1 (89) 2021
Журнал выходит 6 раз в год.
Издается с мая 2006 г.
Подписной индекс **20994**
в каталоге «Пресса России»
Подписной индекс **E20994**
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»
Подписной индекс **K0103** в каталоге российской прессы «Почта России» — персональная подписка

Производственно-технический журнал
СВАРЩИК В РОССИИ
№ 1 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Новости техники и технологий 4

Технологии и материалы

К вопросу оптимизации температурных полей при послойном формировании ответственных изделий из сплавов на основе титана.

А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, С.С. Козлитина, Н.И. Пивторак 6

Алюминиевые сплавы для промышленных сварных конструкций

Зарубежный опыт технологий получения алюминиевых сплавов и процессов сварки для промышленного изготовления конструкций.

Т.М. Лабур, О.К. Маковецкая 10

Оборудование для производства

Резак РЗ-ФЛЦ для ручной кислородной резки прибылей крупного лома.

В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко 29

Технологии ремонта

Восстановление сваркой уникальных базовых деталей промышленного оборудования 36

Термическая обработка сварных соединений

Сварка и термическая обработка сварных швов.

И.В. Щудлак, В.Г. Левицкий 38

Наши консультации 40

CONTENT

News of engineering and technology 4

Technologies and materials

- On the optimization of temperature fields during layer-by-layer formation critical products made of titanium-based alloys.

  A.S. Milenin, E.A. Velikoivanenko, G.F. Rozynka, S.S. Kozlitina, N.I. Pivtorak 6

Aluminum alloys for industrial welded structures

- Foreign experience in technologies for producing aluminum alloys and welding processes for industrial fabrication of structures.

  T.M. Labour, O.K. Makovetskaya 10

Equipment for the production

- R3-FLC cutter for manual oxygen cutting of large cast profits.

  V.M. Litvinov, Yu.N. Lysenko 29

Repair technology

- Restoration by welding of unique basic parts industrial equipment 36

Heat treatment of welded joints

- Welding and heat treatment of welded seams.

  I.V. Shchudlak, V.G. Levitskiy 38

Our consultations 40

Производственно-технический журнал

СВАРЩИК В РОССИИ

технологии производство ремонт

1(89) 2021

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-24185 от 25.04.2006, выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

Издатель	ООО «Центр трансфера технологий Института электросварки им. Е. О. Патона», ООО «Специальные сварочные технологии»
Тел. моб.	+7 903 795 18 49
E-mail	ctt94@mail.ru
Главный редактор	В. Д. Позняков
Зам. главного редактора	В. Г. Абрамишвили
Редактор	В. Г. Абрамишвили
Верстка и дизайн	В. Г. Абрамишвили

За достоверность информации и содержание рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.
Мнение авторов статей не всегда совпадает с позицией редакции.
Рукописи не рецензируются и не возвращаются.
Редакция оставляет за собой право редактировать и сокращать статьи. Переписка с читателями — только на страницах журнала.
При использовании материалов в любой форме ссылка на «Сварщик в России» обязательна.

Подписано в печать 23.03.2021. Формат 60×84 1/8.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура PetersburgC.
Отпечатано в ЗАО «ТДДС-Столица-8».
Заказ № 1975 от 19.03.2021. Тираж 1000 экз.

Издание выходит при содействии производственно-технического журнала **«Сварщик»**

Учредители	Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, ООО «Технопарк ИЭС им. Е.О. Патона»
Издатель	НТК «ИЭС им. Е.О. Патона» НАНУ
Главный редактор	В. Д. Позняков
Зам. главного редактора	В. Г. Абрамишвили
Редакционная коллегия	В. А. Белинский, Ю. К. Бондаренко, А. В. Вавилов, Ю. В. Демченко, В. М. Илюшенко, Г. И. Лащенко, О. Г. Левченко, В. М. Литвинов, Л. М. Лобанов, А. А. Мазур, В. И. Панов, П. П. Проценко, С. В. Пустовойт, И. А. Рябцев А. А. Сливинский
Адрес редакции	03150, Киев, а/я 337
Тел./факс	+380 44 200 80 14
E-mail	welder.kiev@gmail.com
URL	**http://www.welder.stc-paton.com**

Подписка-2021

Подписной индекс **20994**
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103**
в каталоге российской прессы
«Почта России» — персональная подписка

К вопросу оптимизации температурных полей при послойном формировании ответственных изделий из сплавов на основе титана.

А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, С.С. Козлитина, Н.И. Пивторак

Рассмотрены характерные технологические задачи оптимизации температурных полей в изделиях из титановых сплавов при их послойном формировании. В частности, разработан подход по снижению общего перегрева металла изделия путём обеспечения естественной диссипации избыточной тепловой энергии в окружающую среду. На примере отечественной технологии электронно-лучевого формирования xBeam 3D Metal Printer показан порядок использования предложенных подходов, обеспечивающих качественное формирование валиков при производстве балочных и цилиндрических конструкционных элементов из титанового сплава ВТ1.

Зарубежный опыт технологий получения алюминиевых сплавов и процессов сварки для промышленного изготовления конструкций.

Т.М. Лабур, О.К. Маковецкая

Рассмотрена динамика развития технологических процессов производства алюминия и его сплавов, которые сегодня существенно заполнили мировой рынок товаров и используются во многих отраслях современного машиностроения. Традиционно используются конструкционные материалы на алюминиевой основе в летательных аппаратах, в частности в военных, пассажирских и грузовых самолетах, а также в изделиях ракетно-космической техники. Особый статус алюминиевые сплавы получили в конструкциях транспортных средств (автомобилестроении, вагоностроении), речном и морском судостроении, а также гражданском и промышленном строительстве.

Резак Р3-ФЛЦ для ручной кислородной резки прибылей крупного литья.

В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко

Резак Р3-ФЛЦ является первым ручным резаком специального назначения, конструкция которого учитывает особенности кислородной резки прибылей крупного литья, имеющего по линии предполагаемого реза пригар и остатки формовочной смеси. Резак позволяет выполнять разделительную резку прибылей литья толщиной до 500 мм без отставания линии реза, а с применением специальных технологических операций (резка с изменением угла режущей струи в плоскости реза, разводка полости реза, ввод головки резака в полость реза и т.д.) – до 800 мм. Разработан резак специального назначения Р3-ФЛЦ, учитывающий тяжелые условия работы при газокислородной резке прибылей литья и лома толщиной до 500 мм. Приведены технические характеристики резака, описаны его устройство и работа, представлены чертежи основных узлов и деталей, имеющих расчетные каналы. На конкретных примерах показана работа резака. Качество поверхности реза проиллюстрировано фотографиями.

Сварка и термическая обработка сварных швов.

И.В. Щудлак, В.Г. Левицкий

Статья посвящена изобретателю, открывателю и первопроходцу теории термической обработки сталей Чернову Д.К. и его продолжателю Королькову П.М. В статье описан опыт работ по практическому применению термической обработки сварных соединений в монтажных условиях отделом главного сварщика ДП «ГСИ-Укрнефтегазстрой»: были проведены ТО и 25 000 стыков трубопроводов различных диаметров, начиная от 50 и до 1000 мм. Работы проводились на Одесском НПЗ, Херсонском НПЗ, ООО «Карпатнефтехим», Одесском цементном заводе, Красноперекопском содовом заводе, на заводе «ТИТАН» (г. Армянск) и др. промышленных предприятиях.

Запуск самого мощного в мире нейтронного реактора ПИК

8 февраля 2021 г. президент РФ Владимир Путин осуществил запуск самого мощного в мире нейтронного реактора - ПИК – в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) им. Б.П. Константинова, входящем в состав национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Исследовательский реактор ПИК - высокопоточный источник нейтронов, который по ряду своих параметров считается лучшей в мире установкой для изучения вещества на уровне наномасштабов, и в ближайшие 20-25 лет останется уникальным и самым мощным в мире. Он входит в один из 6 проектов, которые правительство России включило в программу создания установок класса «мегасайенс» на территории России.

ПИК представляет собой реактор водо-водяного типа, где обычная вода используется для отвода тепла, а «тяжелая» вода - дейтерий - для замедления ядерной реакции. Вылетающие из зоны ядерной реакции пучки нейтронов выводятся в специальные каналы различной конфигурации, каждый из которых - отдельная исследовательская станция. Они различаются набором оборудования и задачами. 5 станций к февралю 2021 г. уже функционируют, остальные 20 построят до 2024 г.

ПИК будут использовать для исследований в области физики, химии, биологии, геологии и медицины. Он должен стать основой международного научного нейтронного центра. Россия сможет удовлетворить мировой спрос в нейтронных исследованиях к середине 2020-х гг., заявил глава «Росатома» Алексей Лихачев в ходе энергопуска.

Реактор ПИК - (Пучковый Исследовательский Корпусной (Комплекс)) - один из 6 проектов, включенных Правительством РФ в программу создания мегаустановок мирового класса на территории РФ. ПИК является одним из самых мощных в мире источников высокопоточных нейтронов, которые замедляются до необходимой энергии и выводятся по специальным каналам к экспериментальным установкам для проведения исследований. Нейтроны необходимы для проведения исследований в области физики фундаментальных взаимодействий, ядерной физики, физики конденсированного состояния, медицинской физики, биофизики и в др. областях.

Ожидаются эксперименты по измерению времени жизни нейтрона, нейтринные исследования, исследования по анализу элементного и изотопного составов вещества и др. Облучение нейтронами помогает выяснить внутреннюю структуру, состав и магнитные свойства вещества, что применяется в материаловедении, молекулярной биофизики, производстве изотопов, химии, фармацевтике. Нейтронное облучение является важнейшим методом лечения онкологических заболеваний. Ввод в эксплуатацию реактора ПИК приведет к новым открытиям и практическим результатам. Разработка новых материалов и технологий их получения требует наличия информации «состав-структура-свойства», что позволяет создавать материалы с заданными свойствами.

