., Олисов А.Н. (2006) Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока. *Проблемы прочности*, **1**, 116–127.
 16. Троицкий О.А., Калымбетов П.У. (1981) Зависимость электропластического эффекта в цинке от длительности отдельных импульсов. *Физика металлов и металловедение*, **51**, **5**, 1056–1059.
 17. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С. (1997) Определение энергии электропластической деформации металлов. *Проблемы прочности*, **4**, 38–43.
 18. Стрижало В.А., Воробьев Е.В. (2003) Скачкообразная деформация металла в условиях воздействия импульсного магнитного поля и криогенных температур. *Там же*, **1**, 137–142.
 19. Воробьев Е.В., Анпилогова Т.В. (2007) Нестабильность деформации и прочность конструкционных сплавов в условиях концентрации напряжений и криогенных температур. *Там же*, **2**, 153–156.
 20. Dolgin A.M., Natsik V.D. (1991) Criteria of instability and kinetics of jumps under unstable low temperature plastic flow. *Acta. Univ. Carol. Math. and Phys.*, **32**(1), 77–88.
 21. Liping Ma, Wenxiang Zhao, Zhiqiang Liang et al. (2014) An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Material Science & Engineering*, **A0**, 16–25.
 22. Batainen O., Klamecki B., Koepe B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. Mater. Process. Tech.*, **13**, 190–196.
 23. Babutsky A., Chrysanthou A., Ioannou J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of materials*, **4**, 387–391.
 24. Семашко Н.А., Крупский Р.Ф., Купов А.В. (2004) Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов. *Материаловедение*, **7**, 29–33.
 25. Семакин Е.В., Чиракидзе Д.З., Целлермаер В.Я. (1997) Электростимулированное восстановление долговечности сварных соединений: эксперимент и модель. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, **6**, 48–51.
 26. Баранов Ю.В. (2003) Дефектообразование и залечивание дефектов в металлических материалах импульсным электрическим током. *Сб. докладов конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов»*. Материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, сс. 7–12.
 27. Jaewoong Jang, Yang Ju, Yasuyuki Morita, Yuki Toku (2016) Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al alloy. *21-st European Conference on Fracture, ECF21, 20–24 June 2016, Catania, Italy*, 2989–2993.
 28. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. (2007) Моделирование релаксации напряжений при действии импульсного электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, **2**, 113–120.
 29. Степанов Г.В., Бабуцкий А.М., Мамеев И.А. и др. (2011) Перераспределение остаточных сварочных напряжений в результате обработки импульсным электромагнитным полем. *Там же*, **3**, 123–131.
 30. Yanli Song, Lin Hua (2012) Mechanism of Residual Stress Reduction in Low Alloy Steel by a Low Frequency Alternating Magnetic Treatment. *J. Mater. Sci. Technol.*, **28**(9), 803–808.
 31. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Change of mechanical properties of welded joints of carbon and low-alloy steels under influence of electromagnetic effects. *The Paton Welding J.*, **7**, 27–30.
 32. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr₂Ni₄A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **4**, 218–224.
 33. Царюк А.К., Скульский В.Ю., Моравецкий С.И., Сокирко В.А. (2008) Влияние электромагнитной обработки на остаточные сварочные напряжения в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, **9**, 28–32.
 34. Lobanov L., Pivtorak V., Paschin N. et al. (2014) Application of local current pulses for determination and control of residual stresses. *Advanced Materials Research*, **9**, 386–391.
 35. Гнатов А.В. (2012) Магнито-импульсные технологии для бесконтактной рихтовки корпусных элементов транспортных средств. *Научовий вісник ХДМА*, **7**(2), 108–114.
 36. Hodowan J., Ravichndram G., Rosakis A., Rosakis P. (2000) Partition of plastic work into heat and stored energy in metal. *Exp. Mech.*, **40**(2), 113–123.
 37. Альшиц В.И., Дарьинская Е.В., Легеньков М.А., Морозов В.А. (1999) Движение дислокаций в кристаллах NaCl при комбинированном воздействии механических и электромагнитных импульсов, создаваемых электронным пучком. *Физика твердого тела*, **41**(11), 2004–2006.
 38. Громов В.Е., Гуревич Л.И., Курилов В.Ф., Ерилова Т.В. (1989) Влияние импульсов тока на подвижность и размножение дислокаций в Zn. *Проблемы прочности*, **0**, 48–53.
 39. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Покляцкий А.Г. (2010) Влияние электроимпульсной обработки на остаточные формоизменения тонколистовых сварных конструкций (Обзор). *Там же*, **3**, 13–17.
 40. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Скульский В.И. (2005) Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей. *Там же*, **5**, 13–17.
 41. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhiltsov A.V., Mikhodui O.L. (2018) Development of Post-weld Electrodynamic Treatment Using Electric Current Pulses for Control of Stress-Strain States and Improvement of Life of Welded Structures. *Materials Performance and Characterization*, **7**, 4, 941–955. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>.
 42. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В. та ін. (2016) Нестационарні електрофізичні процеси в системах для зниження залишкових напружень зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*, **6**, 10–19.
 43. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. (2017) Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Там же*, **5**, 83–88.
 44. Лобанов Л.М., Пашин М.О., Миходуй О.Л. та ін. (2017) Вплив ударної дії електрода – індентора на напружено-деформований стан сплаву АМг6 при електродинамічній обробці. *Проблемы прочности*, **3**, 30–42.
 45. Лобанов Л.М., Пашин М.О., Півторак В.А., Волков С.С. (2015). *Спосіб усунення залишкових напружень та деформаций зварних з'єднань*, Україна, Пат. 110273.
 46. Дубоделов В.І., Середненко О.В., Затуловський А.С., Середненко В.О. (2018) Підвищення властивостей сплавів алюмінію дією постійного магнітного поля на розплав при твердненні. *Металознавство та обробка металів*, **4**, 3–8.
 47. Сизоненко О.Н., Липян Е.В., Торпаков А.С. (2015) К вопросу об оптимизации параметров высоковольтной импульсной обработки. *Наукові нотатки*, **6**, 203–207.
 48. Зайченко А.Д., Жданов О.О., Торпаков А.С., Сизоненко О.М. (2018) Вплив високдисперсного модифікатора на структуру та властивості нікелевого сплаву СМ88У. *Металознавство та обробка металів*, **4**, 55–57.
 49. Сергієнко Р.А., Верховлюк А.М. (2018) Обработка ливарных сплавов металлическими наночастицами. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2-х т. Т. 2. Київ, Академперіодика, сс. 88–103.

References

1. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal refining in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25–28.
2. Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018) *Application of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena for intensification of effect on metal systems:*

- World and Ukrainian experience*. In: Materials science: Achievements and perspectives. In: 2 Vol. Vol. 2. Kyiv, Akadempriodyka, 24-50 [in Ukrainian].
3. Opara, V.S., Reznikov, L.Ya., Onatskaya, N.A., Demidenko, L.Yu. (1998) Electrohydropulsed treatment as a universal and effective method for improvement of service characteristics of metal structures with technological stresses. *Tyazholoe Mashinostroenie*, **0**, 7-9 [in Russian].
 4. Khromov, V.N., Kuznetsov, I.S., Petrashov, A.S. (2009) Electrosark machining of surfaces of parts for producing wear-resistant volume nanostructural coatings on cutting parts of farming machines. *Vestnik OrelGAU*, **1**, 6-8 [in Russian].
 5. Uzlov, I.G. (2003) Advanced processes of production and quality of railway wheels. *Stal*, **5**, 69-72 [in Russian].
 6. Volkogon, V.M., Avramchuk, S.K., Strilets, E.V. (2005) Formation of strengthening coatings under action of high-power electric discharge. In: *Proc. of 5th Int. Sci.-Techn. Conf. on Surface Engineering and Renovation of Products (Yalta, 21-24 May, 2005)*, 48-51.
 7. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Yu.S. (2001) *Physical principles of electropulse and electroplastic machining and new materials*. Moscow, MGIIU [in Russian].
 8. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in long rod, caused by pulse electric current of high density. *Problemy Prochnosti*, **4**, 60-67 [in Russian].
 9. Strizhalo, V.A., Novogradsky, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account the effect of electromagnetic fields*. Kiev, IPS [in Russian].
 10. Zuev, L.B., Gromov, V.E., Gurevich, L.I. (1990) Effect of electric current pulses on dislocation mobility in single crystals Zn. *Metallofizika*, **12(4)**, 11-15 [in Russian].
 11. Okazaki, K., Kagana, M., Conrad, H. (1979) Evaluation of the contour, of skin, pinch and heating to the electroplastic effect in titanium. *Ibid.*, **3**, 473-500.
 12. Braunovic, M. (1986) The effect of electric current on the stress relaxation of aluminium wire conditions. *Strength Metals and Alloys* (ICSMA 7), Oxford, **1**, 619-624.
 13. Gromov, V.E. (1989) On mechanisms of electroplastic effect in metals. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **0**, 71-75 [in Russian].
 14. Beklemishev, N.N., Koryagin, N.I., Shapiro, G.S. (1984) Effect of local heterogeneous pulsed electromagnetic field on plasticity and strength of conducting materials. *Izv. AN SSSR. Metall.*, **4**, 184-187 [in Russian].
 15. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A., Olisov, A.N. (2006) Analysis of process of tensile stress relaxation under electric current effect. *Problemy Prochnosti*, **1**, 116-127 [in Russian].
 16. Troitsky, O.A., Kalymbetov, P.U. (1981) Dependence of electroplastic effect in zinc on duration of separate pulses. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **51(5)**, 1056-1059 [in Russian].
 17. Strizhalo, V.A., Novogradsky, L.S. (1997) Determination of energy of electroplastic deformation of metals. *Problemy Prochnosti*, **4**, 38-43 [in Russian].
 18. Strizhalo, V.A., Vorobiov, E.V. (2003) Stepwise deformation of metal under conditions of effect of pulsed magnetic field and cryogenic temperatures. *Ibid.*, **1**, 137-142 [in Russian].
 19. Vorobiov, E.V., Anpilogova, T.V. (2007) Instability of deformation and strength of structural alloys under conditions of stress concentration and cryogenic temperatures. *Ibid.*, **2**, 153-156 [in Russian].
 20. Dolgin, A.M., Natsik, V.D. (1991) Criteria of instability and kinetics of jumps under unstable low temperature plastic flow. *Acta Univ. Carol. Math. and Phys.*, **32(1)**, 77-78.
 21. Liping Ma, Wenxiang Zhao, Zhiqiang Liang et al. (2014) An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Mater. Sci. & Engin.*, **A0**, 16-25.
 22. Batainen, O., Klamecki, B., Koepke, B. (2003) Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *J. Mater. Process. Tech.*, **3**, 190-196.
 23. Babutsky, A., Chrysanthou, A., Ioannou, J. (2009) Influence of pulsed electric treatment on corrosion of structural metals. *Strength of Materials*, **4**, 387-391.
 24. Semashko, N.A., Krupsky, R.F., Kupov, A.V. (2004) Acoustic emission in electropulsed deformation of titanium alloys. *Materialovedenie*, **7**, 29-33 [in Russian].
 25. Semakin, E.V., Chirakidze, D.Z., Tsellermayer, V.Ya. (1997) Electric simulation restoration of service life of welded joints: Experiment and model. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **6**, 48-51 [in Russian].
 26. Baranov, Yu.V. (2003) Formation of defects and healing of defects in metallic materials by pulsed electric current. In: *Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. on Effect of Electromagnetic Fields on Plasticity and Strength of Materials (Voronezh)*, 17-12.
 27. Jaewoong Jang, Yang Ju, Yasuyuki Morita, Yuki Toku (2016) Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al alloy. In: *Proc. of 21st Europ. Conf. on Fracture, ECF21 (20-24 June 2016, Catania, Italy)*, 2889-2993.
 28. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I. (2007) Modeling of stress relaxation under effect of pulsed electric current of high density. *Problemy Prochnosti*, **2**, 113-120 [in Russian].
 29. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. et al. (2011) Redistribution of residual welding stresses as a result of treatment by pulsed electromagnetic field. *Ibid.*, 123-131 [in Russian].
 30. Yanli Song, Lin Hua (2012) Mechanism of residual stress reduction in low alloy steel by a low frequency alternating magnetic treatment. *J. Mater. Sci. Technol.* **28(9)**, 803-808.
 31. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Change of mechanical properties of welded joints of carbon and low-alloy steels under influence of electromagnetic effects. *The Paton Welding J.*, **7**, 27-30.
 32. Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo et al. (2019) Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **4**, 218-224.
 33. Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Moravetsky, S.I., Sokirko, V.A. (2008) Influence of electromagnetic treatment on residual welding stresses in welded joints of carbon and low-alloyed steels. *The Paton Welding J.*, **9**, 22-25.
 34. Lobanov, L., Pivtorak, V., Pashchin, N. et al. (2014) Application of local current pulses for determination and control of residual stresses. *Advanced Mater. Research*, **90**, 386-391.
 35. Gnatov, A.V. (2012) Magnetic pulsed technologies for contact-less dressing of hull components of transport vehicles. *Maukovyi Visnyk KhDMA*, **7(2)**, 108-114 [in Russian].
 36. Hodowant, J., Ravichndram, G., Rosakis, P. (2000) Partition of plastic work into heat and stored energy in metal. *Exp. Mech.*, **40(2)**, 113-123.
 37. Alshits, V.I., Dariinskaya, E.V., Legenkov, M.A., Morozov, V.A. (1999) Dislocation mobility in NaCl crystals under combination impact of mechanical and electromagnetic pulses, formed by electron beam. *Fizika Tvyordogo Tela*, **41(11)**, 2004-2006 [in Russian].
 38. Gromov, V.E., Gurevich, L.I., Kurilov, V.F., Erilova, T.V. (1989) Effect of current pulses on mobility and multiplication of dislocations in Zn. *Problemy Prochnosti*, **0**, 48-53 [in Russian].
 39. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Poklyatsky, A.G. (2010) Effect of electric pulsed treatment on residual forming of thin sheet welded structures (Review). *Ibid.*, **3**, 13-17 [in Russian].
 40. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Skulsky, V.Yu. (2005) Effect of electrodynamic treatment on stress-strain state of heat-resistant steels. *Ibid.*, **5**, 13-17 [in Russian].
 41. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V., Mikhodui, O.L. (2018) Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials Performance and Characterization*, **7**, Issue 4, <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>.

42. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V. et al. (2016) Nonstationary electrophysical processes in systems for reduction of residual stresses in welded joints. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 10-19 [in Ukrainian].
43. Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V., Pashchin, M.O., Vasyuk, V.V. (2017) Selection of parameters of electromechanical converter of induction type for electrodynamic treatment of welded joints. *Ibid.*, **5**, 83-88 [in Ukrainian].
44. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Mikhoduj, O.L. et al. (2017) Effect of impact action of electrode-indentor on stress-strain state of AMg6 alloy in electrodynamic treatment. *Problemy Prochnosti*, **3**, 30-42 [in Ukrainian].
45. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Pivtorak, V.A., Volkov, S.S. (2015) *Method of removal of residual stresses and strains of welded joints*. Ukraine Pat. 110273 [in Ukrainian].
46. Dubodelov, V.I., Serednenko, O.V., Zatulovsky, A.S., Serednenko, V.O. (2018) Improvement of properties of aluminium alloys by action of constant magnetic field on melt in solidification. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **4**, 3-8 [in Ukrainian].
47. Sizonenko, O.N., Lipyan, E.V., Torpakov, A.S. (2015) To problem of parameter optimization by high-voltage pulsed treatment. *Naukovi Notatky*, **6**, 203-207 [in Russian].
48. Zajchenko, A.D., Zhdanov, O.O., Torpakov, A.S., Syzonenko, O.M. (2018) Influence of high-dispersed modifier on structure and properties of SM88U nickel alloy. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **4**, 55-57 [in Ukrainian].
49. Serhienko, R.A., Verkhovlyuk, A.M. (2018) Treatment of cast alloys by metallic nanoparticles. In: *Materials science: Achievements and perspectives. In: 2 Vol. Vol. 2. Kyiv, Akadempriodyka*, 88-103 [in Ukrainian].

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПРИ СВАРКЕ И В РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Л.М. Лобанов¹, Н.А. Пашчин¹, А.В. Черкашин¹, О.Л. Миходуй¹, И.П. Кондратенко², А.Н. Сизоненко³

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт электродинамики НАН Украины. 03057, г. Киев, просп. Победы, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

³Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины.

54018, г. Николаев, просп. Богоявленский, 43А. E-mail: office.iipt@nas.gov.ua

Разработка и внедрение новых энергосберегающих технологий отвечает современным требованиям Украины. В работе рассмотрены предпосылки, современное состояние и направления развития изучения влияния электромагнитных полей на механические свойства и напряженное состояние металлических материалов и сварных соединений. Показана возможность их применения для управления напряженным состоянием, эволюцией структуры, свойствами, продлением ресурса сварных конструкций. Библиогр. 49.

Ключевые слова: электромагнитные технологии обработки, электромагнитные поля, сварные соединения, конструкции, металлические материалы, импульсные искровые и токовые разряды, электропластический эффект, напряженно-деформированное состояние, нанодисперсные модификаторы

PROSPECTS OF APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN WELDING AND RELATED PROCESSES

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchin¹, O.V. Cherkashyn¹, O.L. Mikhoduy¹, I.P. Kondratenko², O.M. Sizonenko³

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 56 Pobedy Ave. 03057, Kyiv of the NAS of Ukraine, Ukraine.

E-mail: ied1@ied.org.ua

³Institute of pulse processes and technologies of the NAS of Ukraine.

43a Bohoyavlensky Ave., 54018, Mykolayiv, Ukraine. E-mail: office.iipt@nas.gov.ua

Development and introduction of new energy-saving technologies meets the modern demands of Ukraine. In the paper background, current state and directions of development of studying the influence of electromagnetic fields on mechanical properties and the stressed state of metal materials and welded joints are considered. The possibility of their application for control of the stressed state, the evolution of structure, properties, elongation of the life of welded structures is shown. 49 Ref.

Keywords: electromagnetic treatment technologies, electromagnetic fields, welded joints, structures, metal materials, pulsed sparks and current discharges, electroplastic effect, stress-strain state, nanodispersed modifiers

Надійшла до редакції 26.02.2019

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А.Г. Покляцкий

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определены оптимальные параметры режимов сварки трением с перемешиванием широко используемых при изготовлении сварных конструкций алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной 0,8...3,0 мм. Показано, что качественное формирование швов можно обеспечить при погружении инструмента в свариваемый металл на глубину 0,10...0,15 мм за счет правильного выбора частоты вращения инструмента и скорости сварки. Установлена взаимосвязь между суммарным содержанием легирующих и модифицирующих элементов в свариваемом алюминиевом сплаве, скоростью сварки и частотой вращения инструмента. Определен диапазон оптимальных соотношений, выражающих длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в котором обеспечивается качественное формирование швов тонколистовых алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, 1460, АМг5М, 1201 и АМг6М. Получены формулы, отражающие зависимости в виде степенных функций, ограничивающие этот диапазон и позволяющие рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2...8,4 % легирующих и модифицирующих элементов. Показаны характерные дефекты, образующиеся в швах при отклонении указанных параметров от оптимального диапазона. Библиогр. 18, рис. 5.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием, скорость вращения инструмента, скорость сварки, характерные дефекты

Сварка трением с перемешиванием (СТП), являющаяся одним из новейших способов получения неразъемных соединений в твердой фазе, находит все более широкое применение в судостроении, при изготовлении наземного и воздушного транспорта, космической техники и т. п. [1–4].

Образование шва в результате нагрева за счет трения до пластического состояния, перемешивания и пластического деформирования небольшого объема металла соединяемых деталей в замкнутом пространстве, обеспечивает некоторые преимущества этого процесса по сравнению со сваркой плавлением. В первую очередь это возможность избежать дефектов в виде горячих трещин, пор, макровключений оксидной пленки и т. п., обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла. Кроме того, сварка алюминиевых сплавов осуществляется без применения защитного газа и присадочного материала и позволяет избежать ультрафиолетового излучения, выделений дыма и паров металла. При этом обеспечиваются высокие механические свойства соединений, а степень разупрочнения основного материала и деформирование сварных конструкций снижаются [3, 5–8].

Однако как и при любом способе сварки, получить бездефектные соединения при СТП удастся только при определенных параметрах процесса. Неправильный выбор или отклонение их от оптимального значения может приводить к образова-

нию характерных поверхностных или внутренних дефектов в виде грат, несплавлений и несплошностей [9–11].

Основными параметрами процесса СТП, кроме конструктивных особенностей рабочих поверхностей инструмента, принято считать угол наклона инструмента относительно вертикальной оси, усилие прижатия инструмента к поверхностям соединяемых деталей, величину погружения бурта инструмента и глубину проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл, а также скорости вращения и его линейного перемещения (скорости сварки) [5, 9].

Проведенные зарубежными специалистами исследования показали, что сварку необходимо выполнять «углом вперед», отклоняя инструмент под небольшим углом от вертикальной оси. При этом за счет прикладываемого к инструменту усилия в вертикальной плоскости его бурт незначительно погружается в свариваемый металл и удерживается в плотно прижатом к нему состоянии в процессе сварки. Наконечник инструмента должен обеспечивать перемешивание металла по всей толщине свариваемых кромок, чтобы избежать дефекта в виде несплавления в нижней части шва [12–15]. Скорости вращения и линейного перемещения инструмента в значительной степени определяют объем пластифицированного металла в зоне сварки и температуру его нагрева. Они могут изменяться в достаточно широком диапазоне в зависимости от толщины свариваемого

материала, его теплофизических и пластических характеристик, а также траектории перемещения пластифицированного металла, определяемой конструктивными особенностями рабочих поверхностей инструмента [9, 16]. Некоторые исследователи определили оптимальные соотношения между скоростями сварки и частотами вращения инструмента, выражающими длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в зависимости от толщины свариваемого материала или температурного интервала кристаллизации алюминиевых сплавов [14, 17].

Цель данной работы — определить оптимальные параметры режимов сварки трением с перемешиванием широко используемых при изготовлении сварных конструкций алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной 0,8...3,0 мм.

Методика проведения исследований. Сварку трением с перемешиванием листов из алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, АМг5М, АМг6М, 1201 и 1460 толщиной от 0,8 до 3,0 мм выполняли на лабораторной установке, сконструированной в ИЭС им. Е.О. Патона. Для получения стыковых соединений использовали специальный инструмент с диаметром бурта 12 мм и наконечником конической формы [18]. Длину наконечника инструмента выбирали таким образом, чтобы она была на 0,15 мм меньше толщины свариваемого металла. Сварку выполняли углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2...3°. Вращение инструмента осуществлялось с помощью сменных серийных асинхронных электродвигателей переменного тока ($U = 380$ В) мощностью 4 кВт и частотой вращения вала $N = 1420$ и 2880 об/мин, устанавливаемых на суппорте. С помощью последнего закрепленный на валу электродвигателя инструмент перемещался в вертикальной плоскости, благодаря чему обеспечивалось необходимое заглубление его рабочих частей в свариваемый материал и поддерживалась постоянная величина осевого усилия его прижатия к соединяемым деталям в процессе сварки. Свариваемые листы надежно фиксировались на стальной подкладке подвижного стола. При этом скорость сварки можно было изменять в пределах $v_{\text{св}} = 2...42$ м/ч. Специально установленный впереди инструмента прижимной ролик препятствовал изменению в процессе сварки пространственного положения кромок слишком чувствительного к тепловому воздействию тонколистового материала.

Наличие макродефектов в виде грат и несплавлений на поверхностях сварных соединений определяли с помощью визуального контро-

ля. Внутренние дефекты выявляли на поперечных шлифах, предварительно подготовленных с помощью электролитического полирования и дополнительного травления их в растворе хлорной, азотной и плавиковой кислот, используя оптический микроскоп МИМ-8М.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате проведенных исследований установлено, что при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов качественное формирование швов можно обеспечить за счет правильного выбора глубины погружения инструмента в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка или скорости сварки ($v_{\text{св}}$).

Глубина погружения инструмента обуславливает термдеформационные условия во всех зонах сварного соединения, поскольку одновременно предопределяет величину погружения бурта инструмента и глубину проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Снижение ее ($< 0,10$ мм) приводит к уменьшению величины заглубления бурта и глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Как результат, давление под рабочей поверхностью бурта и наконечника инструмента и величина тепловыделения в месте контакта их со свариваемым металлом уменьшаются. Вследствие этого в зоне формирования неразъемного соединения не обеспечивается необходимый для качественного формирования шва объем пластифицированного металла или не достигается требуемый уровень его пластификации, что может привести к образованию внутренних дефектов в виде несплошностей (рис. 1, а) или поверхностных дефектов с лицевой стороны шва в виде несплавления (рис. 1, б). Кроме того, в результате уменьшения глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл и выделяемого при его трении тепла, в корневой части шва также могут возникать дефекты в виде несплавления (рис. 1, в). К ухудшению качества сварных соединений может приводить и чрезмерное ($> 0,15$ мм) заглубление инструмента. Так, при сварке пластичных низколегированных алюминиевых сплавов (АМцН, АД33, АМг2М) на лицевой поверхности шва могут образовываться поверхностные дефекты в виде грат (рис. 1, в), а при сварке более прочных сплавов — внутренние несплошности, обусловленные перегревом металла (рис. 1, д). Поэтому для обеспечения качественного формирования швов необходимо погружать инструмент в свариваемый металл на глубину 0,10...0,15 мм и в процессе сварки за счет осевого усилия прижатия поддерживать его в таком положении.

