

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
академик **Б. Е. Патон**

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона
д.т.н. **Г. М. Григоренко** (зам. гл. ред.),
д.т.н. **С. В. Ахонин**, д.т.н. **Д. М. Дяченко** (отв. секр.),
д.т.н. **И. В. Кривцун**, д.т.н. **Л. Б. Медвар**,
д.т.н. **Б. А. Мовчан**, д.т.н. **А. С. Письменный**,
д.т.н. **А. И. Устинов**, д.т.н. **В. А. Шаповалов**

Ученые университетов Украины
д.т.н. **В. С. Волошин**, ПГТУ, Мариуполь
д.т.н. **М. И. Гасик**, НМетАУ, Днепр
д.т.н. **О. М. Ивасишин**, Ин-т металлофизики, Киев
д.т.н. **П. И. Лобода**,
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского», Киев
д.т.н. **А. В. Овчинников**, ЗНТУ, Запорожье

Зарубежные ученые
д.т.н. **К. В. Григорович**
МИСиС, Москва, РФ
д.х.н. **М. Зиниград**
Ун-т Ариэля, Израиль
д.т.н. **А. А. Ильин**
МАТИ-РГТУ, Москва, РФ
д.ф.-м.н. **Г. Младенов**
Ин-т электроники, София, Болгария
д.т.н. **А. Митчелл**
Ун-т Британской Колумбии, Канада
д.т.н. **Г. Ф. Тавадзе**
Ин-т металлург. и материаловед.
им. Ф. Тавадзе, Тбилиси, Грузия
д.т.н. **Цоуха Джанг**
Северо-Восточный ун-т, Шеньян, Китай

Учредители

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка» (издатель)

Адрес редакции журнала «Современная электрометаллургия»

Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Украина, 03150, г. Киев,
ул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77
Тел.: (38044) 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Редактор
Д. М. Дяченко
Электронная верстка
Л. Н. Герасименко, Т. Ю. Снегирева

Свидетельство о государственной регистрации
КВ 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445

DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

Рекомендовано к печати
Ученым советом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал
обязательна. За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Протоковилев И.В., Петров Д.А., Порохонько В.Б. Получение титанового сплава ОТ4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа 3

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Ахонин С.В., Фирстов С.А., Северин А.Ю., Кузьменко Н.Н., Березос В.А., Кулак Л.Д. Электронно-лучевая выплавка жаропрочных титановых композитов системы Ti-Si-Al-Zr-Sn 7

Устинов А.И., Полищук С.С., Демченков С.А., Мельниченко Т.В. Получение толстых вакуумных конденсатов высокоэнтропийных сплавов CrFeCoNiCu и AlCrFeCoNiCu методом электронно-лучевого осаждения 13

Дидикин Г.Г., Петренко А.К. Электронно-лучевое испарение железа и конденсация его отраженного парового потока 22

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

Григоренко С.Г., Белоус В.Ю., Таранова Т.Г., Вржжжевский Э.Л., Костин В.А. Структура и свойства жаропрочного псевдо- α -титанового сплава системы Ti-Al-Sn-Zn-Mo-V-Si и его сварных соединений 27

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Панченко А.И., Кийко С.Г., Гасик М.И., Сальников А.С., Левченко Г.В., Горобец А.П., Пройдак Ю.С., Климчик Ю.В. Современные технологии выплавки и разлива стали EA1N для производства железнодорожных осей 35

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гречанюк Н.И., Гречанюк В.Г. Механические свойства дисперсных и слоистых композиционных материалов на основе меди и молибдена 43

Костин В.А., Григоренко Г.М. Компьютерное моделирование структурных превращений в сплавах с эффектом памяти формы 50

ИНФОРМАЦИЯ

Наши поздравления 59

К 90-летию Михаила Ивановича Гасика 60

3D печать в судостроении 62

ЗМІСТ

CONTENTS

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Протоковілов І.В., Петров Д.А., Порохонько В.Б.
Отримання титанового сплаву ОТ4, легованого марганцем, в електрошлаковій печі камерного типу 3

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Protokovilov I.V., Petrov D.A., Porohonko V.B. Producing of titanium alloy OT4, alloyed with manganese, in electroslag chamber-type furnace 3

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

Ахонін С.В., Фіртсов С.О., Северин А.Ю., Кузьменко М.М., Березос В.О., Кулак Л.Д. Електронно-променева виплавка жароміцних титанових композитів системи Ti-Si-Al-Zr-Sn 7