Переход к наноструктурам и нанотехнологиям ставит новые задачи. Требуется изучение структур на нескольких масштабах, при этом требуется учет динамики в ультраширокой временной области от атомной динамики- к динамике кластеров. Часть задач может быть решена путем проведения экспериментов по рассеянию нейтронов. Технические решения для конструкций, которым предстоит работать в условиях нейтронного облучения, найдут свое применение в ядерной энергетике, а также понадобятся на термоядерных электростанциях.

Параметры нейтронных пучков и экспериментальных возможностей реактора ПИК являются уникальными, аналогичные существуют лишь в Международном Институте Лауэ-Ланжевена в Гренобле, и нигде в мире не будут созданы в ближайшие 10-15 лет.

Реактор ПИК становится основой Международного центра нейтронных исследований мирового класса.

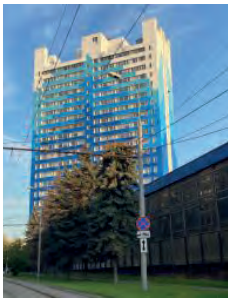
https://phnt.spbstu.ru/news/

●#1298

Специалисты ЦНИИТМАШ разработали новые составы основного металла и сварочных материалов для проекта ВВЭР-СКД

Специалистами ЦНИИТМАШ (входит в машиностроительный дивизион «Росатома» - АО «Атомэнергомаш») разработаны новые составы основного металла и сварочных материалов для проекта ВВЭР-СКД (ВВЭР-СКД – водо-водяной энергетический реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления). Одновременно для проекта ВВЭР-С произведено совершенствование существующих материалов на базе стали 15Х2НМФА. Впервые обеспечена возможность получения равнопрочности основного металла и сварного шва на корпусе ВВЭР. Образцы новых материалов поставлены на длительные испытания по радиационному облучению в исследовательском реакторе. Оцениваются параметры длительной прочности и ползучести, а также влияние термического охрупчивания на сдвиг температуры хрупко-вязкого перехода. Работы по проекту ведутся с 2019 г. в рамках Единого отраслевого тематического плана (ЕОТП).

«Данная работа рассчитана на три года, и в 2020 г. был успешно закрыт ее второй этап», - рассказал заведующий лабораторией крупного слитка Дмитрий Толстых. – Уровень достигнутых результатов значительно превосходит показатели не только имеющихся корпусных материалов, но и перспективных зарубежных корпусных сталей. Так, для материалов ВВЭР-СКД достигнута категория прочности КП65+ при температуре 400°С, а для ВВЭР-С – КП55 при 350°С. На следующем этапе будет оцениваться радиационная стойкость новых материалов, будут разработаны технологии производства заготовок корпуса реактора и методики оценки ресурса корпусов из новых материалов. После завершения работ по проекту планируется промышленное освоение производства изделий из новых материалов и их аттестация. Разрабатываемые материалы позволят обеспечить перспективные проекты реакторов будущих поколений высоконадежными и высокоресурсными корпусами.



●#1299

Совещание по вопросам подготовки инженерных кадров для судостроения состоялось в СПбГМТУ

29 января 2021 г. Секретарь Совета Безопасности РФ Николай Патрушев провел в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете (СПбГМТУ) совещание по вопросам подготовки инженерных кадров для судостроения.

В совещании приняли участие полномочный представитель Президента РФ в СЗФО Александр Гуцан, министр науки и высшего образования РФ Валерий Фальков, замминистра просвещения РФ Екатерина Толстикова, губернатор Санкт-Петербурга Александр Беглов, главнокомандующий ВМФ РФ Николай Евменов, руководители ведомств, представители ряда государственных корпораций, в т.ч., «Росатома», «Роскосмоса», нефтяных и газовых компаний, Объединенных судостроительной и двигателестроительной корпораций, ректоры крупных технических университетов, руководители судостроительных заводов и НИИ.

В рамках совещания обсуждены вопросы, связанные с повышением качества подготовки кадров для кораблестроительных и судостроительных предприятий России, а также для ВМФ. В частности, предложены дополнительные меры, направленные на повышение уровня образовательной и научной деятельности ведущего вуза в судостроительной отрасли - СПбГМТУ.

Внимание федеральных органов власти было обращено на объединение усилий ряда вузов страны и госкорпораций с целью разработки цифровых промышленных технологий для внедрения их на российских предприятиях.

«Корабелка участвует в создании цифрового научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии». Разработки ее ученых не имеют аналогов. Здесь создана одна из крупнейших в Европе лабораторий лазерных технологий обработки материалов», - сказал губернатор Санкт-Петербурга Александр Беглов, в ходе совещания. Он также отметил, что в 2020 г. лаборатория ИЛИСТ СПбГМТУ поставила промышленным предприятиям 5 установок собственной разработки.

Петербург – центр отечественного судостроения. В городе насчитывается более 40 судостроительных предприятий. На них трудятся 50 000 человек. В 2020 г. на петербургских верфях на воду спущено 11 кораблей и судов, еще 11 было заложено.

Почти четверть всей промышленной продукции Петербурга – это продукция судостроения. Отрасль в городе полностью обеспечена заказами. Петербургским судостроителям доверяют не только федеральное правительство и субъекты РФ, но и зарубежные компании.

Морская отрасль является для города приоритетной, поэтому развивается комплексно, когда промышленность, наука и образование тесно сотрудничают. Судостроение в Санкт-Петербурге отдельным блоком обозначено в Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга до 2035 г.

Пресс-служба СПбГМТУ,
www.knvsh.gov.spb.ru, www.cniitmash.com

#1300

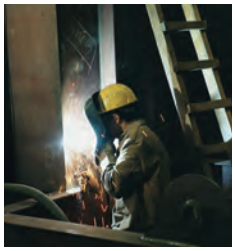
Компания ESAB повышает скорость ремонта судовых валов на 70 %

Установка для автоматической наплавки компании ESAB, одного из лидеров в области производства сварочных материалов и оборудования для сварки и резки, сократила время ремонта судовых валов на 70%. Судоверфь, работающая с гребными валами весом в 50 т и длиной в 25 м, обратилась в компанию ESAB, поскольку существующее на предприятии оборудование не обеспечивало должную стабильность процесса.

Используемые в судостроении стали особенно чувствительны к нагреванию и отличаются высокой ценой – они могут содержать марганец, хром, никель, молибден, ниобий и ванадий. Избыточное тепловложение может привести к деформации вала и ухудшению его механических свойств, что существенно уменьшит срок эксплуатации. По этим причинам к качеству сварки предъявляются особенно строгие требования.

Компания ESAB установила систему наплавки валов на базе источника сварочного тока LAF 1001. Наплавка осуществляется сварочной головкой для тяжелых условий эксплуатации A6, которая устанавливается на каретку с возможностью перемещения вдоль наплавляемой поверхности на длину 2,2 м. Аппарат оснащён системой подачи и рециркуляции флюса. Наплавка валов диаметром от 100 до 1 200 мм производится высоколегированной проволокой диаметром 3 мм. Вал вращается комплектом роликовых опор суммарной грузоподъёмностью 60 т. Другой комплект опор может вращать валы массой до 135 т.

Из-за сложностей, связанных с позиционированием 50-тонного вала, его перемещение к роликовому стенду для автоматической наплавки требует «астрономических» затрат. Альтернативой является ремонт с использованием ручного или полуавтоматического процесса, которые приводят к вариабельности наплавки - отклонениям от необходимой геометрии, что практически исключается при использовании технологии ESAB.



Система ESAB проста в эксплуатации – все параметры наплавки и перемещения запрограммированы в контроллере, поэтому от оператора требуется только расположить сварочную головку и запустить процесс.

Помимо ремонта гребных валов верфь регулярно занимается восстановлением листов толщиной до 80 мм. Обычно при сварке толстостенного металла процесс требует выборки корня шва, чтобы обеспечить 100% проплавление.

Для повышения производительности верфь приобрела 4 сварочных трактора ESAB A2N Multitrac с двумя сменными головками на каждый: головка для сварки под флюсом одной проволокой и специально модифицированная головка Arcair® N7500i для угольной строжки.

Трактор A2N Multitrac позволяет оператору сварить одну сторону пластины с помощью процесса дуговой сварки под флюсом, перевернуть лист, поменять головку на подходящую для строжки и выполнить строжку с обратной стороны. После ещё одной быстрой смены сварочной головки оператор завершает сварку соединения.

«Ни один оператор, работая вручную, не сможет сравниться с автоматической системой по части повторяемости толщины наплавки или контроля уровня тепловложения. По этой причине для восстановления судовых валов был адаптирован проверенный процесс, который давно зарекомендовал себя на сталелитейных заводах», – отмечает Дмитрий Куракса, управляющий директор ESAB в России и СНГ.

#1301

К вопросу оптимизации температурных полей при послойном формировании ответственных изделий из сплавов на основе титана

А.С. Миленин, д. т. н., **Е.А. Великоиваненко,** к. ф.-м. н., **Г.Ф. Розынка,**
С.С. Козлитина, Н.И. Пивторак, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (Киев)

Рассмотрены характерные технологические задачи оптимизации температурных полей в изделиях из титановых сплавов при их послойном формировании. В частности, разработан подход по снижению общего перегрева изделия путем обеспечения естественной диссипации избыточной тепловой энергии в окружающую среду. На примере отечественной технологии электронно-лучевого формирования xBeam 3D Metal Printer показан порядок использования предложенных подходов, обеспечивающих качественное формирование слоев при производстве балочных и цилиндрических конструкционных элементов из титанового сплава ВТ1.

В настоящее время наблюдается широкое распространение различных технологий пространственного послойного формирования, используемых для производства ответственных конструкционных элементов из металлов, полимеров, керамики. В частности, для получения тонкостенных или разнотолщинных металлических деталей, а также конструкций со сложной геометрией, применяются технологии многопроходной наплавки расплавленным металлом, что позволяет существенно сократить потери металла в стружку при использовании традиционных методов фрезерования. Такой подход также является альтернативой сварочных процессов, что позволяет в определенной мере снизить остаточные деформации в конструкции, вызванные естественными процессами усадки металла в области сварного шва.