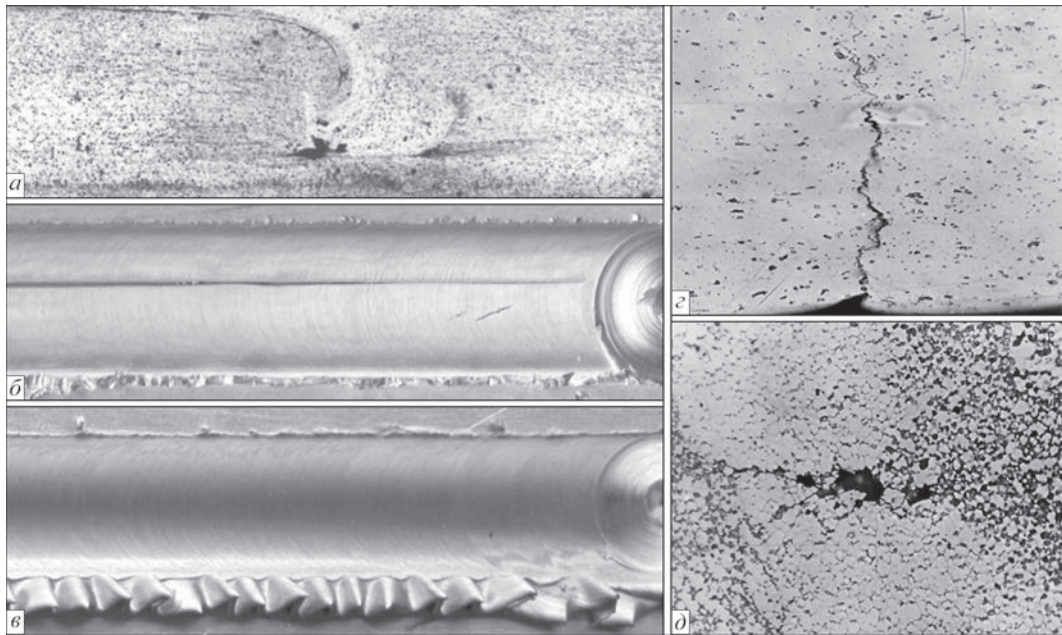


Рис. 1. Характерные дефекты, образующиеся в швах, полученных сваркой трением с перемешиванием: *a, d* — внутренние несплошности; *b* — несплавление с лицевой поверхности шва; *в* — грат на лицевой поверхности шва; *г* — несплавление в корневой части шва (*a* — $\times 15$; *b, в* — $\times 2$; *г* — $\times 300$; *д* — $\times 500$)

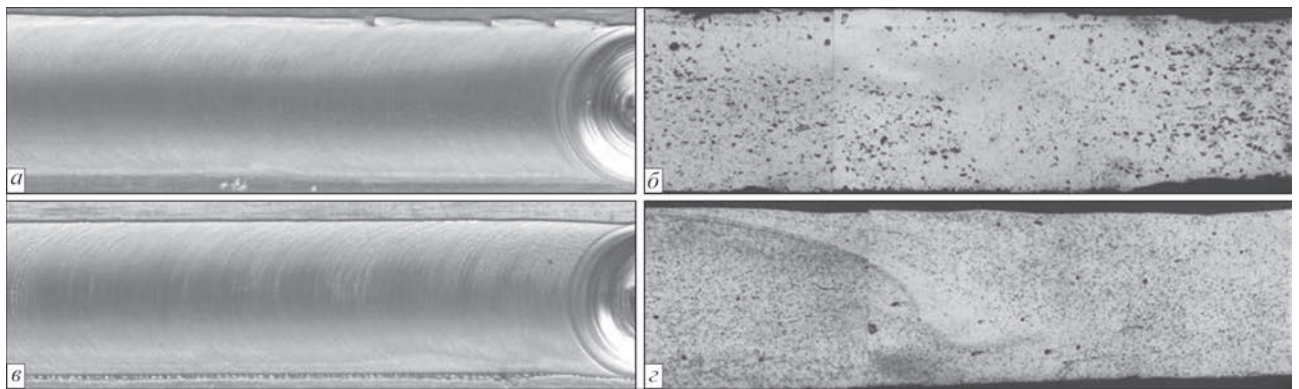


Рис. 2. Внешний вид (*a, в*; $\times 2$) и поперечные макрошлифы (*б, г*; $\times 12$) швов алюминиевых сплавов АМцН (*a, б*) и АМг2М (*в, г*) толщиной 2 мм, полученных СТП при скоростях сварки 38 и 32 м/ч, соответственно

Условия пластического деформирования металла в зоне образования неразъемного соединения определяются температурой его нагрева и скоростью деформирования, которые зависят от частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что качественное формирование швов при сварке трением с перемешиванием различных алюминиевых сплавов обеспечивается при разных значениях этих параметров. Так, при частоте вращения инструмента $N = 1420$ об/мин пластичные низколегированные алюминиевые сплавы успешно свариваются при достаточно высоких скоростях сварки (рис. 2).

Для получения качественных соединений на более прочных алюминиевых сплавах, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, необходимо снижать скорость сварки. Например, в швах алюми-

но-литиевого сплава 1460 внутренние дефекты в виде пустот, обусловленные недостаточным объемом пластифицированного металла в зоне формирования неразъемного соединения, образуются при перемещении инструмента вдоль шва со скоростью более 20 м/ч, а в швах сплава 1201 — более 14 м/ч (рис. 3).

При повышении частоты вращения инструмента до 2880 об/мин тепловыделение в зоне образования неразъемного соединения возрастает, что позволяет увеличить в два раза скорость линейного перемещения инструмента без ухудшения качества швов. Учитывая такую взаимосвязь между отмеченными параметрами процесса, использовали соотношение $v_{\text{св}}/N$, выражающее длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения этого соотношения в зависимости от суммарного содержания легирующих и

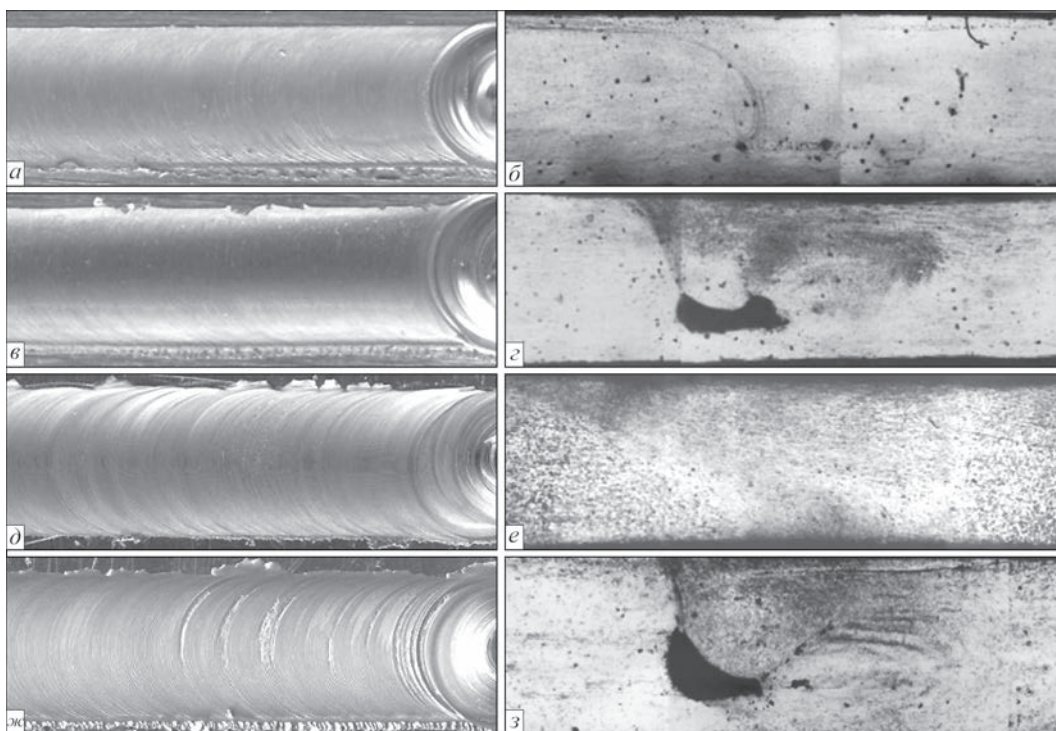


Рис. 3. Внешний вид (а, в, д, ж; $\times 2$) и поперечные макрошлифы (б, в, е, з; $\times 12$) швов алюминиевых сплавов 1460 (а–в) и 1201 (д–з) толщиной 2 мм, полученных СТП при скоростях сварки 8 м/ч (а, б, д, е), 24 м/ч (в, в) и 18 м/ч (ж, з)

модифицирующих элементов в свариваемых алюминиевых сплавах (рис. 4).

Установлено, что при сварке трением с перемещением алюминиевого сплава АМцН, содержащего около 2,2 % легирующих и модифицирующих элементов, качественное формирование швов обеспечивается при величине соотношения $v_{св}/N$ в пределах 0,094...0,481 мм/об, т. е., при частоте вращения инструмента 1420 об/мин скорость сварки может изменяться в пределах 8...41 м/ч. Для сплава АД33, в котором содержание таких элементов составляет около 3,2 %, диапазон оптимальных соотношений $v_{св}/N$ сокращается до 0,094...0,423 мм/об, что при упомянутой выше ча-

стоте вращения инструмента позволяет успешно выполнять сварку на скоростях 8...36 м/ч. Качественное формирование швов на сплаве АМг2М, содержащем еще большее количество легирующих и модифицирующих элементов (4 %), достигается при величине соотношения $v_{св}/N$ в пределах 0,094...0,376 мм/об или при $v_{св} = 8...32$ м/ч.

Для более прочных алюминиевых сплавов, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, диапазон оптимальных соотношений $v_{св}/N$, при которых обеспечивается качественное формирование швов, становится значительно уже. Так, для сплава 1460, в состав которого кроме алюминия входит около 6,2 % других элементов, он составляет 0,070...0,233 мм/об, т. е. при частоте вращения инструмента 1420 об/мин скорость сварки должна находиться в пределах 6...20 м/ч, а при 2880 об/мин — 12...40 м/ч. На сплаве АМг5М, содержащем 7,2 % легирующих и модифицирующих элементов, качественное формирование швов обеспечивается при $v_{св}/N = 0,058...0,187$ мм/об или при скоростях сварки 5...16 и 10...32 м/ч, когда частота вращения инструмента составляет 1420 и 2880 об/мин соответственно. Еще более легированный сплав 1201, содержащий кроме алюминия 7,7 % других элементов, удастся успешно сваривать при величине линейного перемещения инструмента за один его оборот в пределах 0,047...0,163 мм, что соответствует скоростям сварки 5...14 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 об/мин и 10...28 м/ч при 2880 об/мин.

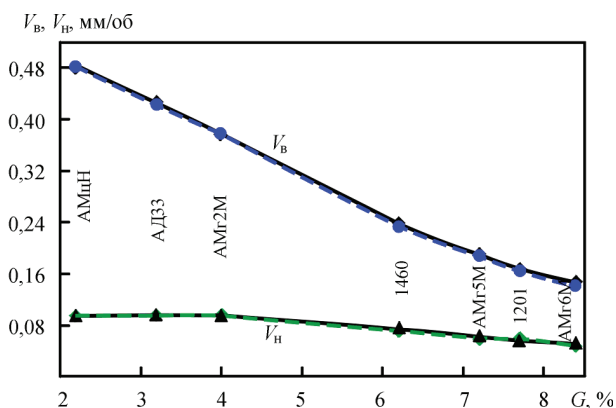


Рис. 4. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при СТП алюминиевых сплавов с различным содержанием легирующих и модифицирующих элементов и ограничивающие его аппроксимированные кривые ($N = 1420...2880$ об/мин)

Для сплава АМг6М, содержащего около 8,4% легирующих и модифицирующих элементов, оптимальное соотношение $v_{св}/N$ находится в диапазоне 0,047...0,140 мм/об, т. е. скорость сварки может изменяться в пределах 4...12 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 об/мин или 8...24 м/ч при 2880 об/мин.

Полученные эмпирические кривые, ограничивающие диапазон оптимальных соотношений между длиной линейного перемещения инструмента за один его оборот и суммарным содержанием легирующих и модифицирующих элементов в сплаве, аппроксимировали степенными функциями. Для кривой, ограничивающей верхнюю границу этого диапазона, такая функция будет выражаться следующей формулой:

$$V_B(G) = V_{B0}[1,46 - 0,08G/G_0 - 0,541(G/G_0)^2 + 0,16(G/G_0)^3], \quad (1)$$

где $V_B(G)$ — максимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот, при которой обеспечивается качественное формирование швов, мм/об; $V_{B0} = 0,376$ мм/об — максимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот для сплава АМг2М; $G_0 = 4\%$ — суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в алюминиевом сплаве АМг2М; G — суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в свариваемом алюминиевом сплаве, % (в диапазоне 2,2...8,4 %).

Для кривой, ограничивающей нижнюю границу указанного диапазона, аппроксимированную зависимость можно выразить такой формулой:

$$V_H(G) = V_{H0}[0,64 + 1,12G/G_0 - 0,972(G/G_0)^2 + 0,197(G/G_0)^3], \quad (2)$$

где $V_H(G)$ — минимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот, при которой обеспечивается качественное формирование швов, мм/об; $V_{H0} = 0,094$ мм/об — минимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот для сплава АМг2М.

Представленные на графике (см. рис. 4) сплошными линиями кривые, полученные с использованием аппроксимированных формульных зависимостей, практически совпадают с пунктирными кривыми, построенными по результатам экспериментальных исследований. Поэтому при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, содержащих суммарное количество легирующих и модифицирующих элементов в пределах 2,2...8,4 %, диапазон оптимальных соотношений между скоростями линейного перемещения и частотами вращения инструмента, при которых обе-

спечивается качественное формирование швов, можно определять с помощью приведенных выше формул.