ELECTRON BEAM PROCESSES

Akhonin S.V., Firstov S.A., Severin A.Yu., Kuzmenko N.N., Berezos V.A., Kulak L.D. Electron beam melting of heat-resistant titanium composites of Ti-Si-Al-Zr-Sn system 7

Устінов А.І., Поліщук С.С., Демченков С.О., Мельниченко Т.В. Отримання товстих вакуумних конденсатів високоентропійних сплавів CrFeCoNiCu та AlCrFeCoNiCu методом електронно-променевого осадження 13

Ustinov A.I., Polishchuk S.S., Demchenkov S.A., Melnichenko T.V. Producing of thick vacuum condensates of high-entropic alloys CrFeCoNiCu and AlCrFeCoNiCu by the method of electron beam deposition 13

Дідікін Г.Г., Петренко О.К. Електронно-променеве випаровування заліза та конденсація його відбитого парового потоку 22

Didikin G.G., Petrenko O.K. Electron beam evaporation of iron and condensation of its reflected vapor flow 22

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТАЛУРГІЇ

Григоренко С.Г., Білоус В.Ю., Таранова Т.Г., Вржижєвський Е.Л., Костін В.А. Структура та властивості жароміцного псевдо- α -титанового сплаву системи Ti-Al-Sn-Zr-Mo-V-Si та його зварних з'єднань 27

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Grigorenko S.G., Belous V.Yu., Taranova T.G., Vrzhezhevsky E.L., Kostin V.A. Structure and properties of heat-resistant pseudo- α -titanium alloy of Ti-Al-Sn-Zr-Mo-V-Si system and its welded joints 27

ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Панченко О.І., Кийко С.Г., Гасік М.І., Сальніков А.С., Левченко Г.В., Горобець А.П., Пройдак Ю.С., Клімчик Ю.В. Сучасні технології виплавки і розливання сталі EA1N для виробництва залізничних осей 35

ENERGY-RESOURCES SAVING

Panchenko A.I., Kijko S.G., Gasik M.I., Salnikov A.S., Levchenko G.V., Gorobets A.P., Projdak Yu.S., Klimchik Yu.V. Modern technologies of melting and casting of steel EA1N for production of railway axles 35

НОВІ МАТЕРІАЛИ

Гречанюк Н.І., Гречанюк В.Г. Механічні властивості дисперсних і шаруватих композиційних матеріалів на основі міді та молібдену 43

NEW MATERIALS

Grechanyuk N.I., Grechanyuk V.G. Mechanical properties of dispersed and laminar composite materials on copper and molybdenum base 43

Костін В.А., Григоренко Г.М. Комп'ютерне моделювання структурних перетворень в сплавах з ефектом пам'яті форми 50

Kostin V.A., Grigorenko G.M. Computer modeling of structural transformations in shape memory alloys 50

ІНФОРМАЦІЯ

Наші вітання 59

До 90-річчя Михайла Івановича Гасика 60

3D друк в суднобудуванні 62

INFORMATION

Our congratulations 59

Towards the 90th birthday anniversary of Mikhail Ivanovich Gasik 60

3D printing in shipbuilding 62

Адреса редакції журналу

«Сучасна електрометалургія»
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України
Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77; тел.: 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com
Свідцтво про державну реєстрацію KB 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

Editorial Address

of Journal «Electrometallurgy Today»
The E. O. Paton Electric Welding Institute, NASU
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200 82 77; Tel.: 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com
State Registration Certificate KV 6185 of 31.05.2002
ISSN 2415-8445, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem>

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

Коллектив Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины и редколлегия журнала «Современная электрометаллургия» поздравляют лауреатов Премии Кабинета Министров Украины за разработку и внедрение инновационных технологий.

Торжественная церемония награждения лауреатов по итогам конкурса Премии Кабинета Министров Украины за 2018 г. состоялась в Министерстве образования и науки Украины 16 мая 2019 г. в канун Дня Науки Украины.

Победителями конкурса за разработку «Инновационной технологии и оборудования для выращивания супербольших монокристаллов тугоплавких металлов (вольфрама и молибдена)» стали ученые Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины:

ГРИГОРЕНКО ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ — доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины, руководитель отдела;

ШАПОВАЛОВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Украины, руководитель отдела;

ШЕЙКО ИВАН ВАСИЛЬЕВИЧ — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник;

ПОМАРИН ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (посмертно);

ЯКУША ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

ГНИЗДЫЛО АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ — младший научный сотрудник;

НИКИТЕНКО ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

БУРНАШЕВ ВИТАЛИЙ РАФАТОВИЧ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.