Практическое внедрение подобных технологий для получения ответственных деталей и конструкционных элементов сопряжено с рядом объективных сложностей, таких как низкая производительность, дороговизна оборудования, энергоемкость. Кроме того, для получения продукции высокого качества для управляемого технологического цикла необходимо выбрать оптимальные параметры. Большинство технологий рассматриваемого класса отличается высокой управляемостью и широкими возможностями оптимизации, что позволяет решать различные производственные задачи. Так, при производстве тонкостенных металлических конструкций посредством послойного формирования одной из задач оптимизации является обеспечение благоприятного температурного поля в области наплавки слоев жидкого металла, а именно, конструкция должна быть достаточно прогретой для качественного сплавления слоев, но при этом не должно быть перегрева области формирования конструкции и избыточной текучести металла. Эта задача осложняется тем, что в процессе наплавки происходит постепенное накопление избыточного тепла, которое не успевает уйти в оснастку или окружающую среду (что особенно актуально для технологий наплавки в условиях вакуума, когда отсутствует конвективный сток тепла в атмосферу). Этого негативного эффекта можно избежать постепенным уменьшением вложения тепла, т.е. изменением погонной энергии источника (его мощности или скорости перемещения). Но такая технологическая процедура неизбежно связана со сложностями обеспечения квазистационарности процесса производства и адекватных условий расплавления присадочного материала. Для решения этой задачи в рамках данной работы предложен новый метод оптимизации температурного состояния балочных и цилиндрических тонкостенных конструкций в процессе их послойного формирования на примере отечественной технологии xBeam 3D Metal Printer (ЧАО «НВО «Червона Хвиля»).

Основная идея разработанного подхода заключается в том, что наплавка формирующего слоя в процессе производства происходит при идентичных условиях тепловложения, которое обеспечивает эффективное расплавление присадочного материала и достаточный сопутствующий нагрев наплавляемой поверхности. Избыточное тепло при этом отводится посредством естественной диссипации при временной задержке Δt между наплавкой каждого последующего слоя, что позволяет реализовать простой подход к стабилизации температурного поля. Такой алгоритм применим в случае, например, наплавки стенки на массивную подложку, что является достаточно распространенным конструкционным образцом при разработке конкретной технологии производства. Для определения

оптимального периода задержки между наплавкой каждого из формирующих слоев использовались методы математического моделирования кинетики температурного поля $T(x,y,z)$ в изделии с учетом технологических особенностей конкретной производственной линии. Так, для численного анализа кинетики температурного поля от времени t конечно-разностным методом решалось трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\left[\lambda(T)\nabla T\right], \qquad (1)$$

где $c\gamma$, λ – удельная теплоемкость и теплопроводность материала, соответственно, как функции от текущей температуры.

Граничные условия, необходимые для решения задачи (1), зависят от природы стока тепла с поверхности изделия. Так, в области контакта с технологической оснасткой сток тепла может быть описан законом Ньютона, тогда как свободная поверхность характеризуется дополнительным вложением энергии с наплавляемого торца изделия в случае расположения там источника нагрева. Таким образом, граничные условия для решения задачи теплопроводности в рассматриваемом случае имеют следующее математическое выражение:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}=\begin{cases}\alpha_T\left(T-T_C\right), \text{ в области контакта с оснасткой}\\ \varepsilon\sigma_{SF}\left(T^4-T_C^4\right)+\alpha_T\left(T-T_C\right)-q, \text{ на свободных поверхностях}\end{cases}, \qquad (2)$$

где n – нормаль к поверхности; α_T – коэффициент теплоотдачи; T_C – температура окружающей среды; ε – степень черноты материала; σ_{SF} – константа Стефана-Больцмана; q – тепловой поток от источника нагрева.

Более подробно математические модели и порядок численных исследований изложены в работах [1, 2].

Данный подход был апробирован на примере технологии xBeam 3D Metal Printer [3], в рамках которой реализован принцип электронно-лучевого расплавления присадочной проволоки через специальный механизм подачи (*рис. 1*). Это позволяет минимально перегревать присадочный металл и производить тонкостенные конструкции с необходимостью незначительной финишной обработки. Применительно к наплавке лабораторного образца в виде балки таврового профиля (*рис. 2, а*) из титанового сплава ВТ1 параметры источника нагрева приведены в *табл. 1*, размеры изделия следующие: L = 70 мм, W = 30 мм, δ_1 = 8 мм, δ_2 = 3,2 мм, высота наплавленного слоя 0,8 мм (*рис. 2, б*). Как показали результаты численных исследований, для обеспечения одинаковых температурных циклов на разных этапах наплавки (порядкового номера наплавочного слоя), период задержки Δt должен отвечать

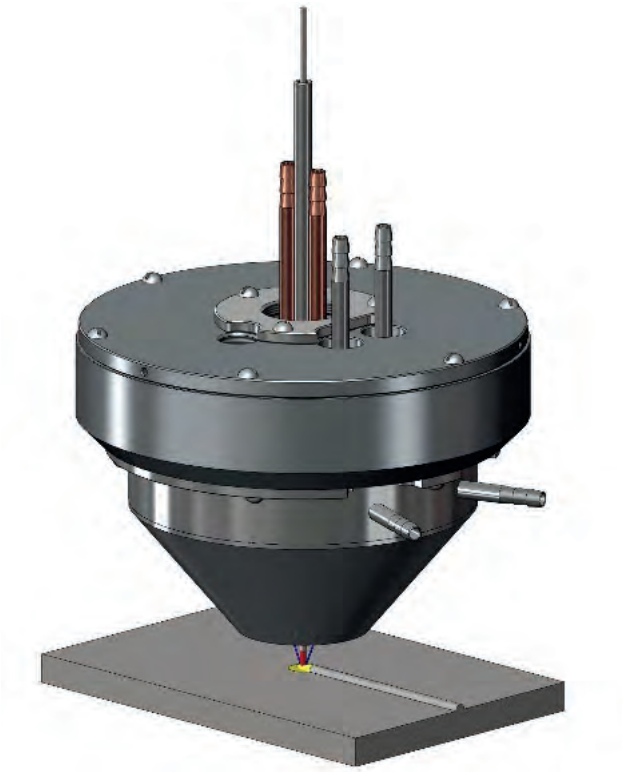
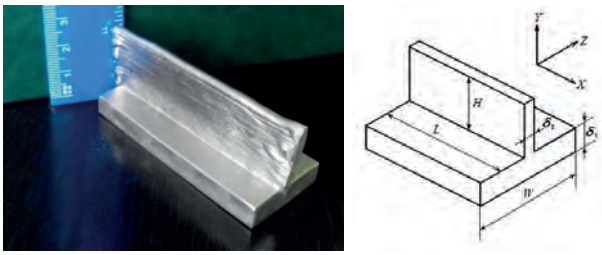


Рис. 1. Схема объединенного узла нагрева и подачи присадочного материала, используемого в xBeam 3D Metal Printer



(а) (б)

Рис. 2. Внешний вид (а) и схема (б) балочного образца таврового профиля, полученного методом послойного формирования

расчетной зависимости, приведенной на *рис. 3*.

Предложенный подход является достаточно универсальным для решения более сложных технологических задач. В частности, определенный практический интерес представляет получение метода-

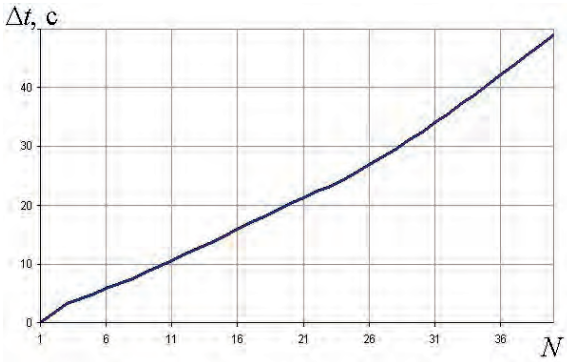


Рис. 3. Зависимость временных интервалов Δt между наплавкой слоев разнородной Ti-Al балочной конструкции от порядкового номера слоя N

ми послойного формирования разнородных по высоте конструкций как альтернатива сварке. Известно, что получение разнородных соединений сваркой плавлением ограничено для большого количества пар металлов по причине их незначительной взаимной растворимости, склонности к образованию интерметаллидных включений и соответствующего снижения эксплуатационных качеств конструкции [4]. В частности, к таким парам металлов относятся титан и алюминий, разнородные конструкции из которых получили распространение в авиастроении. Существенная разница в температурах плавления титана (1668 °С) и алюминия (660 °С) позволяет реализовать для их неразъемного соединения метод сваркопайки. Суть этого метода заключается в том, что под действием источника нагрева металл с более высокой температурой плавления остается твердым, а металл с более низкой температурой плавления определенное время находится в жидком состоянии, образуя сварнопаяный контакт. Это позволяет снизить максимальные температуры нагрева поверхности контакта жидкого и твердого металлов, уменьшив тем самым риск образования интерметаллидных включений. Требования оптимизации температурного поля в разнородном контакте формально описываются температурно-временными зависимостями латентного периода интерметаллидообразования.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод о том, что при соответствующей оптимизации температурного поля в процессе послойного формирования разнородной конструкции, возможно достичь таких условий, при которых гарантируется высокое качество не только однородных по высоте частей, но и разнородного перехода. В качестве примера был рассмотрен аналогичный балочный образец таврового профиля, но для случая, когда половина по высоте стенки тавра изготавливается из титанового сплава ВТ1, другая половина – из алюминия. При этом, для обеспечения сплавления последнего слоя титана с первым слоем алюминия без образования интерметаллидных включений необходимо гарантировать, что время контакта твердого титана и жидкого алюминия не будет превышать величины латентного периода интерметаллидообразования, характерного для данной температуры (*рис. 4*) [5]. Как показали результаты расчетов, оптимизация периода задержки между наплавкой слоев Δt позволяет получить благоприятную кинетику температурного поля как при формировании однородных частей изделия, так и при получении разнородного контакта (*рис. 5*).