Увеличение или уменьшение установленных оптимальных соотношений $v_{св}/N$ для алюминиевых сплавов, содержащих определенное количество легирующих и модифицирующих элементов, приводит к образованию дефектов в швах. Превышение установленной максимально допустимой скорости перемещения инструмента за один его оборот на 10...20 % приводит к появлению в швах внутренних несплошностей (см. рис. 1, а), обусловленных недостаточной пластификацией металла в зоне сварки. А при дальнейшем его увеличении с лицевой стороны шва образуются поверхностные дефекты в виде несплавлений (см. рис. 1, б).

Снижение соотношения $v_{св}/N$ ниже установленного минимально допустимого значения при сварке пластичных алюминиевых сплавов с небольшим содержанием легирующих и модифицирующих элементов (АМцН, АД33, АМг2М) приводит к образованию на лицевой поверхности швов дефектов в виде грат (см. рис. 1, в). При сварке остальных сплавов уменьшение минимально допустимой скорости перемещения инструмента за один его оборот на 10...20 % вызывает появление участков перегретого металла на лицевой поверхности швов (рис. 5). А при дальнейшем его уменьшении в швах образуются внутренние несплошности.

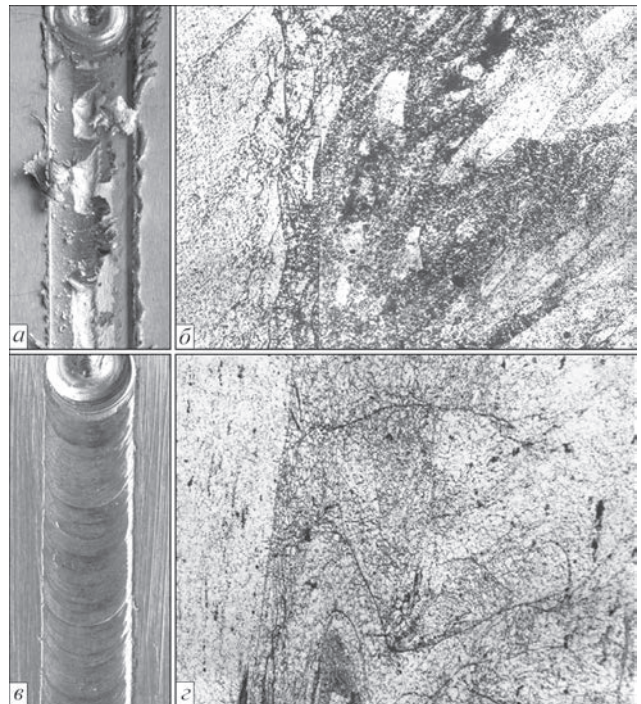


Рис. 5. Внешний вид (а, в; $\times 2$) и микроструктура (б, г; $\times 125$) лицевой поверхности швов, полученных при сварке трением с перемешиванием сплава 1420 толщиной 1,8 мм: а, б — шов перегретый; в, г — нормальный

плошности, обусловленные перегревом металла (см. рис. 1, д).

Выводы

1. Качественное формирование швов при сварке трением с перемешиванием тонколистовых (0,8...3,0 мм) алюминиевых сплавов различных систем легирования можно обеспечить при погружении инструмента в свариваемый металл на глубину 0,10...0,15 мм за счет правильного выбора частоты вращения инструмента и скорости сварки.

2. Пластичные низколегированные алюминиевые сплавы успешно свариваются при достаточно высоких скоростях сварки. При частоте вращения инструмента $N = 1420$ об/мин скорость его линейного перемещения для сплава АМцН может изменяться в пределах 8...41 м/ч, для сплава АД33 — 8...36 м/ч и для сплава АМг2М — 8...32 м/ч. Для получения качественных соединений на более прочных алюминиевых сплавах, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, необходимо снижать скорость сварки.

3. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов зависит от суммарного содержания в них легирующих и модифицирующих элементов. При суммарном содержании их в сплаве 2,2 % (сплав АМцН) величина линейного перемещения инструмента за один его оборот может изменяться в достаточно широких пределах от 0,094 до 0,423 мм. А для более прочных высоколегированных сплавов диапазон ее изменения сужается до 0,047...0,163 мм при содержании 7,7 % (сплав 1201) таких элементов в свариваемом сплаве и до 0,047...0,140 мм при их содержании 8,4 % (сплав АМг6М). Отклонение указанных параметров от оптимального диапазона приводит к образованию характерных внутренних и поверхностных дефектов, обусловленных недостаточной пластификацией или перегревом свариваемого материала.

4. Построенные по результатам экспериментальных исследований кривые, ограничивающие диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента, аппроксимированы формульными зависимостями в виде степенных функций, позволяют рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения

инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2...8,4 % легирующих и модифицирующих элементов.

Список литературы/References

1. Lahti K. (2003) FSW – possibilities in Shipbuilding. *Svetsaren*, **1**, 6–8.
2. Kuriyama T. (2008) Advantages of Aluminum Alloy Rolling Stocks and Transition of Carbody Structures. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, **9**, 418–421.
3. Arbogast W.J. (2006) Friction Stir Welding After a Decade of Development. *Welding Journal*, **3**, 28–35.
4. Ding J., Carter R., Lawless K. et al. (2006) Friction Stir Welding Flies High at NASA. *Ibid*, **3**, 54–59.
5. Okamura H., Aota K., Ezumi M. (2000) Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **4**, 166–172.
6. Defalco J. (2006) Friction stir welding vs. fusion welding. *Welding Journal*, **3**, 42–44.
7. Lanciotti A., Vitali F. (2003) Characterization of friction welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates. *Welding International*, **8**, 624–630.
8. Kulekci M.K. (2003) Mechanické vlastnosti spojov hliníkovej zliatiny AlCu4SiMg vyhotovených trecím zvaraním premiešanim. *Zvaranie–Svařování*, **5**, 6, 104–107.
9. Pietras A., Zadroga L., Lomozik M. (2004) Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW). *Welding International*, **1**, 5–10.
10. Oosterkamp A., Oosterkamp L., Nordeide A. (2004) «Kissing Bond» Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys. *Welding Journal*, **8**, 225–231.
11. Покляцкий А.Г. (2008) Характерные дефекты при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и основные причины их образования. *Автоматическая сварка*, **6**, 48–52.
12. Poklyatsky, A.G. (2008) Characteristic defects in FSW of sheet aluminium alloys and main causes for their formation. *The Paton Welding J.*, **6**, 39–43.
13. Shinoda T. (2002) Effect of Tool Angle on Metal Flow Phenomenon in Friction Stir Welds. *6th International conference on trends in welding research. Georgia, USA*.
14. Okamura H., Aota K., Takai H. et al. (2003) Point of Application for FSW. *Welding Technology*, **5**, 60–69.
15. Colegrove P.A., Shercliff H.R. (2003) Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075-T7351 friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, **5**, 360–368.
16. Enomoto M. (2003) Friction Stir Welding: research and industrial applications. *Welding International*, **5**, 341–345.
17. Hassan A.A., Prangnell P.B., Norman A.F. et al. (2003) Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds. *Ibid*, **4**, 257–268.
18. Рязанцев В.И., Мацнев В.Н., Конкевич В.Ю. (2004) Сварка трением с перемешиванием деформируемых и литейных алюминиевых сплавов. *Авиационная промышленность*, **4**, 33–36.
19. Ryazantsev, V.I., Matsnev, V.N., Konkevich, V.Yu. (2004) Friction stir welding of wrought and cast aluminium alloys. *Aviats. Promyshlennost*, **4**, 33–36 [in Russian].
20. Іщенко А.Я., Покляцкий А.Г. Заявник і патентовласник ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. № u201005315. (2010) *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Україна Пат. 54096, МПК B23K 20/1.
21. Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G. (2010) *Tool for friction stir welding of aluminium alloys*. Ukraine Pat. 54096, Int. Cl. B23K 20/12, No. u 201005315 [in Ukrainian].

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ТОНКОЛИСТОВИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

А.Г. Покляцький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Визначено оптимальні параметри режимів зварювання тертям з перемішуванням широко використовуваних при виготовленні зварних конструкцій алюмінієвих сплавів різних систем легування товщиною 0,8...3,0 мм. Показано, що якісне формування швів можна забезпечити при зануренні інструменту в зварюваний метал на глибину 0,10...0,15 мм за рахунок правильного вибору частоти обертання інструменту і швидкості зварювання. Встановлено взаємозв'язок між сумарним вмістом легуючих і модифікуючих елементів у зварному алюмінієвому сплаві, швидкістю зварювання і частотою обертання інструменту. Визначено діапазон оптимальних співвідношень, які визначають довжину лінійного переміщення інструменту уздовж стику за один його оборот, в якому забезпечується якісне формування швів тонколистових алюмінієвих сплавів АМцН, АД33, АМГ2М, 1460, АМГ5М, 1201 і АМГ6М. Отримано формули, що відображають залежності у вигляді степеневих функцій, що обмежують цей діапазон і дозволяють розрахувати необхідні швидкості обертання і переміщення інструменту для будь-якого алюмінієвого сплаву, що містить 2,2...8,4 % легуючих і модифікуючих елементів. Показані характерні дефекти, які утворюються в швах при відхиленні вказаних параметрів від оптимального діапазону. Бібліогр. 18, рис. 5.

Ключові слова: алюмінієві сплави, зварювання тертям з перемішуванням, швидкість обертання інструменту, швидкість зварювання, характерні дефекти

PREDICTION OF PARAMETERS OF FRICTION STIR WELDING OF SHEET ALUMINIUM ALLOYS

A.G. Poklyatskii

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Optimum parameters of the modes of friction stir welding of 0.8–3.0 mm thick aluminium alloys widely used in fabrication of welded structures were determined. It is shown that sound formation of welds can be ensured at tool immersion into the metal being welded to the depth of 0.10–0.15 mm due to correct selection of the frequency of tool rotation and welding speed. A relationship is established between the total content of alloying and modifying elements in the aluminium alloy being welded, welding speed and frequency of tool rotation. A range of optimum relationships was determined, showing the length of the tool linear movement along the butt during one rotation, when sound formation of welds of sheet aluminium alloys AMtsN, AD33, AMg2M, 1460, AMg5M, 1201 and AMg6M is provided. Formulas were derived, which express the dependencies in the form of power functions, limiting this range and allowing calculation of the required speeds of tool rotation and displacement for any aluminium alloy, containing 2.2–8.4% of alloying and modifying elements. Characteristic defects, forming in welds at deviation of the above parameters from the optimum range, are shown. 18 Ref., 5 Fig.

Keywords: aluminium alloys, friction stir welding, tool rotation speed, welding speed, characteristic defects

Поступила в редакцию 19.05.2019

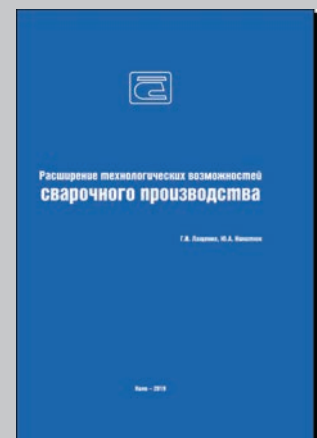
Лащенко Г.И., Никитюк Ю.А. Расширение технологических возможностей сварочного производства. Киев, 2019. — 360 стр.

Рассмотрена роль сварочного производства в развитии национальной экономики. Проанализировано состояние и пути трансформации украинской экономики. Освещены тенденции и тренды развития современного сварочного производства. Изложены основы разработки технологии сварки. Дана характеристика способов и приемов сварки плавлением. Проанализировано использование принципа комбинирования для расширения технологических возможностей заготовительных, сборочных и сварочных операций.

Приведены технологические возможности сварки трением с перемешиванием и родственных процессов. Освещены особенности малозатратных технологий послесварочной обработки металлоконструкций с помощью вибронагружения и поверхностного пластического деформирования.

Для инженерно-технических работников, занятых в сварочном производстве. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам сварочных специальностей вузов.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала
«Автоматическая сварка» (тел. 200-82-77).



ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ФЕРРОСПЛАВОВ ЭЛЕКТРОДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Е. Марченко

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены предпочтительные типы оборудования для обеспечения безопасного измельчения ферроматериалов, применяемых в электродном производстве. Описаны конструкционные особенности оборудования, их преимущества и недостатки. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: электродное производство, ферроматериалы, пожаровзрывобезопасное измельчение, щелевая мельница, вибрационная мельница, аэробильная дробилка, виброинерционная дробилка

При выборе измельчительного оборудования, предназначенного для пожаровзрывобезопасного измельчения ферросплавов, предпочтение отдается установкам, которые:

- характеризуются низкими удельными затратами энергии на измельчение и, следовательно, незначительным разогревом материала в процессе измельчения;
- имеют небольшие размеры мелющей камеры;
- обеспечивают быстрый вывод измельчаемого материала за пределы мелющей камеры, предотвращая его нагрев, переизмельчение и минимизируя изменение энергетического состояния поверхностного слоя его частиц;
- позволяют изолировать от окружающей атмосферы не только рабочее пространство измельчительной камеры, но также соединения его с узлами загрузки выгрузки, а также в зоне извлечения целевых фракций.