Инновационная технология и созданные в Украине установки для выращивания монокристаллов тугоплавких металлов, в частности вольфрама и молибдена, не имеют аналогов в мире. Производство таких кристаллов открыло широкие перспективы их применения в различных отраслях промышленности.

Для реализации инновационных технологий в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины изготовлено отечественное уникальное оборудование и создан участок для выращивания супербольших монокристаллов различной конфигурации и назначения.

Сердечно поздравляем лауреатов с заслуженной наградой! Желаем им доброго здоровья, счастья, новых достижений и дальнейших творческих успехов!

К 90-ЛЕТИЮ МИХАИЛА ИВАНОВИЧА ГАСИКА



30 июня 2019 г. исполнилось 90 лет академику НАН Украины, иностранному члену РАН, НАН Грузии, почетному члену НАН Республики Казахстан, заслуженному деятелю науки и техники Украины, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой электрометаллургии

Национальной металлургической академии Украины Михаилу Ивановичу Гасику.

М.И. Гасик окончил Днепропетровский металлургический институт в 1954 г. (ныне НМетАУ) и с тех пор вся его научная и педагогическая деятельность неразрывно связаны с этим высшим учебным заведением. Начало научной деятельности М.И. Гасика связано с проведением исследований на заводе «Днепроспецсталь», Запорожском и Никопольском заводах ферросплавов, в лаборатории кафедры электрометаллургии, Запорожском алюминиевом и абразивном комбинатах и других предприятиях страны. Многоплановые теоретические и экспериментальные исследования, а также работы по освоению новых электрометаллургических технологий были обобщены в кандидатской (1961 г.) и докторской (1969 г.) диссертациях. М.И. Гасик — выдающийся ученый в области электрометаллургии стали и ферросплавов, электротермии цветных металлов и неорганических материалов. Им выполнены фундаментальные исследования по физической химии высокотемпературных процессов в металлических и оксидных системах на основе марганца, хрома, кремния, алюминия, разработаны эффективные технологии рафинирования ферросплавов в вакууме, выплавки специальных сталей для атомной энергетики, нефтегазовой отрасли, транспортного машиностроения.

Им подготовлены 56 кандидатов и 12 докторов технических наук в области электрометаллургии ферросплавов, стали и сплавов цветных металлов.

М.И. Гасик является автором более 500 научных работ, в том числе 26-ти монографий и 8-ми учебников. Монография «Марганец» (1997 г.) отмечена премией им. Е.О. Патона Президиума НАН Украины. В 1997 г. в США издана монография «Металлургия хрома», в которой авторы академик РАН Н.П. Лякишев и М.И. Гасик обобщили результаты своих многолетних исследований по металлургии хрома и его сплавов. Высокую оцен-

ку Президиума НАН Украины получили монографии «Электрометаллургия ферросилиция» (издана в Украине и Китае, премия З.И. Некрасова, 2012 г.), «Электротермия кремния» (премия им. Н.Н. Доброхотова, 2013 г.). М.И. Гасик является членом редакционной коллегии и соавтором изданного в России энциклопедического двухтомного словаря по металлургии под редакцией академика Н.П. Лякишева (2000 г.). В сотрудничестве с учеными Республики Казахстан издана монография «Хром Казахстана» (2001 г.).

Под редакцией М.И. Гасика Международным авторским коллективом ученых и специалистов ферросплавной промышленности стран (Украины, Финляндии, Норвегии, Южной Африки, Исландии) в Великобритании (Оксфорд) издана книга «Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology» (2013 г.).

Вышедший в свет в 1988 г. учебник «Теория и технология производства ферросплавов» (авторы М.И. Гасик, Н.П. Лякишев, Б.И. Емлин) допущен Министерствами образования Украины и РФ в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Металлургия черных металлов». Учебник переведен и издан в Китае. Учебник «Физикохимия и технология электроферросплавов» (М.И. Гасик и Н.П. Лякишев), изданный в 2005 г., утвержден Министерствами образования и науки Украины и РФ как учебник для студентов высших учебных заведений металлургического направления. Существенным вкладом в банк учебной литературы для подготовки бакалавров, магистров, аспирантов является учебное пособие «Металлургия ферросплавов» авторов Н.П. Лякишева, М.И. Гасика, В.Я. Дашевского, вышедшего в 3-х частях в издательстве «Учеба» ГТУ МИСиС (2009 г.).