Изложенный подход применим для конструкций, формирование которых происходит посредством наложения определенного числа отдельных слоев. Но для деталей цилиндрической или сферической формы (*рис. 5*) такой технологический прием не является рациональным, т. к. связан с необходимостью прерывать витки наплавки в области остановки процесса на время задержки. Это приведет к локальной неоднородности конструкции и повышенной склонности к формированию дефектности. В этом случае в качестве альтернативы может быть использован метод, предполагающий одновременное пропорциональное изменение мощности источника нагрева и скорости его перемещения вдоль наплавляемой детали (и соответствующее изменение скорости подачи присадочной проволоки) с сохранением постоянной погонной энергии. Это позволит сохранить температурные условия формирования каждого валика, но при этом скорость прохождения каждого из витков при наплавке может быть различной, что может характеризовать искомое время задержки, необходимое для естественной диссипации избыточной тепловой энергии.

В качестве примера реализации такого подхода были проведены расчеты кинетики температурного поля при послойном формировании изделий цилиндрической формы (диаметр D = 300 мм, размер поперечного сечения валика 2,5 × 1,0 мм, погонная энергия Q_n = 2000 Дж/см) согласно технологиче-

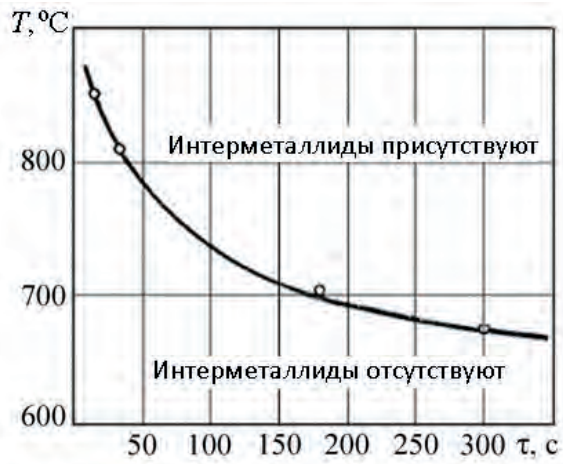


Рис. 4. Температурная зависимость времени латентного периода формирования интерметаллидов при поверхностном контакте титана и алюминия [5]

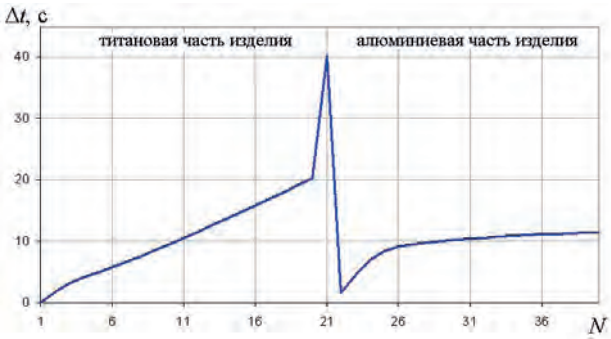
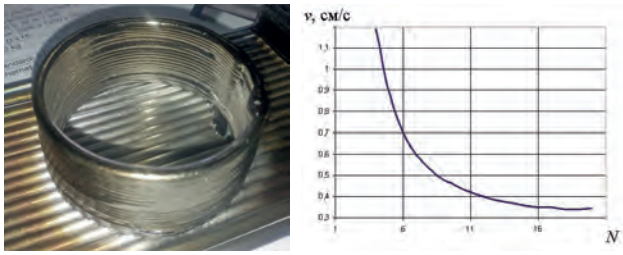


Рис. 5. Зависимость временных интервалов Δt между наплавкой слоев разнородной Ti-Al балочной конструкции, позволяющих получить качественное сплавление слоев, от порядкового номера слоя N



(а) (б)

Рис. 6. Внешний вид цилиндрического изделия, полученного методом послойного формирования (а) и оптимизированная зависимость скорости наплавки *v* от порядкового номера витка формирующего валика *N* (*D* = 300 мм, размер валика 2,5×1,0 мм, погонная энергия $Q_п$ = 2000 Дж/см) (б)

Таблица 1. Технологические параметры процесса многослойного формирования лабораторного образца из титанового сплава

Параметр	Значения
Ускоряющее напряжение	15 кВ
Ток электронного луча	300 мА
Мощность электронного луча	4,5 кВт
Скорость подачи расходного материала	14 мм/с
Скорость перемещения подложки по оси X	14 мм/с

ским параметрам, приведенным в *табл. 1* (*рис. 6, а*). Оптимизированные зависимости скорости наплавки от порядкового номера витка формирующего валика показаны на *рис. 6, б*. Как видно из приведенных результатов, обеспечение стационарных температурных условий формирования изделий рассматриваемой формы требует сложного контролируемого изменения условий тепловложения.

Исходя из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрена характерная задача обеспечения благоприятного температурного состояния тонкостенных изделий из сплавов на основе титана в процессе их послойного формирования. Предложен подход по снижению общего перегрева изделия путем обеспечения естественной диссипации избыточной тепловой энергии в окружающую среду при периодической остановке процесса наплавки жидкого металла, разработаны соответствующие критерии оптимизации данного технологического параметра.

2. На примере послойного формирования балочных конструкций таврового профиля из титанового сплава ВТ1 с помощью технологии xBeam 3D Metal Printer исследовано влияние характера теплового воздействия и расчетного времени задержки перед наплавкой каждого из формирующих слоев на стационарность температурного поля. Показано, что при оптимизации времени задержки возможно компенсировать избыточное накопление тепла в изделии и достичь благоприятных температурных условий формирования изделия.

3. Показана применимость данного технологического приема для получения методом послойного формирования разнородных изделий. На примере балочной конструкции, состоящей из титановой и алюминиевой частей, показано, что варьирование времени задержки перед наплавкой каждого слоя позволяет не только достичь требуемых условий формирования однородных частей изделия, но и реализовать механизм сваркопайки в разнородном переходе, избежав, таким образом, формирования вредных интерметаллидных включений.

4. Для случая цилиндрических конструкционных элементов, для которых нерационально производить остановку процесса наплавки формирующего валика, предложен подход, заключающийся в варьировании скорости и мощности нагрева при неизменной погонной мощности источника. Показано, что таким образом можно изменять время прохождения каждого витка наплавки и достигать достаточной степени диссипации избыточной тепловой энергии в окружающую среду.

Литература

1. Milenin O.S., Velikoivanenko O.A., Kozlitina S.S., Kandala S.M., Babenko A.E. Numerical prediction of the state of beam products of different thickness during layer-by-layer electron beam surfacing. // The Paton Welding Journal. – 2020. - Vol. 1. – P. 14–23.

2. Makhnenko O.V., Milenin A.S., Velikoivanenko E.A., Pivtorak N.I., Kovalchuk D.V. Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. // The Paton Welding Journal. – 2017. – Vol.3. – P. 7–14.

3. Ковальчук Д.В., Мельник В.И., Мельник И.В. Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing. / Сб. трудов 8-й международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»/. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 2017. – 51 с.

4. Darwish S.M. Analysis of weld-bonded dissimilar materials. // International Journal of Adhesion & Adhesives. – 2004. – Vol. 24. – P. 347-354.

5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. / Под ред. В.Н. Замкова / – Киев: «Наукова Думка», 1986. – 240 с.

#1302

Зарубежный опыт технологий получения алюминиевых сплавов и процессов сварки для промышленного изготовления конструкций

Т.М. Лабур, д. т. н., **О.К. Маковецкая,** к. э. н., ИЭС им. Е.О. Патона (Киев)

Алюминий и его сплавы сегодня заполнили мировой рынок товаров, которые используются во многих областях машиностроения, а также гражданского и промышленного строительства. Традиционно используют конструкционные материалы на алюминиевой основе в летательных аппаратах, а, именно, в военных, пассажирских и транспортных самолетах, а также в изделиях ракетно-космической техники. Особенный статус алюминиевые сплавы имеют в конструкциях наземных транспортных средств (автомобилестроении, вагоностроении), в речном и морском судостроении.

Среди конструкционных металлов алюминий является наиболее широко распространенным легким металлом, который благодаря уникальному комплексу физико-химических, механических и технологических свойств является одним из важнейших конструкционных материалов в современном промышленном производстве [1]. Металл, как и сплавы на его основе, характеризуется низким удельным весом, высокой коррозионной и термической стойкостью, легкостью формования и обработки, огнестойкостью, высокой электропроводимостью, а также способностью к практически стопроцентной вторичной переработке без потери качества.

По объемам производства и потребления алюминий занимает второе место в мире после стали и первое - среди цветных металлов. Согласно данным, приведенным на *рис. 1*, первичный алюминий в период 2000-2018 гг. имел самый высокий индекс роста мирового потребления среди основных конструкционных материалов [2].

Известно, что производство алюминия, особенно первичного, весьма энергоемкий технологический процесс. Он отличается высокой стоимостью по сравнению с производством других конструкционных материалов и относится к экологически вредным вследствие значительных выбросов углекислого газа в атмосферу. Эти факторы существенно сдерживают рост объема его производства. Тем не менее в последние годы на мировом рынке отмечается превышение уровня спроса над количеством поставок алюминия. В связи с этим сегодня состояние рынка алюминия в мире характеризуется как умеренно-дефицитное.

При сравнительной оценке стоимости изделий, изготовленных из алюминия и других конкурирующих с ним, конструкционных материалов, например, стали, пластмасс, следует принимать во внимание такое ключевое для маркетинга понятие, как цена потребления, которая учитывает расходы, связанные с эксплуатацией изделия в период его жизненного цикла (расходы на обслуживание, топливо, стоимость утилизации и др.). Поэтому главным экономическим преимуществом алюминия, как раз, и является снижение эксплуатационных расходов. Например, в автомобилестроении себестоимость автомобиля, изготовленного с применением алюминия и его сплавов, выше, чем из черных металлов, однако использование алюминия значительно увеличивает срок службы автомобилей, снижает удельный расход потребляемого топлива и облегчает его утилизацию [3].