Опыт электродоизготавливающих предприятий показал, что этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют:

- модернизированная щелевая шаровая мельница института «Гипрометиз» барабанного типа с периферийным просевом;
- двухкамерная стержневая вибрационная мельница трубного типа модели PALLA-U (фирма KND HUMBOLDT WEDAG);
- конусная виброинерционная дробилка института «Механобр» (модель КИД 300);
- вертикальная аэробильная дробилка Pluristadio GR 80 (фирма GUSSEO).

Рассмотрим конструкционные особенности перечисленных измельчителей, включая обеспече-

ние требуемой степени пожаровзрывобезопасности процесса измельчения.

Щелевая мельница Гипрометиза. В традиционной технологии измельчения ферросплавов в защитном газе использовалась обычная щелевая мельница «Гипрометиза» с диаметром барабана 700 мм, помещенная в герметичную камеру объемом 25,5 м³. Такая установка имеет следующие недостатки:

- низкая производительность, что обусловлено длительностью подготовительных операций, включающих, в том числе, вывод установки на безопасный режим работы;
- сложность обслуживания;
- большой объем герметизируемой камеры;
- высокая запыленность рабочего пространства и накопление в камере отложений токсичной, пирофорной и взрывоопасной пыли в количестве, превышающем 20 кг в сутки; взметенная во время пылеуборки, она по концентрации может превысить ПДК и нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ).

На основе результатов математического моделирования и производственных экспериментов, выполненных на одной из действующих измельчительных установок этого типа, авторы работ [1, 2] модернизировали схемы и режимы подачи защитного газа, а также систему аспирации, которые обеспечивают пожаровзрывобезопасные концентрации кислорода в активной зоне (8 %) и допустимый уровень запыленности аспирируемого воздуха.

Схема модернизированной установки приведена на рис. 1.

По этой схеме нет необходимости в специальной камере, достаточно штатного кожуха с пятью подводами инертного газа (ИГ) — азота: в полость барабана (точно через цапфу по трубе диаметром 10 мм), в верхнюю и бункерную части

*Ретроспективный обзор по материалам публикаций в малотиражных изданиях и источниках несварочного профиля.

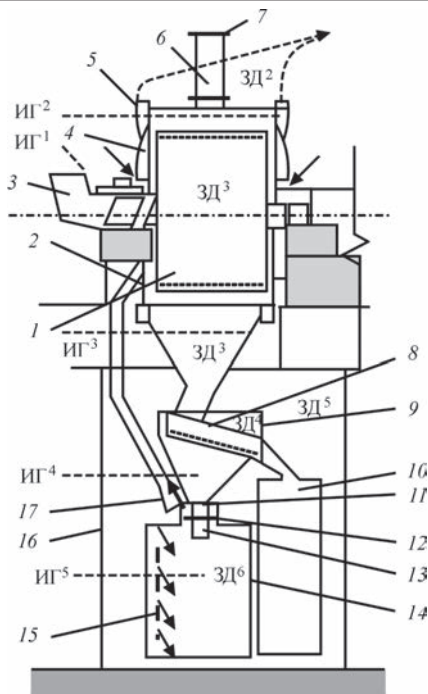


Рис. 1. Схема установки для пожаровзрывобезопасного измельчения ферросплавов на базе щелевой мельницы Гипрометиза [2]: 1 — барабан мельницы; 2 — кожух мельницы; 3 — питатель; 4 — аспирационное укрытие; 5 — аспирационный патрубок; 6 — трубопровод для разгрузки давления; 7 — мембрана; 8, 9 — виброгрохот с аспирационным укрытием; 10 — емкость для надрешеточного продукта; 11 — щелевая регулируемая диафрагма; 12–14 — щелевая регулируемая диафрагма, загрузочный патрубок и кубель готового продукта; 15 — устройство, распределяющее инертный газ в кубеле; 16 — общая камера виброгрохота и приемного кубеля; 17 — патрубок и воронка эжектирующего устройства; ИГ и ЗД — точки подвода инертного газа и замеров давления

кожуха, а также в над- и подситовую зону укрытия виброгрохота и кубель для готового порошка (перфорированной трубкой, обеспечивающей равномерное пространственное распределение ИГ).

Аспирационные укрытия смонтированы на торцевых стенках мельничного кожуха. Они сообщаются с полостями барабана и кожуха лишь через неплотности в местах прохода цапф, открыты снизу и сужаются сверху. Засасываемый через нижние проемы воздух из помещения, омывая цапфы, увлекает пылевыведения из мельницы в местах указанных неплотностей, практически не нарушая состав защитного газа внутри мельничного кожуха и барабана и сохраняя концентрацию взвешенных частиц в отсосах на достаточно низком уровне. Возрастающая на участке сужения наружных камер скорость аспирируемого воздуха предотвращает осаждение частиц из потока и накопления их на поверхности цапф.

Аспирация узла загрузки кубеля локализует возможные здесь пылевыведения, а также в зоне классификации порошка на вибросите.

Выбранные оптимальные режимы подачи и соотношения удельных расходов азота, поступающего в полость мельницы и в полость между барабаном и кожухом, аэродинамически связанную с виброситом и кубелем, обеспечивают надежное предотвращение воспламенений и взрывов.

Концентрация пыли на рабочем месте понижалась до уровня общей фоновой запыленности в цеховом пространстве.

Длительность продувки полостей азотом перед пуском мельницы сокращена с 2,0...2,25 ч (проектный вариант размещения измельчительной установки в герметичной камере объемом 25,5 м³) до 15 мин.

Вибрационная мельница модели PALLA-U представлена на рис. 2.

Установка состоит из подвижной (измельчающей) и неподвижной части. Неподвижная часть в виде жесткой металлической рамы 10 устанавливается на виброизолированном фундаменте 8. Подвижная часть состоит из двух горизонтальных, расположенных друг над другом трубных мелющих камер 5, надежно связанных друг с другом с помощью стальных стяжных хомутов. Вибровозбудительные узлы 3 расположены в промежутке между мельничными камерами, строго по вертикали равноудаленными от них. Каждый из узлов представляет собой короткий дебалансный вал на подшипниках качения, которые, будучи расположенными в защитной трубе, соединены между собой посредством промежуточного вала с крестовинами. Их через карданный вал 11 приводит во вращение асинхронный электродвигатель, смонтированный на консольно вынесенной площадке, расположенной с фронтально-лицевой стороны установки. Подвижная часть установки опирается на неподвижную раму

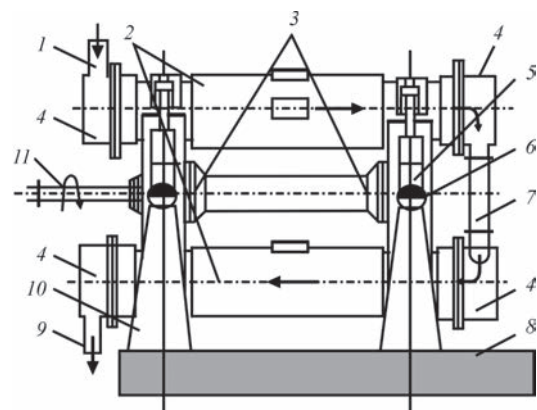


Рис. 2. Схема вибрационной мельницы PALLA-U фирмы KHD HUMBOLDT WEDAG: 1 — загрузочный патрубок; 2 — трубные мельничные камеры; 3 — узлы дебалансных вибровозбудителей; 4 — сменные торцевые днища мельничных камер; 5 — трубные связи; 6 — амортизаторы; 7 — переточный рукав; 8 — виброизолированный фундамент; 9 — выпускной штуцер; 10 — неподвижная рама; 11 — приводной вал

через упругие элементы-амортизаторы 6. Общий вид мельницы представлен на рис. 3 [2–4].

На выходе из камеры установлена торцевая решетка из высокопрочной стали, по размерам и количеству отверстий рассчитанная на максимальный проход готового продукта.

Это позволяет получать его, не опасаясь переизмельчения, без классификации на грохоте. В зависимости от измельчаемого материала 55...65 об. % полости каждой мельничной камеры заполнено цилиндрами, что дополнительно гарантирует недопущение переизмельчения.

При непрерывной подаче материала в камеру трение, возникающее при вибрации на поверхности горизонтальных мелющих цилиндров, позволяет не только измельчать, но и перемещать материал в пространстве между ними по спиральной траектории к выходу из камеры. Производительность мельницы контролируется углом внутреннего трения на разгрузке, типом и размером мелющих тел, крупностью питания, свойствами материала и кругового движения камеры. Степень измельчения зависит, главным образом, от времени удержания частиц в камерах, т. е. от варианта подключения мелющих камер — последователь-

ного, как показано стрелками на рис. 2, параллельного или комбинированного.

По первому режиму материал последовательно проходит верхнюю, а затем — нижнюю камеру. По такому режиму измельчают ферромарганец, ферротитан и ферросилиций. При работе по параллельному режиму измельчаются материалы менее прочные, чем ферросплавы. Материал загружается раздельно в каждую камеру, а на выходе получается целевой продукт. Производительность процесса возрастает вдвое, а достигнутая степень измельчения определится значением коэффициента измельчаемости материала. В производстве электродов по такому режиму измельчают кварцевый песок, рутиловый концентрат и мрамор. Третий режим предназначен для наиболее легко измельчаемых материалов. Их загружают в трубные камеры через центральные люки, а продукты измельчения движутся от центрального сечения к выпускным люкам каждой камеры. Степень измельчения при этом минимальная, а производительность процесса — самая высокая в сравнении с последовательным и параллельным режимами работы.

Режимы и производительность измельчения каждого нового материала выбираются путем проведения предварительных испытаний, по результатам которых определяют вид мелющих тел (стальные шары, цельбеппы, стержни) и режим работы мельницы (частота, амплитуда вибраций, продолжительность измельчения). В бывшем Советском Союзе электродные цехи использовали двухкамерные мельницы PALLA-U для измельчения не только ферросплавов, но и рудоминеральных ингредиентов покрытия. При этом получались порошки более крупнозернистые, чем при использовании других видов проходных барабанных шаровых мельниц, даже с периферийным просевом.

Полости мельничных камер герметизированы уплотнительными термостойкими кольцами, патрубками на входе и выходе соединены с укрытиями загрузочного и приемного узлов эластичными гофрированными переходами.

Мельницы комплектуются генератором углекислого газа и звукоизоляционной капсулой. Поэтому измельчительные установки на базе вибрационных мельниц PALLA-U обеспечивают условия труда обслуживающего персонала, безопасные с точки зрения санитарно-гигиенических предписаний, а при измельчении ферросплавов — еще и нормативных требований пожаро- и взрывобезопасности.

Аэробильная дробилка модели Pluristadio GR 80 итальянской фирмы GUSSEO представлена

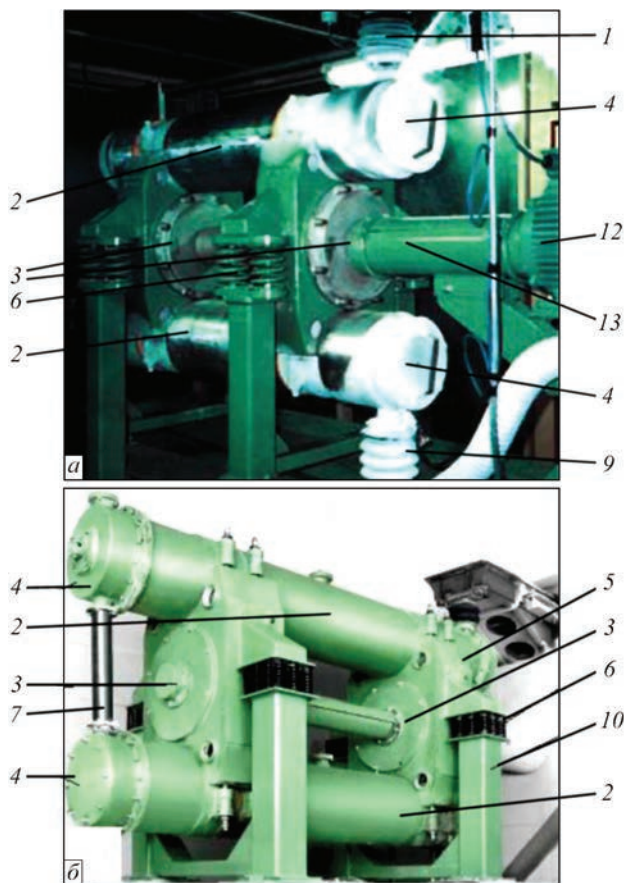


Рис. 3. Фронтально-лицевой (а) и тыловой (б) виды вибрационной мельницы PALLA-U: 12 — электродвигатель; 13 — кожух приводного вала (остальные обозначения см. рис. 2)

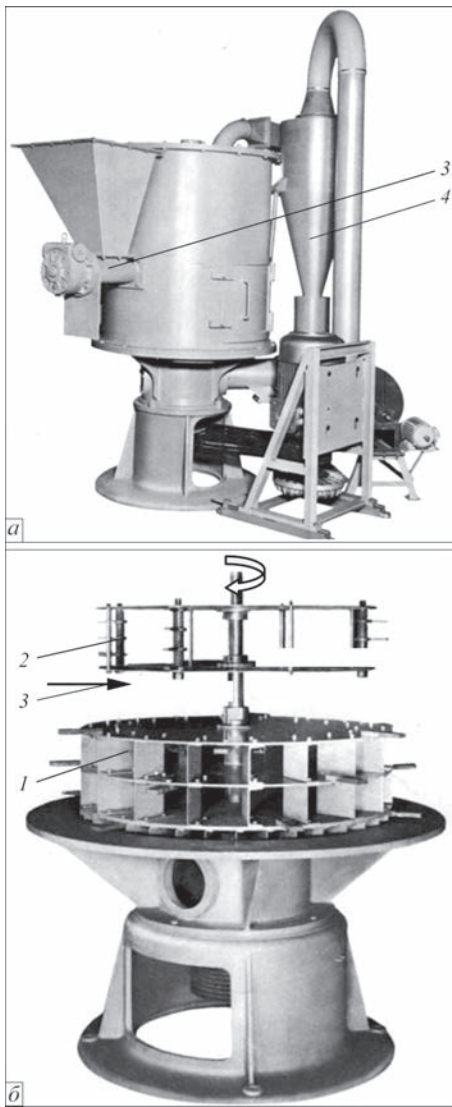


Рис. 4. Общий вид (а) и измельчительный ротор (б) аэробильной мельницы Pluristadio GR 80 (обозначения см. в тексте)

на рис. 4, а в составе измельчительной установки — на рис. 5. Она состоит из футерованного броней цилиндрического корпуса и ротора — вертикального вала с насаженными на него двумя разнесенными по высоте трехъярусными секциями бил. Нижняя секция 1 оснащена билами большего размера и предназначена для разрушения крупных фракций. Верхняя секция 2 осуществляет тонкое измельчение, она набрана из бил меньшего размера. В пространство между ними шнековый питатель 3 равномерно подает материал на диск нижней секции ротора.