Приоритет и научная новизна разработок М.И. Гасика защищены более чем 250-ю авторскими свидетельствами СССР, патентами Украины, России, США, Англии, Франции и других государств. Его работы, выполненные в соавторстве, отмечены тремя Государственными премиями Украины за: разработку и внедрение технологической схемы и постадийных процессов производства электротермического силумина для литых изделий широкого функционального назначения (1977 г.); электрометаллургический марганцевый комплекс Украины: научные и проектно-конструкторские разработки, освоение уникальных электропечей, внедрение новых энерго- и ресурсосберегающих технологий производства ферросплавов, повышение конкурентоспособной продукции и решение экологических заданий (1998 г.);

инвестиционный металлургический комплекс инновационных технологий производства стали и цельнокатаных железнодорожных колес, которые обеспечивают высокую конкурентоспособность их на международных рынках транспортного металла (2004 г.) и премией Совета Министров СССР «За техническое перевооружение производства марганцевых ферросплавов с внедрением печей большой мощности» (1990 г.).

За большой вклад в развитие теории и технологии металлургического производства и подготовку научных работников высшей квалификации и инженерно-технического кадрового потенциала Приднепровья М.И. Гасик награжден орденом «За заслуги III степени», Почетными грамотами Президиума Верховного Совета УССР (1977 г.) и Верховной Рады Украины (2010 г.).

По инициативе М.И. Гасика в ДМетИ (ныне НМетАУ) в 1976 г. создан электрометаллургический факультет, деканом которого он был в течение 12 лет. В настоящее время, как заведующий кафедрой электрометаллургии НМетАУ, Михаил Иванович ведет обширную педагогическую деятельность, активно участвует в разработке учебно-методических программ по различным металлургическим специальностям, является членом совета по лицензированию и аккредитации вузов горно-металлургического направления.

За высокие заслуги в области науки и техники Президиум Академии наук Высшей школы Украины награждает М.И. Гасика премией Ярослава Мудрого (2002 г.). Он внес большой вклад в решение актуальных проблем в области повышения эффективности ферросплавного и электросталеплавильного производства и решения экологических задач Приднепровья. Является лауреатом регионального конкурса «Світоті Придніпров'я» в номинации «Лучший деятель науки Приднепровья» (2012 г.). Решением правления Международной Соросовской программы образования в области точных наук (ISSEP) ему присужден грант Соросовского профессора № SPU07301 (1997 г.).

Михаил Иванович внес большой вклад в подготовку и аттестацию инженерных и научных кадров, будучи членом ряда специализированных советов по защите диссертаций, а также являясь в разные периоды времени членом экспертных советов ВАК СССР и ВАК Украины, членом секции металлургии Государственного Комитета по присуждению Ленинской и Государственных премий СССР, членом Комитета Украины по присуждению Государственных премий в области науки и техники. В течение длительного времени был заместителем председателя Приднепровского на-

учного центра НАН Украины и Министерства образования Украины.

М.И. Гасик продолжает вести большую научно-общественную работу: организует проведение научно-технических конференций, принимает участие в работе научно-технического совета по производству ферросплавов при Международном союзе металлургов, является членом редколлегии научно-технических журналов «Современная электрометаллургия», «Электрометаллургия», «Сталь», «Металлургическая и горнорудная промышленность», «Теория и практика металлургии», «Экология промышленности».

В течение многих лет сотрудничает с коллективами ученых ИЭС им. Е.О. Патона, ИЧМ им. З.И. Некрасова НАН Украины, Института металлургии УрО РАН, ИМет им. А.А. Байкова РАН, профессорско-преподавательскими коллективами МИСиС (Технический Университет), Химико-металлургического института им. Ж. Абишева Республики Казахстан. Отличительной особенностью научных исследований академика НАН Украины М.И. Гасика является создание инновационных технологических схем и процессов, а также крупно-масштабное внедрение их в промышленность со значительным экономическим эффектом.

Краткая справка-характеристика ученого Гасика М.И. помещена в трехтомном украинском энциклопедическом словаре (1986 г.). Он является Почетным гражданином районного центра г. Пологи Запорожской области.