За последнее десятилетие производство первичного алюминия в мире выросло на 50 %. Согласно

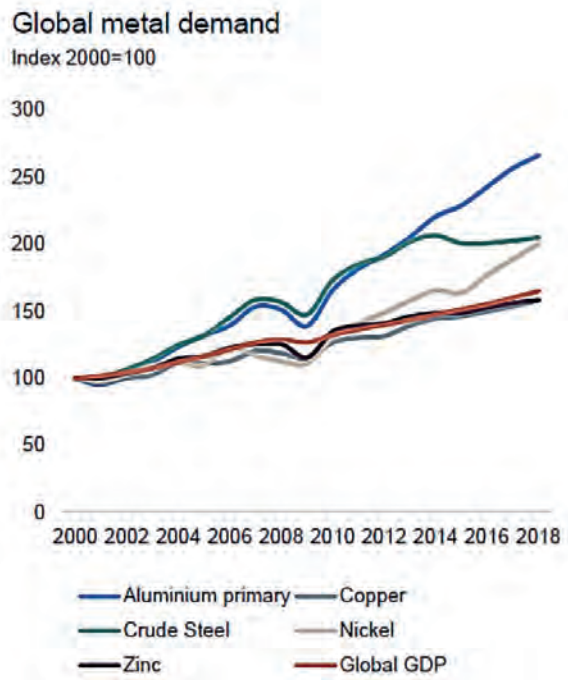


Рис. 1. Индекс мирового потребления основных конструкционных материалов, 2000-2018 гг.

данным [4] мировой рынок алюминия в 2018 г. оценивался в 163,5 млрд. дол. США. Прогнозируется, что в 2025 г. объем рынка алюминия в стоимостном выражении достигнет значений 235,8 млрд. дол. США при его ежегодном росте на 6,5% [5]. В 2019 г. в мире было произведено около 66 млн.т первичного алюминия, а объем его потребления превысил 63 млн.т. По прогнозу U.S. Geological Survey мировое предложение на рынке первичного алюминия в период 2021-2025 гг. может составить 87 млн.т., а в 2026-2030 гг. - 112 млн.т., т.е. увеличиться до 2030 г. в 1,3 раза. При этом ожидается, что мировой спрос на алюминий и сплавов на его основе до 2030 г. возрастет в 3,3 раза и превысит 6% в год [6].

Следует отметить, что в последнее десятилетие в мире, особенно в промышленно развитых странах, значительно увеличился объем производства вторичного алюминия. Переработка алюминиевого лома становится все более важным аспектом для интенсивного развития алюминиевой промышленности. По сравнению с производством первичного алюминия, производство алюминия из лома позволяет сэкономить 95% электрической энергии, а в связи с этим, снизить на 95% выбросы парниковых газов, а также соблюдать при этом установленные экологические нормы без потери качества производимого продукта.

В настоящее время более трети объема всего алюминия в мире производится из лома. В 1990 г. общее производство алюминиевых полуфабрикатов составляло около 28 млн. т, включая более 8 млн.т. алюминия, произведенного из переработанного лома. В 2020 г. спрос на металл увеличился до 97 млн.т. Производство вторичного алюминия при этом составило около 32 млн.т. В структуре алюминиевого лома в настоящее время около 50% составляет старый лом, т.е. лом от использованных продуктов с истекшим сроком эксплуатации.

На *рис. 2* приведены данные мирового потребления алюминия (включая первичный алюминий и алюминиевый лом) за период с 2000 г. а также прогноз его увеличения до 2030 г. [7].

Несмотря на недостаточно высокий уровень механической прочности алюминия, различные сплавы на его основе широко применяются в качестве конструкционного металла в промышленном производстве. Используя технологии прокатки, литья, формования (экструзию) изготавливается широкая номенклатура полуфабрикатов из алюминия и его сплавов различных систем легирования, из которых при дальнейшей переработке производят готовую продукцию конструкций различного назначения.

Основными группами товарной продукции из алюминия и его сплавов является плоский прокат (листы, плиты, панели), прессованный профиль и фасонное литье, на их долю приходится практически 90% всего мирового объема производства алюминиевой металлопродукции. На *рис. 3* приведены данные структуры мирового производства основных групп алюминиевой продукции в 2018 г. [8].

С применением современной технологии прокатки изготовляют листовой прокат различной толщины, а также фольгу. В Северной Америке и Западной Европе упаковочная промышленность потребляет большую часть листа и фольги для изготовления банок для напитков, а также контейнеров для фольги и упаковки различного назначения. Кроме того, листовой прокат широко используется в строительстве для кровли и сайдинга. В транспортном машиностроении его применяют для изготовления дорожных и железнодорожных средств передвижения, в морском транспорте, в конструкциях морского базирования алюминий и его сплавы используют в морских платформах, надстройках и корпусах лодок. Толстый алюминиевый прокат (пластины) применяют в конструкциях планеров, военных транспортных средств и мостов, над-

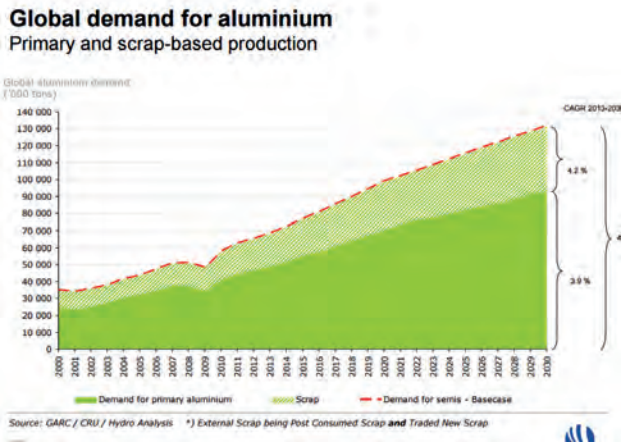


Рис. 2. Объем мирового потребления алюминия (первичный алюминий и алюминиевый лом), 2000-2020 г., прогноз до 2030 г.

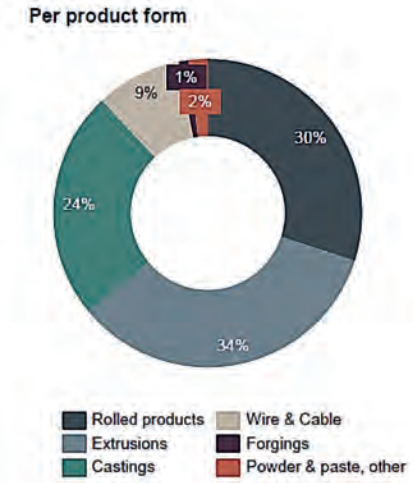


Рис. 3. Структура мирового производства основных групп алюминиевой продукции, 2018 г.

строек кораблей, а также в судах для транспортировки криогенных и химических продуктов и др.

На *рис. 4* приведены данные структуры мирового потребления алюминиевого проката и фольги в основных отраслях промышленного производства конструкций в 2018 г. [9].

Следует отметить, что алюминиевое литье является мощной, универсальной технологией, применяемой для производства полуфабрикатов или готовых изделий сложной формы. Это одна из старейших и наиболее простых технологий, применяемых при изготовлении фасонных компонентов различных конструкций. Среди процессов литья алюминия и его сплавов различают литье слитка и литье под давлением. При литье слитка первичный алюминий отливается в прокатный слиток (сляб), экструзионный слиток (заготовка) и слиток для проволочной заготовки, из которых впоследствии производятся полуфабрикаты и готовые изделия. Технология литья под давлением в основном используется на литейных заводах для производства литых деталей и узлов изделий широкого спектра.

Термин формование - «экструзия» в алюминиевом производстве обычно применяется как к процессу, так и к готовому продукту, когда горячая цилиндрическая заготовка из алюминия проталкивается через фасонную матрицу. Полученный таким образом алюминиевый профиль используется в строительных и др. конструкциях, транспортных средствах или их отдельных компонентах. Большая часть изделий, изготавливаемых с применением технологии экструзии, потребляется строительной промышленностью. Доля применения в Европе алюминиевого профиля составляют более 50% всего рынка алюминиевых изделий. Объемы потребления алюминиевых сплавов в «экструзионном» секторе в течение последних лет ежегодно возрастает в среднем на 5% и составил в 2018 г. примерно 19,1 млн.т. Прогнозируется,

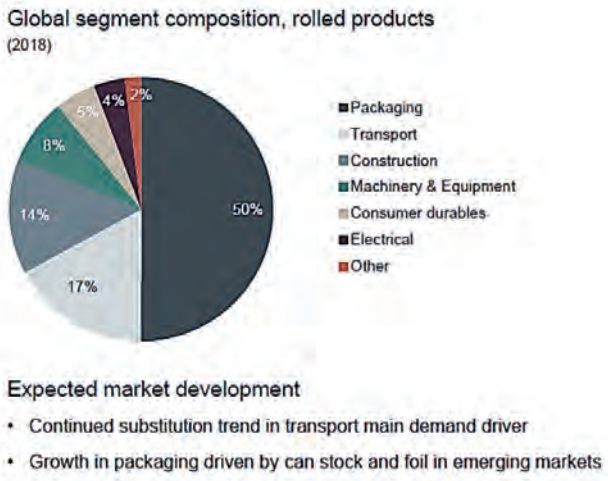


Рис. 4. Структура мирового потребления алюминиевого проката и фольги в основных отраслях промышленного производства конструкций, 2018 г.

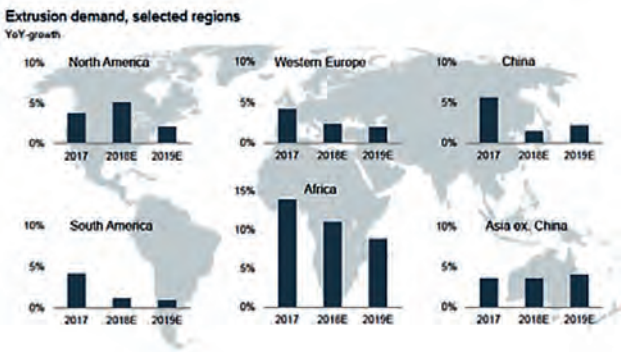


Рис. 5. Динамика роста потребления прессованного профиля в регионах мира, 2018 г.