Выполненный в виде центробежного распределителя, ротор, с одной стороны, направляет материал, подлежащий измельчению, в кольцевой зазор вдоль цилиндрической поверхности мельничного корпуса, а, с другой стороны, отражает и устремляет в этот зазор нагнетаемый вентилятором газовый поток. Относительно мелкие частицы материала увлекаются газовым потоком и на-

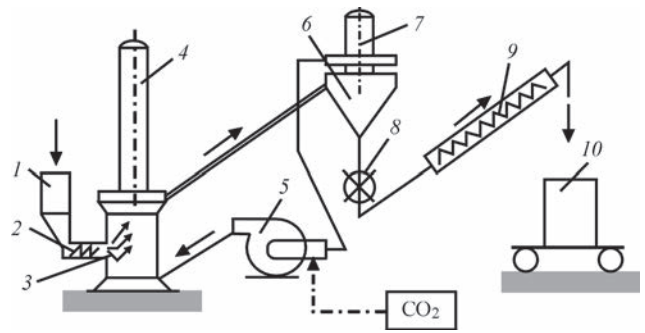


Рис. 5. Технологическая схема измельчающей установки для ферросплавов: 1, 2 — бункер со шнеком; 3 — мельница; 4, 7 — надувной взрывобезопасный клапан; 5 — вентилятор; 6 — бункер циклона; 8 — затвор; 9 — шнек; 10 — тележка

правляются сквозь била верхней секции ротора в сепаратор 4, в котором они разделяются на две фракции: мелкая (товарная) фракция уносится и осаждается в циклоне, а крупная возвращается на доизмельчение. Более крупные (тяжелые) частицы какое-то время падают в кольцевом зазоре мельницы вниз, навстречу газовому потоку, попадают под била нижней секции ротора, измельчаются, а затем тоже уносятся вверх, окончательно доизмельчаются верхними билами и тоже направляются в сепаратор 4.

Схема установки для измельчения ферромарганца, ферротитана и ферросилиция на базе аэробильной мельницы Pluristadio GR 80 представлена на рис. 5.

Гранулометрический состав порошка регулируется при настройке мельницы посредством изменения количества бил, подвешенных к дискам роторов, скорости газового потока с помощью жалюзей сепаратора, а также путем изменения частоты вращения рабочего колеса вентилятора. Чем больше скорость газового потока, тем более крупные частицы он подхватывает и устремляет вверх под била верхней секции ротора. Интегральная степень измельчения материала при этом уменьшается, а производительность мельницы возрастает. При уменьшении скорости газового потока помол получается более мелким, но количество измельченного мельницей материала понижается.

Поскольку питатель расположен в средней части мельницы, т. е. между верхним и нижним ротором, а газ нагнетается через сопло, установленное под нижним измельчающим диском, переизмельчение материала исключается.

Система герметична. В систему подают CO_2 , в случае необходимости, с добавкой кислорода, в объеме, достаточном для восполнения потерь. Герметичность системы подтверждается наполнением тканевых фильтрующих рукавов, которыми оборудована мельница и сепаратор. В качестве защитной атмосферы можно использовать смесь азота с кислородом.

Мельница Pluristadio GR 80 имеет небольшой объем рабочей камеры — диаметр 800 мм, а высота 1200 мм. Она легко и быстро, в течение 30 мин, очищается от остатков предыдущего материала. По производительности она обеспечивает потребности в названных ферросплавах цеха мощностью до 12,5 тыс. т электродов в год, из них 70 % с рутитовым и 30 % с низководородным покрытием.

Виброинерционная конусная дробилка КИД-300 [5, 6]. Профиль мелющей камеры виброинерционной конусной дробилки, как и у традиционных вибродробилок конусного типа, образуется бронированными поверхностями сопряженных друг с другом дробящих конусов — неподвижного наружного и вращающегося внутреннего. Наружный конус и сферическая опора внутреннего конуса смонтированы на станине измельчителя. Внутренний конус приводится электродвигателем в движение не через эксцентриковый стакан, как в конусной дробилке обычного типа, а через дебалансный вибровозбудитель. Он располагает гнездом шарообразного профиля для сферической опоры внутреннего конуса и устанавливается под ним на приводном валу. В результате использования такого привода внутренний конус наряду с вращением совершает гирационные движения, т. е. качания, свойственные коническому маятнику.

Равнодействующая обеих центробежных составляющих, прижимающая в пульсирующем режиме внутренний конус к наружному, является силой, измельчающей материал, загружаемый в мельничную камеру дробилки. Рабочие поверхности мелющих тел воздействуют на зерно через окружающие его зерна при циклическом уплотнении слоя в рабочей зоне.

На протяжении короткого времени прохождения мелющей камеры исходный материал пребывает в объемном напряженном состоянии в условиях многократного повторения циклов сжатия, изгиба и разгрузки. В таких условиях материал разрушается преимущественно по законам фрактальной кинетики по наиболее слабым поверхностям. Крупность порошка регулируется положением дебалансира, а производительность дробилки — изменением размера разгрузочной щели, т. е. зазора между футеровками конуса и чаши.

К преимуществам инерционных дробилок типа КИД по сравнению с обычными конусными дробилками с эксцентриковым приводом относят:

- трех-...пятикратное повышение показателя кратности дробления (до 15...18, в сравнении с традиционным показателем на уровне 3...5);
- увеличение выхода годного продукта;

- возможность работы дробилки под завалом, а также пуска и остановки под нагрузкой;

- незначительный уровень запыленности над уровнем слоя измельчаемого материала в зоне загрузки.

В ИПМ им. И.М. Францевича НАН Украины испытывали дробилку КИД-300 при измельчении ряда ферросплавов, в том числе ферросилиция марок ФС-45 и феррованадия ФВ-35, с начальным размером кусков 20 мм [6]. Схема опытной установки приведена на рис. 6.

Режимные показатели работы дробилки в ходе испытаний:

- скорость вращения дебалансного вибратора $\omega = 20 \text{ с}^{-1}$;
- статические моменты дебаланса $M_{\text{ст}}$ (2,52; 3,08 и 3,48 кг·м);
- ширина разгрузочной щели $\Delta = 6 \text{ мм}$.

Зависимости достигнутых при этом показателей производительности процесса измельчения по массе переработанного материала и полученного целевого продукта, кг/ч, а также по выходу годно-

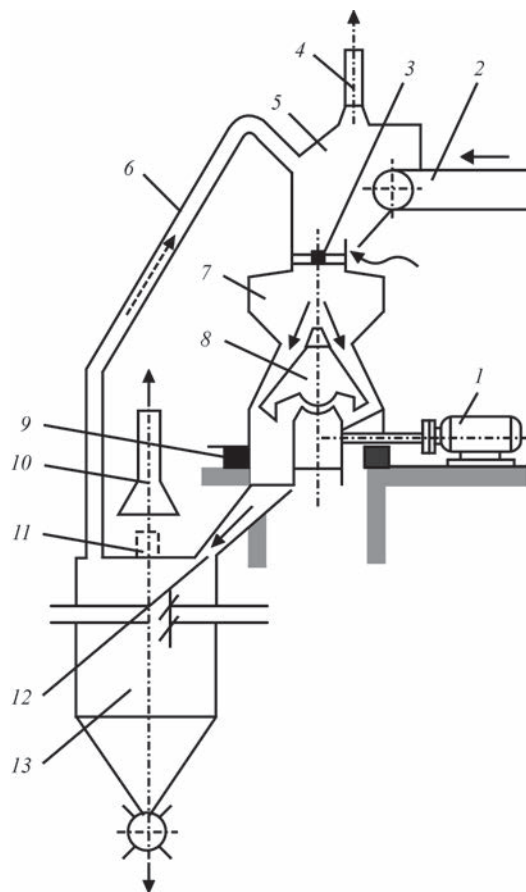


Рис. 6. Схема аспирации конусной вибрационной дробилки КИД-300 [6]: 1 — привод; 2 — питатель; 3–5 — приемный желоб, укрытие загрузочного устройства с аспирационным отсосом; 6 — отводная труба; 7, 8 — наружный и внутренний конус дробилки; 9 — амортизатор; 10, 11 — воронка и патрубок эжекционного устройства (в варианте без отводной трубы); 12 — разгрузочный желоб; 13 — бункер с кубелем для измельченного материала

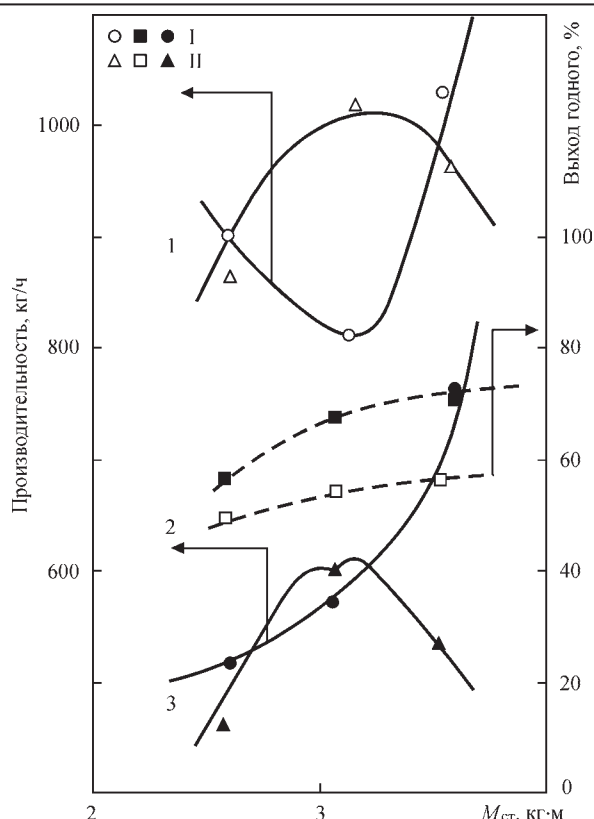


Рис. 7. Взаимосвязь показателей производительности процесса измельчения ферросилиция ФС-45 (I) и феррованадия ФВ-35 (II) от статического момента дебаланса на конической инерционной дробилке КИД-300 (по данным [6])

го продукта, %, величины статического момента дебаланса, приведены на рис. 7.

Приведенные данные показали, что измельчитель КИД-300 можно использовать для приготовления порошков ферросплавов, по зерновому составу соответствующих требованиям технологии производства низководородных электродов общего назначения, с примененным в настоящей работе аспирационным оформлением, обеспечивающим концентрацию пыли в аспирируемом воздухе, не превышающем $1,2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ при производительности отсоса $900 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ [5].

Автор признателен О.Д. Нейкову за конструктивные советы и обсуждение материалов.

Список литературы

1. Нейков О.Д., Марченко А.Е., Недин В.В. и др. (1982) О проблеме взрывоопасности при измельчении ферросплавов. *Тр. Всесоюз. конф. по сварочным материалам*. Подходя И.К. (ред.). Киев, Наукова думка, сс. 167–172.
2. Васильева Г.И., Нейков О.Д., Черных А.М. и др. (1989) Обеспечение защитных газовых сред в установках по измельчению ферросплавов. *Сб. «Металлургические и технологические проблемы электродов с основным покрытием»*. Доклады II Международной школы стран-членов СЭВ (София, ноябрь, 1989 г.). Киев, Наукова думка, сс. 133–139.
3. Гайрабедьянц Э.Л., Бетчин В.А., Матвеев Н.Н. (1977) Технология и оборудование поточного производства электродов. *Технология, организация производства и управления*. НИИ Информэнерго.