Его вклад в мировую науку отмечен в изданиях «International Who's Who of intellectuals» (International Biographical Centre, Cambridge, England, 1997 г.), The International Directory of Distinguished Leadership (The American Biographical Institute, 1996 г.).

В 2019 г. горно-металлургический комплекс Украины отмечает свое 120-летие. Михаил Иванович Гасик — достойный представитель плеяды ученых, которые держат брэнд украинской горно-металлургической науки на мировом уровне.

Все, знающие Михаила Ивановича, отмечают его широкую эрудицию, глубокие знания по рассматриваемым проблемам, а также замечательные человеческие качества — порядочность, доброжелательность и отзывчивость.

Коллективы Национальной металлургической академии Украины, ИЭС им. Е.О. Патона и редколлегия журнала «Современная электрометаллургия» поздравляют Михаила Ивановича со знаменательной датой в его жизни, желают долгого здоровья, боевого настроения, творческого долголетия, семейного благополучия.

3D ПЕЧАТЬ В СУДОСТРОЕНИИ

Морская индустрия в целом не спешит принимать концепцию 3D печати. Использование непрерывного осаждения жидких металлов при программном управлении компьютера создало возможности для производства изделий сложных форм, таких как, например, поковки и отливки, избегая при этом необходимости в дорогой оснастке и временных задержек на изготовление пресс-форм. Несмотря на медленное начало, работы по разработке 3D технологий в Техническом университете Делфта в 2017 г. привели к производству первого в мире гребного винта путем осаждения металла.

Концепция 3D печати. Несколько методов для трехмерной печати с использованием металлов в настоящее время регулярно применяются специализированными организациями. По сути, они включают использование целевого источника тепла для плавления или спекания металлических сплавов при постепенном построении сложной трехмерной формы. Комплектуется компьютерная система с ЧПУ обычно многоосным роботом и направляющим источником тепла. Твердый металл в виде проволоки или порошка подается и плавится от источника тепла.

В одном случае используют лазер или электронный луч в качестве источника тепла в сочетании с металлическим порошком. Спекание происходит с помощью прямого лазера — Direct Metal Laser Sintering (DMLS) или электронного луча — Direct Metal Electron Beam Sintering (DMEBS). Эта методика наиболее эффективно применяется там, где требуется изготовить небольшие, delicate предметы. Примером является производство имплантатов [1–3].

Сварочная версия 3D печати «проволока-дуга» — Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) выполняется укладкой жидких капель металла (рис. 1). Эта техника больше подходит для производства более крупных и тяжелых инженерных компонентов, о чем свидетельствует производство изделий для судостроения и конструкций планера [4–6].

По сравнению с применением процессов WAAM и DMLS/DMEBS, сварочная версия наиболее подходит для производства более тяжелых и крупных конструкций, в то время как порошковая — для получения более мелких со сложной формой изделий. Другими словами, сварка — это, по сути, метод объемного наращивания, а исполь-

зование порошка — точный и строго контролируемый процесс.

Примеры производства WAAM. Несколько достижений в области 3D производства были получены и уместно проиллюстрировать их достижения применительно к судостроению (рис. 1–4).

Движущие силы по развитию WAAM. Основной движущей силой развития является значительная экономия материалов. Одна конкретная область применения — производство планеров. Многие компоненты в настоящее время выполняются путем механической обработки цельной заготовки послековки, при этом более 50 % исходного материала теряется в виде стружки. Другая рассматриваемая область — производство шасси, где при использовании аддитивного производства ожидаемая экономия материала составляет 70 %.

Текущая активность. Аддитивный метод изготовления изделий имеет несколько преимуществ, таких как значительное сокращение потерь материала, особенно при производстве многих разнообразных деталей, и способность быстро создавать большой ассортимент изделий для опытных работ.

Существует также ключевое преимущество, заключающееся в том, что процесс позволяет рассматривать возможности получения нетрадиционных конструкций, которые в противном случае невозможно практически изготовить из-за производственных ограничений и стоимости, например, из-за сложных или необычных геометрий, сопровождающихся необходимостью решения ряда проблем.