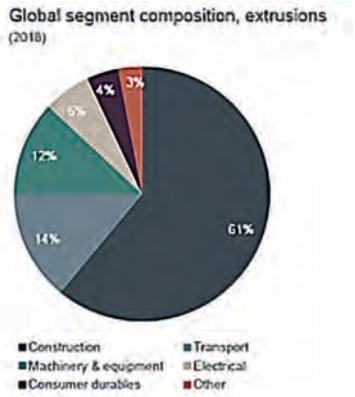


Рис. 6. Структура мирового потребления прессованного профиля в основных отраслях промышленного производства, 2018 г.

что в 2024 г. мировой рынок алюминиевого профиля достигнет 24,3 млн.т.

На *рис. 5* приведены данные динамики роста потребления прессованного профиля в регионах мира в 2018 г. [10].

На *рис. 6* приведены данные структуры мирового потребления прессованного профиля в основных отраслях промышленного производства в 2018 г. [11]. Основными потребителями в отраслевой структуре потребления алюминиевой продукции являются транспортное машиностроение и строительство. На

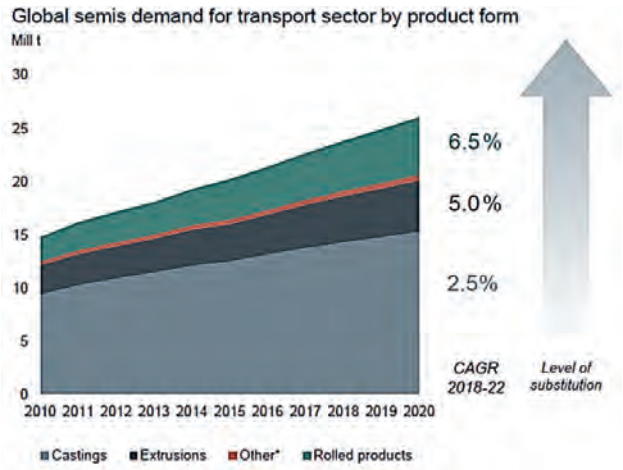


Рис. 7. Мировое потребление алюминиевой продукции в секторе автомобилестроения

их долю приходится более половины всего объема применения алюминия и его сплавов в мире.

Наибольшим и наиболее интенсивно развивающимся сегментом отраслевого рынка потребления алюминиевой продукции является автомобилестроение. В 2020 г. на долю автомобилестроения приходилось более четверти всего мирового использования алюминиевых полуфабрикатов и литья [12].

В настоящее время изделия из алюминия и его сплавов заполнили рынок товаров. Они широко используются во многих отраслях машиностроения, а также гражданского и промышленного строительства (*табл. 1*). Традиционно используются кон-

Таблица 1. Сферы применения наиболее распространенных конструкционных алюминиевых сплавов, изготавливаемых зарубежными компаниями

Марка сплава	Состав легирующих элементов, %							Типичные примеры применения
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	
2014	4,4	0,8	0,8	0,5	-	-	-	Конструкции, конструкционная и гидравлическая арматура, оборудование и поковки для тяжелых условий работы, для применения в самолето- или автомобилестроении
2017	4,0	0,5	0,7	0,6	-	-	-	То же, что и сплав 2014, детали винтовых механизмов
2024	4,4	-	0,6	1,5	-	-	-	Конструкции, листовые конструкции для самолётов, колеса грузовиков, часто плакированные для обеспечения прочности с хорошей коррозионной стойкостью
2036	2,6	-	0,25	0,45	-	-	-	Листы для кузовов автомобилей
2090	2,7	-	-	-	-	-	-	Конструкции, высокопрочные и стойкие к повреждениям, конструкции для аэрокосмической промышленности
2218	4,0	-	-	1,5	-	2,0	-	Сплавы для поковок, головки двигателей цилиндров, детали, которые должны иметь высокую прочность и твердость при повышенных температурах
2219	6,3	-	0,3	-	-	-	-	Конструкции, баки для авиакосмических применений; жаростойкость, хорошая свариваемость
2519	5,8	-	0,3	0,17	0,06	-	-	Конструкции, высокопрочная броня
2618	2,3	0,18	-	1,6	-	1,0	-	То же, что и сплав 2218
6005	-	0,8	0,5	0,5	0,25	-	-	Конструкции и архитектура
6009	0,4	0,8	0,5	0,6	0,25	-	0,1	Листы для кузовов автомобилей
6010	0,4	1,0	0,5	0,8	-	-	0,1	Листы для кузовов автомобилей
6013	0,9	0,25	0,35	0,95	-	-	-	Общее применение в конструкциях, повышенная прочность по сравнению с 6061
6061	0,25	0,6	-	1,0	-	-	0,2	Конструкции, архитектура, автомобильная, железнодорожная промышленности и торговый флот, трубы и трубные фитинги; хорошая формуемость, свариваемость, коррозионная стойкость, прочность
6063	-	0,4	-	0,7	-	-	-	Трубы, ограждения, архитектура
6070	-	1,4	-	0,8	-	-	-	Конструкции, трубы малого диаметра
6101	0,5	-	-	0,6	-	-	-	Электрические проводники
6262	0,28	-	-	1,0	-	-	0.09	Детали винтовых механизмов
6351	-	1,0	0,6	0,6	-	-	-	То же, что и сплав 6061
6951	-	0,35	-	0,6	-	-	-	Основной сплав для высокотемпературной пайки листов
7004	-	-	-	1,5	4,2	-	-	Прицепы грузовиков, штампованные детали железнодорожных вагонов
7005	-	-	0,45	1,4	4,5	-	0,13	Прицепы грузовиков, штампованные детали железнодорожных вагонов
7039	-	-	0,3	2,8	4,0	-	0,2	Бронированные листы, военные мосты
7075	1,6	-	-	2,5	5,6	-	23	Высокопрочные самолеты и др. применения, плакировка дает хорошую коррозионную (эрозионную) стойкость
7079	0,6	-	-	3,3	4,3	-	0,2	Самый прочный алюминиевый сплав, в котором толщины сечения превышает 76,2 мм, большие и массивные детали для самолетостроения и сопутствующего строительства
7178	2,0	-	- 2,8		6,8	-	0,23	Самолетостроение, прочность немного выше, чем у 7075

Таблица 2. Характеристики, определяющие работоспособность сварной конструкции

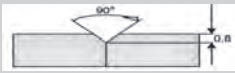
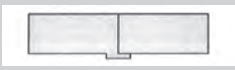
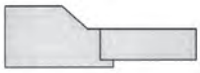
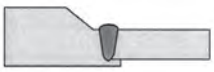
Эксплуатационные свойства	Испытания	Исследуемая характеристика
Деформируемость в холодном состоянии	Растяжение	Относительное (разрушающее) удлинение, равномерное удлинение
Свариваемость	Технологичесие пробы («рыбий скелет», крестообразные образцы)	Склонность к образованию горячих трещин. Вид поверхности излома
Сопротивление расслоению	Растяжение в направлении толщины	Поперечное сужение
Разрушение (хрупкое или вязкое)	Ударный изгиб с надрезом	Работа деформации
	Изгиб сварного шва	Вид поверхности излома. Угол загиба
	Растяжение или изгиб с надрезом	Температура страгивания трещины
	Испытания по механике разрушения	$K_{1C}(K_C)$, $\delta_{1C}(\delta_C)$, J-интеграл

струкционные материалы на алюминиевой основе в летательных аппаратах (*табл. 1*). Областью их применения является также пассажирские и транспортные самолеты, а также в изделиях ракетно-космической техники (до 80% по массе). Особый статус алюминиевые сплавы имеют в конструкциях транспортных средств: автомобилестроении, вагоностроении, судостроении. При этом независимо от сферы применения сварных конструкций используются единые характеристики, которые определяют их работоспособность (*табл. 2*).

В авиастроении эффективность применения алюминиевых сплавов общеизвестна. Сравнительно дешёвые, отлично обрабатываемые, прочные алюминиевые сплавы хорошо зарекомендовали себя в авиации – любимом детище XX века. Они остаются основными авиационными конструкционными материалами на современном этапе и в ближайшей перспективе, поскольку создание перспективных летательных аппаратов аэрокосмической техники неразрывно связано с решением трех основных проблем машиностроения: уменьшение веса, снижение стоимости и повышение эксплуатационных характеристик. Снижение веса позволяет уменьшить материалоемкость конструкции аппарата, способствует увеличению полезной нагрузки и улучшению летно-тактических характеристик при сокращении материальных затрат на производство и эксплуатацию. Это, в свою очередь, привело к поиску альтернативных основным аэрокосмическим материалам на алюминиевой основе - Д16, Д19, В95 и В96, 1201, традиционно использующихся в конструкции планера самолетов гражданского флота. Подсчитано, что снижение массы гражданского самолета на 1 кг позволяет сэкономить 125-165 л топлива в год, а за весь срок его эксплуатации экономия потребления составляет 3-4,8 млн. дол. [12]. Широкие возможности в этом направлении открыл новый класс высокопрочных алюминиевых сплавов, содержащих литий (*табл. 3*).