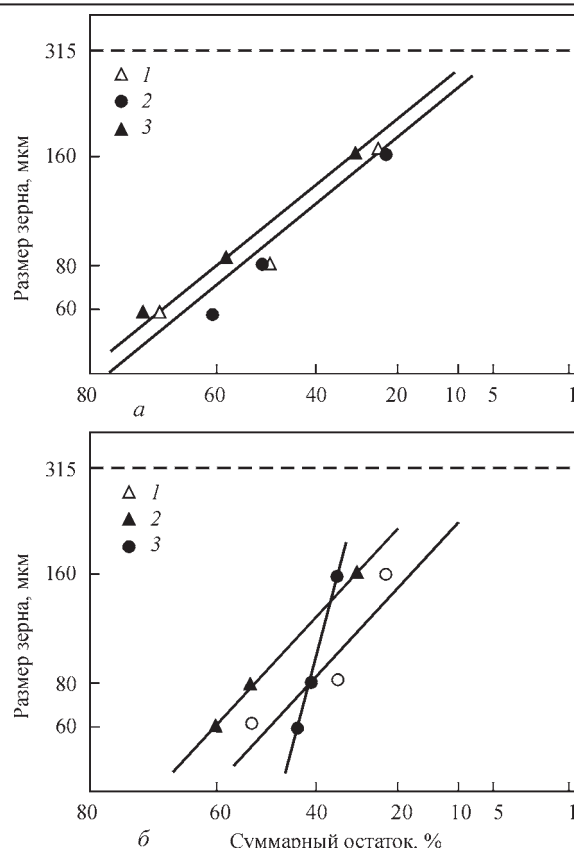


Рис. 8. Гранулометрический состав порошков, полученных при измельчении ферросилиция ФС-45 (а) и феррованадия ФВ-35 (б) на установке КИД-300 при значениях $M_{ст}$ равных 2,52 (1), 3,08 (2) и 3,48 (3) кг·м (по данным [6])

4. (2009) Новые рубежи. Мельницы PALLA – UO в обогащении. *Горная промышленность*, 1.
5. Ревкин В.Н., Гиршов В.Л., Финкельштейн Г.А. и др. (1982) Измельчение металлических порошков и стружки. *Порошковая металлургия*, 4, 12–17.
6. Денисов Г.А., Арделян А.А., Зарогатский Л.П. и др. (1989) Технология измельчения ферросплавов с использованием конусного инерционного измельчителя. *Сб. Металлургические и технологические проблемы электродов с основным покрытием. Доклады II Международной школы стран-членов СЭВ, София, ноябрь 1989 г.* Киев, Наукова думка, сс. 140–146.

References

1. Nejkov, O.D., Marchenko, A.E., Nedin, V.V. et al. (1982) On problem of explosion hazard in grinding of ferroalloys. In: *Proc. of All-Union Conf. on Welding Consumables*. Ed. by I.K. Pokhodnya. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Vasilieva, G.I., Nejkov, O.D., Chernykh, A.M. et al. (1989) Supply of shielding gas media in installation of ferroalloys grinding. In: *Proc. of 2nd Int. School of Countries-Members of CMEA on Metallurgical and Technological Problems of Basic Electrodes (Sofia, November 1989)*. Kiev, Naukova Dumka, 133–139.
3. Gajrabedyants, E.L., Betchin, V.A., Matveev, N.N. (1977) Technology and equipment of flow-line electrode manufacturing. In: *Technology, organization of manufacturing and management*. NII Informenergo [in Russian].
4. (2009) New frontiers. Grinding mills PALLA –UO in beneficiation. *Gornaya Promyshlennost*, 1 [in Russian].
5. Revkin, V.N., Girshov, V.L., Finkelshtejn, G.A. et al. (1982) Grinding of metal powders and chips. *Poroshk. Metallurgiya*, 4, 12–17 [in Russian].
6. Denisov, G.A., Ardelyan, A.A., Zarogatsky, L.P. (1989) Technology of grinding of ferroalloys with use of conical

inertial crushing machine. In: *Proc. of 2nd Int. School of Countries-Members of CMEA on Metallurgical and*

Technological Problems of Basic Electrodes (Sofia, November 1989). Kiev, Naukova Dumka, 140-146.

УСТАТКУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЕЧНОГО ПОДРІБНЕННЯ ФЕРОСПЛАВІВ ЕЛЕКТРОДНОГО ВИРОБНИЦТВА

А.Ю. Марченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто найкращі типи обладнання для забезпечення безпечного подрібнення фероматеріалів, що застосовуються в електродному виробництві. Описано конструкційні особливості устаткування, їх переваги та недоліки.

Ключові слова: електродне виробництво, ферроматеріали, пожежо-вибухонебезпечне подрібнення, щілинний млин, вібраційний млин, аеробільна дробарка, віброінерційна дробарка

EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES OF SAFE GRINDING OF FERRO-ALLOYS OF ELECTRODE PRODUCTION

A.E. Marchenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The preferred types of equipment are considered to provide safe grinding of ferromaterials used in electrode production. The design features of the equipment, their advantages and disadvantages are described. 6 Ref., 8 Fig.

Key words: electrode production, ferromaterials, fire and explosion grinding, slit mill, vibration mill, paddle-type grinder, vibroinertial grinder

Поступила в редакцию 24.04.2019



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Международная Ассоциация «Сварка»

Девятая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

9 – 13 сентября 2019 г.

Украина, Одесса

Председатель программного комитета
академик И.В. Кривцун

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ



АДРЕС ОРГКОМИТЕТА
Украина, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019>



МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

18–20 июня 2019 г. в Гомеле в отеле «Турист» состоялся научно-практический семинар на тему «Сварочные материалы: состояние и перспективы». В семинаре приняли участие руководители и ведущие специалисты частных предприятий-производителей сварочных материалов, производители и поставщики технологического оборудования и сырьевых материалов для производства покрытых электродов, порошковых проволок и лент, представители Московского отделения шведского концерна «ЭСАБ», а также ряда новых компаний, занимающихся малым и средним бизнесом.

Число участников из России, Украины, Беларуси составило около 60 человек. Семинар был организован ассоциацией «Электрод», Институтом электросварки им. Е.О. Патона, ЧАО «ПлазмаТек» (Украина) и Светлогорским заводом сварочных электродов (Беларусь).

Открыла семинар президент Ассоциации Е.А. Палиевская (ООО «Техпром»). Она отметила весомый вклад ассоциации «Электрод» в укрепление научно-технических связей специалистов, работающих в области производства сварочных материалов, специализированного оборудования и сырья, пожелала участникам продуктивной работы.

До начала технической части программы семинара с приветствиями выступили заместитель председателя Светлогорского райисполкома А.А. Магазинчиков, директор Светлогорского завода сварочных электродов А.О. Мельник и глава администрации государственного учреждения «Администрация свободной экономической зоны «Гомель-Ратон» А.И. Ежова.

На семинаре было представлено 15 докладов. Среди них доклад «Развитие производства сварочных материалов на ЧАО «ПлазмаТек», Ю.Н. Омельчук (ЧАО «ПлазмаТек»), «Мировой и региональные рынки сварочных материалов: состояние и перспективы», д-р техн. наук В.Н. Липодаев (ИЭС им. Е.О. Патона), «Опыт Ижорского завода по изготовлению, применению и улучшению электродов УОНИ-13», акад. МАРЭ И.М. Лившиц (ОАО «Ижорские сварочные материалы»), «Жидкое стекло — основной компонент в производстве электродов (свойства и применение)», канд. техн. наук Н.В. Скорина (ИЭС им. Е.О. Патона), «Сварка бронзовой монументальной и городской скульптуры», д-р техн. наук З.А. Сидлин (ООО



«Техпром»), «Порошковые ленты. Технология и оборудование для износостойкой наплавки», А.П. Ворончук (ИЭС им. Е.О. Патона), «Сотрудничество с обществами по сертификации — один из путей повышения качества выпускаемой продукции», В.Н. Упырь (ООО «ТМ.Велтек»), «Определение возможности использования мелкодисперсных порошковых модифицирующих материалов в покрытии электродов для дуговой сварки», Д.И. Якубович (Беларусско-российский ун-т) и другие.

Большой интерес вызвали презентации Е. Нагая (Польский ин-т сварки) «Вопросы сертификации сварочных материалов в Польше и странах ЕС», А.Н. Алимова (ООО «Вита-Полис»), «Производство сварочных проволок», представленные В.Н. Липодаевым.

К началу работы семинара ее организаторами был издан сборник тезисов. Он включал тезисы по всем заслушанным презентациям. Участники семинара были ознакомлены также со сборником докладов международной конференции «Материалы для сварки, наплавки, нанесения покрытий и 3D-технологий» (4–5 июня 2019 г., г. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона).

В целом обсуждаемые на семинаре в Гомеле доклады вызвали живой интерес и сопровождались многочисленными вопросами.

В продолжение работы семинара на следующий день его участники посетили предприятие «Светлогорский завод сварочных электродов». Это — традиция. При проведении конференции или семинара участники имеют возможность оз-



накомиться с организацией производства материалов на предприятии, выступающим организатором мероприятия.

Светлогорский завод сварочных электродов — крупнейший в Беларуси и один из крупнейших производителей покрытых электродов на территории СНГ. Светлогорскому заводу есть чем гордиться, а его сотрудникам есть, что показать. Сегодня это предприятие — пример правильного руководства и многократной отдачи. В 2010 г., когда Светлогорский завод только вошел в состав группы компаний «ПлазмаТек», на предприятии было произведено около 600 т сварочной продукции, а сегодня эта цифра составляет более 20 тыс. т в год. По самым скромным подсчетам, предприятие охватывает 30 % всего белорусского рынка, его продукцией пользуются такие промышленные гиганты, как МАЗ, Гомсельмаш, МТЗ и другие.

«Самое главное — качество!» Такой девиз взяли на вооружение на Светлогорском заводе сварочных электродов и подтверждают его из года в год. Благодаря этому продукция пользуется огромным спросом за рубежом — более 90 % ее идет на экспорт.

— У нас большие планы на будущее, — рассказывает Александр Мельник, директор ООО «Светлогорский завод сварочных электродов». — Уже есть возможность нарастить объемы производства на 30 % и это не предел. Планируем открывать новые линии в новом, более просторном помещении. Также «Светлогорский завод сварочных электродов» будет являться учредителем аналогичного предприятия в Узбекистане.

Сегодня на заводе трудится 465 человек. Работа нелегкая, но условия вполне комфортные, и у сотрудников есть возможность заработать гораздо больше, чем в среднем по району. Так что уходить отсюда никто не торопится, а вот желающие поступить на работу проходят многоуровневую проверку. За последние девять лет создано более трехсот новых рабочих мест, а по итогам за 2018 г. объемы производства предприятия в 8 раз превосходят все вместе взятые объемы производства сварочной продукции нашей страны. С 2016 г. «Светлогорский завод сварочных электродов» является крупнейшим экспортером в Российскую Федерацию.

Участники семинара с большим интересом детально ознакомились с передовым опытом предприятия. На деловом ужине, состоявшемся в ходе работы семинара, ее участники смогли в неформальной обстановке обсудить различные аспекты такого непростого производства, как выпуск сварочных и наплавочных материалов, обговорить пути эффективного сотрудничества, наметить планы на будущее.

Особо следует подчеркнуть большое радушие, оказанное участникам организаторами семинара с белорусской стороны. Они сделали многое, чтобы обеспечить комфортную работу семинара, оставить самые светлые впечатления от пребывания на белорусской земле.

Особо следует подчеркнуть большое радушие, оказанное участникам организаторами семинара с белорусской стороны. Они сделали многое, чтобы обеспечить комфортную работу семинара, оставить самые светлые впечатления от пребывания на белорусской земле.

Особо следует подчеркнуть большое радушие, оказанное участникам организаторами семинара с белорусской стороны. Они сделали многое, чтобы обеспечить комфортную работу семинара, оставить самые светлые впечатления от пребывания на белорусской земле.

Е.А. Палиевская, В.Н. Липодаев

Г.М. ГРИГОРЕНКО — 80



24 серпня 2019 р. виповнюється 80 років доктору технічних наук, професору, академіку НАН України Георгію Михайловичу Григоренку — відомому вченому в галузі спеціальної електromеталургії, матеріалознавства та зварювання, лауреату Державної премії УРСР в галузі науки і техніки

(1980), премії імені Є.О. Патона НАН України (2017), премії Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій (2019).

Вся трудова, наукова та педагогічна діяльність Георгія Михайловича пов'язана з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, в який він прийшов у 1961 р. на дипломну практику, ще студентом Київського політехнічного інституту.

Починаючи з дипломної роботи, Г.М. Григоренко займається дослідженнями в галузі фізико-хімічних процесів зварювання та переплаву металів і сплавів. У 1967 р. він захистив кандидатську дисертацію, в якій вперше був описаний механізм поглинання газів рідким металом з атмосфери електричної дуги. У 1983 р. він блискуче захистив докторську дисертацію, присвячену вивченню фізико-хімічних процесів взаємодії двоатомних газів з рідким металом при плазмово-дуговому переплаві металів та сплавів.

З 1969 р. Г.М. Григоренко плідно працює над вирішенням завдань, що стоять перед спеціальною електromеталургією, розробляє технології виплавки високоазотистих сталей та сплавів із застосуванням низькотемпературної плазми, керує роботами з освоєння технології виплавки у вакуумно-дугових пічах методом переплавки «витратного плазмотрона» (завод «Дніпроспецсталь»).