Ранняя работа в Rolls-Royce в Университете Крэнфилд была направлена на применение 3D печати для производства авиационных двигателей. Исследователями разработан процесс осаждения

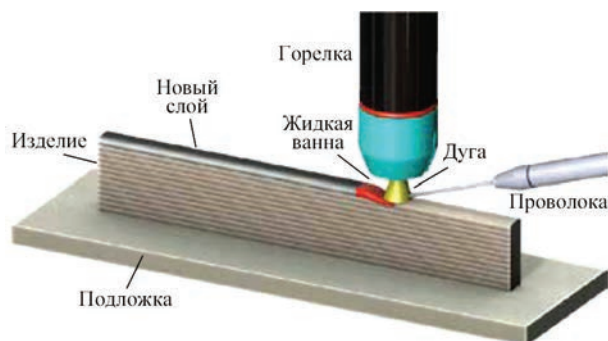


Рис. 1. Иллюстрация процесса WAAM



Рис. 2. Винт размерами 200×240×240 мм (материал: 1.5125 G3Si1)



Рис. 3. Корпус колокола размерами 230×380×380 мм (материал — алюминиевый сплав)

«проволока + дуга» для изучения возможности использования в качестве конструкционных материалов инконеля, титана, алюминия и различных никелевых сплавов. С тех пор акцент сместился на изготовление планеров. Хотя метод «лазер + порошок» активно применяется для быстрого прототипирования или получения очень небольших и сложных деталей, эта технология имеет ограничения из-за своей низкой скорости и размеров компонентов, которые нужно точно изготовить. Напротив, процессы, разрабатываемые в университете Крэнфилд, рассчитаны на высокие скорости осаждения. Центр Крэнфилда в настоящее время нацелен на уровень осаждения 10 кг/ч, по сравнению с обычным 0,1 кг/ч, используя «лазер + порошок», при котором может быть риск того, что материал не будет полностью уплотнен, если не произошло спекание между частицами порошка.

Аддитивные дуговые и проволочные системы также позволяют изготавливать детали размером несколько метров и упрощают процесс производства цельных линейных изделий.

Группа Damen Shipyards вошла в совместный консорциум с RAMLAB, Promarin, Autodesk, Бюро Веритас и разработала первый класс утвержденных гребных винтов. Ранняя работа по производству первого в мире винта WAAM в 2017 г. была прекращена [8]. Она была основана на дизайне Promarin, обычно встречающегося на буксире Damen Stan типа 1606 (рис. 5).

Стоимость оборудования. Типичная стоимость производственной системы составляет 750000 дол. США Система с осаждением проволоки со стандартным оборудованием для дуговой сварки в сочетании с шарнирным роботом с 5-ю осями обходится в 120000 дол. США [9].

Стоимость расходных материалов. В настоящее время доступно только ограниченное количество металлических сплавов для аддитивного производства с использованием порошков, в ос-

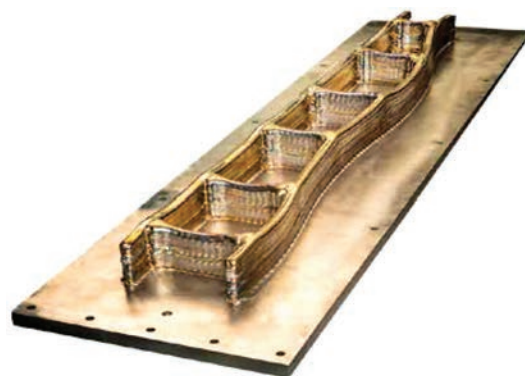


Рис. 4. Основной конструктивный элемент крыла самолета

новном это сплав Ti-6Al-4V, некоторые нержавеющие стали, Inconel 625/718 и Al-Si-10Mg. Стоимость порошков многих нержавеющих сталей находится в районе 400 дол./кг. Гораздо меньше проблем, когда дело доходит до процесса сварки плавлением. Существует широкий спектр сварочных проволок, большинство из которых можно использовать для осаждения дугой. Из-за большого количества производимых проволок ее стоимость не столь высока. Как правило, присадочная проволока из нержавеющей стали легко доступна по цене 30 дол./кг.

Скорость осаждения. Скорость осаждения порошка очень низкая и составляет в среднем 0,1 кг/ч. С развитием технологий она может существенно увеличиваться, но в настоящее время это сильно ограничивает применение. В процессе «проволока + дуга» производительность составляет 10 кг/ч для широкого спектра металлических сплавов (таблица).

Ограничения процесса. Многие сплавы могут быть использованы во время процесса WAAM. Однако некоторые материалы гораздо более склонны к взаимодействию с остаточным кислородом и это может привести к поверхностному окислению. Титановые сплавы особенно чувствительны, но нержавеющая сталь и многие низколегированные стали также требуют дополнительной защиты инертным газом.