Современные самолёты эксплуатируются пре-

Таблица 3. Параметры надёжности сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов 1421 и 1460 в зависимости от конструктивного оформления швов

Заготовки	Рекомендуемые виды стыков	Параметры надёжности сварных соединений						
		$\sigma_{вн}$	$\sigma_р$	K_C, МПа√м	δ_C, мм	J_C	УРРТ	KCV
		МПа				Дж/см²		
		285 255	300 278	23-29 23-27	0,04 0,05	3-4 5-6	2-3 3-5	3-5 4-7
		295 270	315 298	25-30 24-28	0,07 0,09	4-6 6-8	3-5 5-7	4-6 5-8
		310 295	330 303	27-32 25-29	0,05 0,08	5-6 6-7	3-4 5-8	4-5 5-7
		315 300	340 312	27-31 25-28	0,06 0,07	4-7 6-8	3-5 5-6	3-5 5-7
		308 295	330 298	27-31 25-28	0,06 0,07	4-8 6-8	3-5 5-6	3-5 5-7

Примечание: в числителе представлены значения прочности и показателей вязкости разрушения сварных соединений сплава 1421, а в знаменателе - 1460

Таблица 4. Основные требования самолетостроения и ракетостроения

Требования	Характеристики материала
Нагрузка	Прочность
Вибрация	Усталость, фреттинг, истирание
Температура	Ползучесть, длительная прочность, окисление, коррозия, тепловое расширение, теплопроводность
Окружающая среда	Общая коррозия, коррозия под напряжением, давление пара
Масса	Плотность
Жесткость	Модуль упругости, пластичность
Безопасность	Удлинение, вязкость, однородность свойств, надежность
Экономичность	Стоимость материалов, производства, технического обслуживания; сроки эксплуатации

имущественно в условиях интенсивных и экстремальных нагрузок, поэтому основные требования, предъявляемые к их материалам, включают полный спектр аэродинамических условий, воздействие окружающей среды, безопасность полёта и стоимость (*табл. 4*). При полёте используются несущие поверхности конструкции для создания с помощью воздушной среды подъёмной и управляющих сил и силовая установка - для создания движущих сил за счёт энергии находящегося на борту самолёта топлива.

Правильный выбор материала элементов конструкции может существенно улучшить весовые и лётно-тактические характеристики летательного аппарата. Особое внимание уделяется удовлетворению требованиям обеспечения необходимой прочности и жёсткости конструкции при минимальной массе, обеспечению массовой эффективности материала, которая определяется соотношением удельной прочности $\sigma_{ДОП}/\rho$ к стоимости 1 кг материала. Величина $\sigma_{ДОП}/\rho$ представляет собой отношение допустимых напряжений к плотности, а отношение модуля упругости материала к его плотности (E/ρ) составляет удельную жесткость. В условиях растяжения $\sigma_{ДОП}/\rho$ равно $\sigma_В/\rho$, при общей потере устойчивости в условиях сжатия - E/ρ, при сдвиге - $\tau_В/\rho$, в условиях потери устойчивости при сдвиге - $\sqrt{E}/\rho$, при изгибе и кручении - $\sigma_В^{2/3}/\rho$ и $\tau_В^{2/3}/\rho$, соответственно. При наличии повторных нагрузок критерием выступает величина σ_{MAX}/ρ, где значения $\sigma_{ДОП}$ при заданном усталостном ресурсе конструкции принимаются равными σ_{MAX}.

Существенную роль в повышении массовой эффективности сварной конструкции играют совершенство полуфабрикатов и вид соединений конструктивных элементов, что часто определяется не только конструктивными задачами, но и технологическими возможностями материала. Проектировщики конструкций предъявляют к материалу помимо свариваемости требования обеспечения его сварных соединений высокой удельной прочности и пластичности при наличии наибольшей вязкости разрушения, что позволяет продолжать выполнять задачу полёта при наличии повреждений (*табл. 3, 4*). Учитывая возрастающую скорость самолётов и повышение при этом температуры внешних панелей, алюминиевые сплавы должны обладать также высокой термостойкостью и стойкостью к термоциклированию в условиях эксплуатации. Создание ориентационных космических экспрессов, многоразовых аппаратов, космопланов связано с потребностью в материалах, имеющих, наряду с хорошей свариваемостью и тепловой устойчивостью, высокие свойства при сверхнизких температурах.

Герметичные отсеки летательных аппаратов представляют собой штампосварные конструкции, которые состоят из листовой оболочки толщиной 1,5-3 мм с приваренными встык шпангоутами и фланцами, полученными механической обработкой объёмных штамповок с заданным направлением волокна. Детали из поковок применяются в исключительных случаях. Это связано с тем, что на полках шпангоутов, которые привариваются к оболочке, и на фланцах толщина металла составляет всего 2-3 мм. При неблагоприятном расположении волокна эта зона может быть не герметичной, что может в сложных условиях эксплуатации привести к преждевременному разрушению всей конструкции. Для этих конструкций используют сплавы: В96 (7075), предназначенный для деталей, которые должны обладать высокой статической прочностью, Д16-Т (2024) – для деталей, которые должны иметь высокую усталостную прочность, а также сплавы специального назначения 7175, 7050, 7150, 7475, 2124, 2224, 2324, т.е. почти все имеющиеся конструкционные сплавы алюминия.

Для обшивочных материалов подобные требования представлены на *рис. 8*. Он наглядно иллюстри-

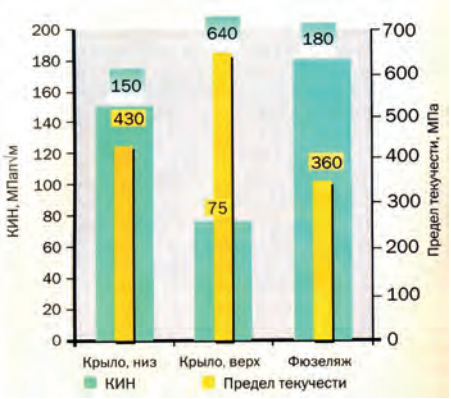


Рис. 8. Требования к прочности и вязкости разрушения (K_{1C}, K_C) для основных обшивочных материалов

Таблица 5. Сравнительные свойства алюминиевых сплавов и их сварных соединений для криогенных баков ракет [3, 36]

Сплав, состояние	Температура испытания, К	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCV, Дж/см^2
АМг6 (нагартовка 20%)	293	420/296	252	15,0	22/16
	77	520/400	292	34,5	20/16
	20	590/420	325	14,0	15/10
1201 (термическое упрочнение)	293	420/280	325	9,5	12/17,5
	77	420/355	325	12,0	12/14,5
	20	610/405	440	15,0	14/14,8
1460 (термическое упрочнение)	293	530/290	495	10,0	11/10
	77	615/355	325	17,5	13/7
	20	760/385	560	13,5	15/6

Примечание: в числителе приведены значения временного сопротивления разрыву ($\sigma_в$) и ударная вязкость (KCV) для основного металла, а для сварных соединений – в знаменателе.

рует необходимость оценки материала и его сварных соединений не только по значению прочности, но и показателю вязкости разрушения, который описывает способность металла работать при наличии дефекта или трещины. Необходимость оценки работоспособности оболочки с использованием двух параметров обусловлена сложностью её конструкции. Она, как правило, укрепляется силовым набором в виде шпангоутов и стрингеров из одного материала.

Силовой набор имеет обычно П-образный профиль с полками не менее 15-20 мм и толщиной на 0,5-1 мм тоньше герметичной оболочки. Такие конструкции имеют форму сферы, цилиндра или тора. Технология их изготовления аналогична технологии сварки отсеков. Однако силовой набор обычно отсутствует. Приварку к оболочке различных кронштейнов производят угловыми швами ручной или полуавтоматической сваркой неплавящимся электродом. Для снижения массы резервуара оболочку подвергают химическому фрезерованию, оставляя в зоне сварки исходную толщину. Толщина остальных участков оболочки при этом уменьшается весьма существенно.

Как отмечалось выше, производство космических летательных аппаратов связано с потребностью в материалах, которые имеют высокие механические и ресурсные свойства при сверхнизких температурах (*табл. 5*). К таким конструкциям относятся, прежде всего, герметичные резервуары для содержания жидких компонентов топлива. Такие резервуары представляют собой штампосварные конструкции с толщиной оболочки 3-5 мм.

В процессе изготовления такой конструкции одним из основных является требование к уровню сварочных напряжений и деформаций. С этой целью сварку выполняют только в нижнем положении. Для чего используют специальную оснастку. Её конструкция предусматривает свободную усадку швов в процессе сварки, которая зависит от жёсткости сварного узла и оснастки. Не менее важным с технологической точки зрения является доступ в зону сварки, а также возможность крепления поддувов для защиты корневой зоны шва. В случае отсутствия подобных приспособлений элементы свариваемой конструкции собирают, используя технологию прихваток.

Созданные за последнее десятилетие новые алюминиевые сплавы совместно с другими конструкционными материалами открыли пути к появлению конструкций с более совершенными аэродинамическими формами. При этом сварные конструкции не только легкие и прочные, но и характеризуются высокой надёжностью и безопасностью эксплуатации летательных аппаратов. Современные модели самолётов и ракет позволили освоить новые тактико-технические характеристики, которые обеспечивают гражданскому воздушному транспорту необходимую экономичность, а военной авиации - высокую эффективность. Общая тенденция разработки очередных моделей летательных аппаратов связана с освоением областей высоких скоростей полета и рабочих температур конструкции. В ближайшей перспективе предусматривается создание длительно летящих в атмосфере гиперзвуковых летательных аппаратов со скоростями полета М = 5-7-10 (*рис. 9*).

Для решения этих задач отрабатываются раз-

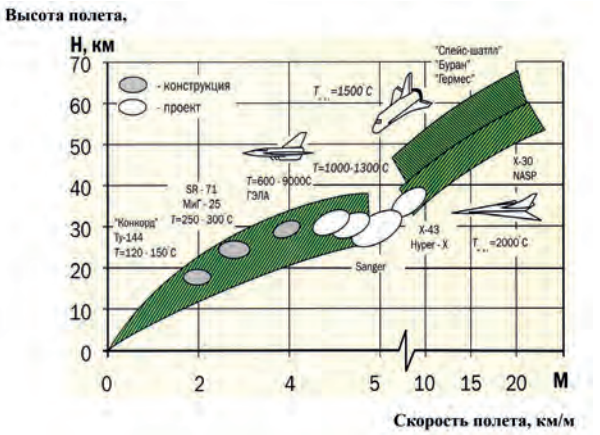


Рис. 9. Основные тенденции использования новых материалов в изделиях летательных аппаратов

личные концепции. Например, для создания цельносварных конструкций предусматривается возможность дальнейшего повышения качества, надежности и срока эксплуатации изделий за счет применения новых высокопрочных легких сплавов, способов сварки, современной методологии проектирования и изготовление сварных узлов. Реализация такой концепции предусматривает изготовления сварных оребренных панелей крыла, обладающих большой жесткостью и минимальной удельной массой, элементов фюзеляжа, шасси и др. Она предполагает существенную экономию металла, снижение массы конструкции при замене механических соединений сварными за счет более полного использования рабочих сечений и отсутствия вспомогательных элементов крепления.