Багато років Г.М. Григоренко займається розробкою технології плавки титанових сплавів в гарнісажних печах на Запорізькому моторобудівному заводі («Мотор Січ»). З 1973 р. керує роботами по створенню на Запорізькому титано-магнієвому комбінаті найпотужнішої плазмово-дугової печі для виплавки зливків з титанової губки та кускових відходів титану, яка була введена в експлуатацію у 1978 р. У 1980 р. робота по плазмово-дуговій виплавці зливків сталей, сплавів

та титану була відзначена Державною премією УРСР в галузі науки і техніки.

Фундаментальні дослідження механізмів та закономірностей взаємодії газів з рідкими металами, газообмінних процесів при плавці металів із застосуванням електродугового, плазмового та індукційного джерел нагріву стали в основі створення нових процесів виплавки монокристалів тугоплавких металів, індукційної плавки в секційному охолоджуваному кристалізаторі, процесу дугошлакового переплаву.

Г.М. Григоренко користується заслуженим авторитетом у наукових колах України та за кордоном. У 1974–1977 рр. він був керівником програми Радянсько-Американського наукового співробітництва в галузі електromеталургії та зварювання, проводив роботи з вченими Массачусетського технологічного інституту, Мічиганського та Стенфордського університетів, інституту Баттеля в Колумбусі. З 1995 р. і по теперішній час він співпрацює з Національним політехнічним університетом у м. Нансі (Франція).

Вже понад 35 років Георгій Михайлович очолює один з найбільших відділів ІЕЗ ім. Є.О. Патона – відділ фізико-хімічних методів досліджень матеріалів. Під його керівництвом працює близько 60 співробітників, серед яких два доктори та 14 кандидатів наук. Відділ займається проблемами матеріалознавства в зварюванні та металургії, у тому числі якістю зварних з'єднань, газотермічних покриттів виробів відповідального призначення, створенням композиційних матеріалів, бере участь в роботах по створенню нових процесів на основі плазмово-дугових, індукційних джерел нагріву та електрошлакового процесу.

З 1993 р. Г.М. Григоренко є заступником головного редактора журналу «Современная электрометаллургия», входить до редколегії журналу «Автоматическая сварка» та ще двох журналів, один з яких видається у Польщі.

Він зі своїми учнями заснував школу, яка має визначні досягнення в фундаментальних дослідженнях.

Поряд з плідною науковою діяльністю Г.М. Григоренко веде активну педагогічну і науково-організаційну роботу.

Велику увагу Георгій Михайлович приділяє підготовці наукових кадрів та щедро ділиться своїми знаннями з молоддю. Під його керівництвом підготовлено 11 кандидатів та 7 докторів наук.

З 1982 по 2015 рр. він був заступником завідувачого базової кафедри «Фізична металургія та ма-

теріалознавство» Московського фізико-технічного інституту.

З 1999 по 2013 рр. — професор НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

У 2010 р. за ініціативи Г.М. Григоренка при ІЕЗ ім. Є.О. Патона було створено Спеціалізовану вчену раду із захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора (кандидата) технічних наук за новими спеціальностями «Матеріалознавство» та «Металургія чорних та кольорових металів і спеціальних сплавів», яку він очолює по теперішній час, а також секцію Вченої ради «Металургія та матеріалознавство» при ІЕЗ.

Г.М. Григоренко самостійно і в співавторстві опублікував майже 750 наукових праць, серед яких 11 монографій (чотири видано у Великій Британії і одна в Китаї) і понад 120 авторських свідоцтв і зарубіжних патентів.

За великий внесок у розвиток вітчизняної науки та освіти, міжнародних наукових контактів

Георгія Михайловича відзначено медаллю «За трудову доблесть» (1984), Почесною грамотою Верховної Ради України (2004), відзнаками Національної академії наук України «За підготовку наукової зміни» (2008), «За наукові досягнення» (2009), «За професійні здобутки» (2014), нагородою Міжнародної академії рейтингових технологій і соціології «Золота Фортуна» — медаллю «Народна шана українським науковцям 1918-2018» (2019).

Г.М. Григоренко — великий вчений, який зробив значний внесок у розвиток спеціальної електрометалургії, він є генератором багатьох наукових ідей і конструкторських розробок, організатором науково-педагогічної діяльності в галузі електрометалургії та матеріалознавства.

Щиро вітаємо ювіляра, бажаємо міцного здоров'я, добра, творчої наснаги та успіхів у всіх напрямках його різноманітної діяльності на благо України.

В.Ф. ДЕМЧЕНКО — 80



В.Ф. Демченко — кандидат фізико-математичних наук (1970), доктор технічних наук (1991), професор, провідний науковий співробітник відділу фізики газового розряду і техніки плазми. Народився 3 серпня 1939 р. у Києві. Закінчив у 1956 р. із золотою медаллю Тарандинцівську середню школу на Полтавщині.

Навчався (1956–1961) на механіко-математичному факультеті Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка, отримав фах математика-обчислювача. Протягом 1961–1964 рр. працював в Інституті кібернетики АН УРСР. Вперше в світі розв'язав на ЕОМ задачу планової фільтрації для потреб будівництва Північно-Кримської та Красном'янської зрошувальних систем. На чолі групи інженерів займався розробкою комп'ютерної системи оптимального управління рухом перших радянських підводних човнів.

У 1964 р. став одним із перших співробітників організованої з ініціативи Б.Є. Патона лабораторії (пізніше відділ) математичних методів досліджень фізико-хімічних процесів при зварюванні, у якому пропрацював більше 40 років. За сприяння Бориса Євгеновича отримав можливість долучитися до наукової школи видатного радянського математи-

ка О.А. Самарського. Наукові ідеї О.А. Самарського та щаслива нагода особистого спілкування із цією визначною особистістю протягом більш ніж 25 років визначили напрямок наукової діяльності В.Ф. Демченка — обчислювальна фізика технологічних процесів зварювання та споріднених технологій.

Постановка обчислювального експерименту в галузі зварювання та спеціальної електрометалургії була б неможливою без творчої співпраці з провідними науковцями ІЕЗ — Б.І. Медоваром, І.К. Походнею, А.М. Макарою, Ю.В. Латашом, О.Ю. Вороніним, Ю.А. Стеренбогеном. Величезні обсяги експериментальних даних та параметрів режимів зварювання і наплавлення, накопичені в технологічних відділах ІЕЗ за багато років, спонукали до розробки інформаційних та експертних систем: експертної системи проектування технологій механізованого електродугового наплавлення (з І.О. Рябцевим), експертної системи з технологій зварювання легких сплавів (з А.Я. Іщенко), банка даних гігієнічних характеристик зварювальних матеріалів (з О.Г. Левченком), банка даних режимів дугового зварювання конструкційних сталей (з П. Зайффартом). Розроблені системи знайшли впровадження на промислових підприємствах, науково-дослідних та навчальних закладах України, Росії та Польщі.

Неординарні задачі механіки суцільного середовища, які виникають при дослідженні фізичних явищ в технологічних процесах зварювання,

спонукали В.Ф. Демченка до розробки методів чисельної реалізації цих задач на ЕОМ. Будучи переконаним у тому, що правильно виконана робота водночас мусить бути і красивою, намагався при розробці обчислювальних методів шукати елегантних і водночас природних за фізичним змістом шляхів. Методи розрахунку задач в шарувато-неоднорідних середовищах за наявності розривів розв'язку (неідеальний контакт, анодний шар); економічні методи розрахунку задач конвективного переносу енергії маси та імпульсу, алгоритми чисельного розрахунку електромагнітних процесів склали основу для комп'ютерного моделювання складних мультифізичних процесів, притаманних технологічним процесам зварювання. У цьому напрямку наукові інтереси В.Ф. Демченка

та І.В. Кривцуна збіглися. Співпраця фахівця з обчислювальних методів та фізика-теоретика дозволила поставити та розв'язати ряд нових задач фізики зварювальної дуги. Низка наукових статей за матеріалами цих досліджень опублікована у вітчизняних та зарубіжних виданнях.

Від своїх батьків — сільських вчителів — Володимир Федорович успадкував потребу та вміння навчати. Читав лекції студентам кафедр гідродинаміки і теплообміну, математичної фізики, обчислювальної математики і теоретичної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, входив до складу експертної ради ВАК України. Нагороджений відзнакою НАН України «За підготовку наукової зміни».

Редакція та редколегія журналу

Подписка – 2020 на журнал «Автоматическая сварка»

www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as

Подписной индекс 70031

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
1200 грн.	2400 грн.	90 дол. США	180 дол. США
В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.			

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств:

ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



Подписка – 2020 на журнал «The Paton Welding Journal»

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Подписной индекс 21971



Украина		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	192 дол. США	384 дол. США
В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.			

Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.

В 2019 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2017 гг. в формате *.pdf.

Подписано к печати 11.07.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,34.

Печать ООО «ДИА». 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

© Автоматическая сварка, 2019

Cutting World 2020

Ярмарка профессиональных технологий резки

С 28 по 30 апреля 2020 г. Cutting World будет открыта в Messe Essen. Это единственная выставка, которая концентрируется на всей технологической цепочке на тему резки. Многочисленные экспоненты уже воспользовались возможностью, чтобы обеспечить зоны стендов в новом зале 8. В их число входят следующие компании: Assfalg, Boschert, Cam Concept, Eckelmann, Kjellberg, MGM, ProCom and Rosenberger, Air Liquide Deutschland, BKE, IHT Automation, NUM, STM Waterjet and Yamazaki Mazak. Заинтересованные участники могут найти регистрационные документы на www.cuttingworld.de. Крайний срок регистрации 30 ноября 2019 г.

«Cutting World позволит нам представить наше программное обеспечение CAD / CAM компетентной торговой общественности. Кроме того, мы надеемся на живой обмен идеями с другими участниками. Эта ярмарка предложит оптимальные условия для этой цели», — сказал Бернхард Терзер, управляющий директор Cam Concept. Майкл Розер, менеджер по продажам машиностроительной компании Boschert, также следил за предстоящей выставкой: «Мы с нетерпением ждем участия в Cutting World, которая, как выставка, посвящена исключительно резке. Мы ждем профессионалов и дискуссий и как экспонент будем рады внести свой вклад в превращение Cutting World в ведущее выставочное событие во всем мире». Ассортимент, предлагаемый на Cutting World, будет включать, помимо прочего, инновационные установки для кислородно-ацетиленовой резки, установки для плазменной резки, системы лазерной резки, установки для водоструйной резки. Помимо технологий резки, ассортимент, предлагаемый на выставке, будет включать рабочие процессы в восходящем и нисходящем направлениях, начиная с планирования, управления программным обеспечением и системами фильтрации, удаление заусенцев и скашивание кромок материалов вплоть до хранения и логистики. Параллельно с выставкой будет проведен Немецкий конгресс по резке и Немецкий конгресс по газопламенной резке.

Конференции состоятся в Messe Essen. В рамках программы конгрессов экспоненты также смогут выступить с лекциями по передовой практике и впоследствии представить соответствующие машины на своих стендах. Для посетителей Cutting World в стоимость билета входит участие в Немецком конгрессе по резке и Немецкой конференции по газопламенной резке. Волкер Кринк, руководитель отдела развития в Kjellberg Vertrieb GmbH, объясняет, что стало решающим для участия компании в выставке: «Cutting World — единственное мероприятие в Германии, которое на 100 % посвящено технологиям резки. Как ведущий производитель технологий плазменной резки, Kjellberg должен быть там».

В 2020 г. Cutting World впервые пройдет в модернизированном зале 8 в Messe Essen. Экспоненты и посетители попадут в зал через новое, залитое светом стеклянное фойе. Восточный конгресс-центр расположен в непосредственной близости и будет принимать Немецкий конгресс по резке и Немецкую конференцию по газопламенной резке.

Cutting World станет идеальным местом, где экспоненты смогут представить новые продукты и вступить в дискуссии с деловыми партнерами. Сочетание теории и практики позволит совершенно по-новому взглянуть на эффективность этого высокотехнологичного сектора и увеличит его потенциал продаж. Кристина Кляйнпасс, руководитель проекта «Мир резки», считает, что ярмарка в Эссене станет еще одной возможностью для экспонентов найти клиентов: по данным Schneidforum Consulting (организатор Немецкого конгресса по резке и Немецкой конференции по газопламенной резке), значительная часть из примерно 36000 режущих установок с ЧПУ в Германии расположена в Рурской области. Число квалифицированных рабочих, операторов, поставщиков комплектующих и лиц, принимающих решения в секторе Рейна и Рура, во много раз больше.

Кроме того, участники Cutting World получают выгоду от благоприятного для инвестиций климата, потому что рынок режущих установок находится в состоянии постоянного изменения. Почти половине существующих металлорежущих станков уже более семи лет, и в этом секторе все больше требуются современные процедуры создания сетей и взаимосвязи последующих и начальных процессов обработки. Благодаря технологиям Industry 4.0 эксперты ожидают дополнительный потенциал получения прибыли в диапазоне миллиардов Euro для машиностроения в Германии в ближайшие годы.

По материалам пресс-релиза Cutting World 2020