Рис. 5. Бронзовый винт (1300 мм, 180 кг)

Сравнение методов производства «проволока + дуга» (WAAM) и «луч + порошок» (DMLS/DMEBS)

Присадочные материалы	WAAM	DMLS/DMEBS
	Широкий выбор. Все стандартные присадочные проволоки легко доступны	Ограничен выбор. Порошки, как правило, должны быть специально изготовлены
Стоимость присадочных материалов	Низкая	Высокая
Стоимость оборудования	Низкая. Стандартное оборудование для дуговой сварки с газовой защитой	Высокая. Специальное высокоточное оборудование
Скорость осаждения	Высокая (10 кг/ч)	Низкая (0,1 кг/ч)
Применение	Большие и тяжелые детали массой свыше 5 кг и размером более 460 мм	Мелкие и легкие детали с высокой точностью: протезы и детали аэрокосмической техники
Прочность	Как правило на уровне исходного материала	Доступная информация ограничена, но в общем хорошая
Преимущества/недостатки	Низкая стоимость После нанесения часто необходима механическая обработка	Высокая стоимость. Точное нанесение позволяет получать почти готовые детали

При электронно-лучевом процессе обеспечивается защита, поскольку операции выполняются в вакууме. Тем не менее — это дорогая альтернатива дуговой сварке.

Преодоление проблемы загрязнения кислородом. Проблема адекватной защиты была решена путем разработки гибких корпусов, которые могут продуваться инертным газом, обычно аргоном. Они могут вместить все сварочное оборудование и робот и обеспечить защиту инертного газа в течение всего процесса осаждения.

Гибкая технология корпусов. С момента появления концепции были достигнуты значительные успехи в разработке корпусов еще более двух десятилетий назад. Например, Huntingdon Fusion Techniques Ltd [10] возглавил компанию по разработке системы специально для сварочной промышленности. Эти инновационные продукты предлагают значительную привлекательность как альтернативу вакууму и «перчаточному ящику» значительно снижающему стоимость.

Самый большой объект на сегодняшний день составляет 27 м³, достаточный для размещения всех заготовок, сварочного оборудования и даже программируемой роботизированной системы. Корпус продувается инертным газом, содержание кислорода достаточно низкое, чтобы предотвратить окисление во время сварки и охлаждения.

Мониторинг содержания кислорода. Контроль и мониторинг в реальном времени содержания кислорода в продувочном газе имеет решающее значение. Методы измерения содержания кислорода были доступны в течение десятилетий, но только недавно разработаны специальные инструменты для сварки. Пользователи все чаще требуют полного отсутствия изменения цвета осаждаемого металла и потери коррозионной стойкости, что подразу-

мевает продувку систем. Содержание кислорода в газе должно составлять всего 20 частей на миллион (0,002 %).

Закключение. Основным преимуществом 3D печати является то, что она открывает возможности для производства изделий со сложным дизайном, в противном случае это не может быть практичным или экономичным решением. С точки зрения применения WAAM и DMLS/DMEBS, сварочная версия наиболее подходит для тяжелых и крупных продуктов, в то время как порошковая лучше всего применяется там, где изделия небольшие и сложные по форме.

Многие сплавы должны быть защищены от загрязнения во время проведения сварки. Формирование оксидов металлов может снизить их коррозионную стойкость и повлиять на механические свойства. Использование эффективной бескислородной среды инертного газа имеет важное значение.

Список литературы

- (2017) Cancer patient receives first 3D printed sternum and rib cage. *Orthopaedics and Spine*, July.
- Bertol et al. (2010) Direct metal laser sintering. *Materials & Design*.
- (2018) Laser-based additive manufacturing processes. Woodhead Publ.
- (2017) World's first class approved 3D printed propeller. *Int. Institute of Marine Surveying*, May.
- Mehnen et al. (2010) Design for wire and arc additive layer manufacture. *20th CIRP Design Conf., Nantes, April 2010*.
- Williams et al. (2016) Wire & arc additive manufacturing. *Materials Science & Technology*, **32**.
- Williams, S. (2016) WAAM current and future developments. Additive manufacturing for aerospace. *Defence and Space Conf., London, March*.
- (2017) Damen shipyards release further details about world's first 3D printed propeller. *3D Printing Industry*, September.
- Martina, F. *Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison*.
- Huntingdon Fusion Techniques Ltd, UK.

М. Флетчер (по материалам «White Paper»)