Исходя из накопленного опыта и технологических возможностей самолетостроительного производства и экспертных оценок новых разработок в области сварки, основными технологическими положениями при создании, например, сварной конструкции кессона-крыла могут быть:

- соединения продольных стрингеров с листами и другие элементы подкрепления панелей выполняются контактной точечной сваркой;
- продольные соединения панелей между собой и с лонжеронами выполняются стыковыми швами с использованием автоматической сварки плавлением;
- соединения стрингеров с нервюрами и других элементов подкрепления выполняются с помощью механического крепежа либо контактной точечной или ручной аргонодуговой сваркой;
- соединения в местах законцовок и местах недоступных для использования сварки выполняются другими способами (без применения сварки).

Традиционно используемые материалы на основе алюминия заменяются более совершенными по составу и свойствам. Поскольку основная задача совершенствования конструкций самолётов заключается в снижении веса, повышении ресурса и живучести при надлежащем уровне прочности, надёжности и экономической эффективности, то постоянно ведутся исследования, которые позволяют раскрывать все новые резервы повышения служебных характеристик, и тем самым повышать их конкурентоспособность с другими материалами. Процесс замены материалов для авиационной конструкции наглядно иллюстрирует *табл. 6*. По данным таблицы чётко прослеживается существующая тенденция расширения диапазона использования алюминиевых сплавов с более высокими значениями удельной прочности и жёсткости. Основанием для этого являются результаты исследования свариваемости новых высокопрочных сплавов, например, с литием, а также опыт успешного применения некоторых из них в аэрокосмической технике. Эф-

Таблица 6. История разработки материалов для силовых элементов конструкции летательных аппаратов

<table>
<tr><td rowspan="2">Разработка летательных аппаратов</td><td>Первые летательные аппараты</td><td>Первое поколение боевых самолётов</td><td>Пассажирская техника</td><td>Скоростные машины</td><td>Боевая техника с газовыми турбинами</td><td>Сверхзвуковые самолёты</td><td>Воздушные суда с укороченным взлётом</td><td>Космические челноки</td></tr>
<tr><td colspan="2">Бипланы</td><td colspan="4">Реактивная техника</td><td>Тяжёлые вертолёты</td><td>Крупногабаритные самолёты</td></tr>
<tr><td rowspan="14">Этапы разработки материа</td><td colspan="2" rowspan="12"></td><td colspan="2" rowspan="12"></td><td rowspan="12"></td><td rowspan="4"></td><td rowspan="3"></td><td>Керамика, керамические композиты</td></tr>
<tr><td>Композиты с металлической матрицей</td></tr>
<tr><td colspan="2">Композиты с полимерной матрицей</td></tr>
<tr><td colspan="2">Титановые сплавы, титан RSP</td></tr>
<tr><td colspan="2">Нержавеющая и высоколегированная сталь</td></tr>
<tr><td colspan="3">Высокопрочная сталь</td></tr>
<tr><td colspan="3">Магниевые сплавы</td></tr>
<tr><td colspan="2">Монококоновые конструкции из алюминиевых сплавов</td><td>Al-Li сплавы</td></tr>
<tr><td colspan="2">Каркасы из сталей и алюминиевых сплавов</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Монококовые деревянные конструкции</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Древесина, проволока, ткань</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

фективное использование этих сплавов в конструкциях военных самолётов с вертикальным взлётом серии МиГ-29 является предпосылкой для создания перспективных моделей нового поколения широкофюзеляжных гражданских самолетов типа аэробус, обладающих высокими показателями экономичности и безопасности.

Ярким примером политики активного обновления конструкции является самолёт Боинг 777. Он вобрал в себя наиболее перспективные разработки в области материалов и, используемых в производстве самолётов, технологических процессов и операций. Для верхней поверхности крыла, где наиболее важными показателями являются характеристики статической прочности, применяется высокопрочный алюминиевый сплав, разработанный совместно фирмами «Боинг» и «Алкоа» - сплав 7055-Т77 с пределом текучести 640 МПа. Нижняя поверхность крыла изготовлена из улучшенного состава сплава 2324-Т39, обладающего высокими прочностными и усталостными свойствами. В фюзеляже применён сплав 2524-Т3, имеющий высокие характеристики прочности, усталости и трещиностойкости.

Лидером применения новых перспективных материалов на сегодняшний день является самолёт Airbus A-380, который был создан в Европе (*рис. 10*). Он рассчитан на 555 пассажиров, что на треть больше, чем у основного конкурента - «Боинг-747». Первый в мире двухэтажный (или двухпалубный) самолёт оснащён 4 двигателями. Его длина – 73 м, размах крыльев – 79,8 м, высота – 24 м. Лайнер способен пролетать без посадки и дозаправки 15 тыс. км. Для верхней поверхности конструкции крыла используют высокопрочный сплав 7055-Т77, для нижней поверхности – улучшенный состав сплава 2324-Т39. Для верхней части фюзеляжа применяют сплав 2524-Т3, в нижней части - свариваемый коррозионностойкий сплав 6013-Т6. Оперение самолёта и центроплан крыла изготавливают из композиционных материалов. Замена материала позволила уменьшить вес конструкции и повысить технологичность её изготовления.

Рис. 10. Самолёт Airbus A-380 набирает высоту на взлётной площадке

В российских конструкциях самолётов широко представлены сплавы двух систем легирования – Al-Cu-Mn и Al-Zn-Mg-Cu. Для наружной обшивки фюзеляжа и несущих боковых и нижних поверхностей крыла, подвергаемых усталостным нагрузкам, используется сплав Д16-Т, а для силовых элементов фюзеляжа (шпонок, стрингеров) и обшивки верхней несущей поверхности крыльев, на которые действуют усадочные напряжения – сплав В96 (7075). Сейчас ведутся разработки на основе традиционных сплавов с целью улучшения их прочности, вязкости и усталостных свойств.

Эти же сплавы используются и в самолётах, проекты которых были разработаны и реализованы на авиационных предприятиях Украины и РФ. Основными аспектами таких разработок стали: улучшение аэродинамических свойств, внесение новых конструктивных элементов, совершенствование технологии производства, замена материалов. Это обеспечило улучшение тактико-технических параметров изделий: повышение грузоподъёмности, снижение удельного расхода топлива, увеличение дальности полёта, что позволило расширить специализацию базовой модели путём создания на её основе самолётов других модификаций. Например, для самолёта Ан-70: Ан-171, Ан-70Т, Ан-70ТК, Ан-77 (*рис. 11*). При создании самолётов третьего поколения (Ан-140) особое внимание уделяется повышению надёжности и безопасности полётов. Они обеспечиваются рациональным использованием новых видов высокоресурсных соединений, включая сварочные. Чем более ответственны функциональные задачи, которые ставятся перед новыми летательными аппаратами, тем более совершенными должны быть материалы, применяемые

АН-70: высота полета 8600-9600 м;
Скорость полета – 750 км/ч;
Модификации: Ан-171;
Ан-70Т; Ан-70ТК; Ан-77.

Авиасалон 2005 г.
в Ле Бурже

Ан-140

Рис. 11. Самолёты Украины – Ан-70 и Ан-140 на авиасалоне в Ле Бурже, 2005 г.

в конструкциях. Это выдвигает еще более сложные проблемы перед специалистами в области их соединения, поскольку самолёты относятся к летательным аппаратам высоких технологий, их разработка и производство интенсивно развиваются и в настоящее время.

Для уменьшения массы машин одной из важнейших предпосылок является совершенная технология производства. Помимо термической, механической и пластической обработки она охватывает многие способы сварки. Хотя они в производстве летательных аппаратов отличаются малой производительностью, высокой стоимостью оборудования, однако при этом обеспечивают высокую надёжность соединений и способность противостоять самым жёстким условиям эксплуатации. К числу таких способов соединения типовых элементов из алюминиевых сплавов относится дуговая сварка металлическим неплавящимся электродом в среде защитного газа. Она не нашла широкого применения в аэрокосмической промышленности, поскольку не обеспечивает достаточно высоких механических свойств соединений и требуемого уровня надёжности. Тем не менее, этот способ соединения алюминиевых сплавов является основным при сварке подвесных отсеков для горючего и окислителя ракет различного класса.

Например, при изготовлении конструкции бака из алюминиевых сплавов 2014 и 2219 ракеты Saturn V оказалась наиболее предпочтительной дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде защитного газа [5]. Это продемонстрировали и последние разработки Пекинского НИИ аэрокосмических технологий [41]. Были изготовлены сварные конструкции корпуса ракетных двигателей и топливные баки ракет из алюминиевых сплавов с использованием технологии дуговой сварки. Надёжность соединения обеспечивается за счёт создания эффективного теплоотвода позади дуги, что значительно снизило остаточные напряжения и деформацию в сварных соединениях.

При изготовлении типовых элементов многоразового космического корабля Space Shuttle широкое применение нашла технология плазменной сварки (*рис. 12*). Одним из новых вариантов этого способа является плазменная сварка с переменной полярностью дуги, освоенная на фирме Hobart Brothers [9]. Метод специально разработан для сварки толстых профилей из алюминиевых сплавов, предназначенных, прежде всего, для подвесных топливных отсеков кораблей Shuttle (*рис. 12, 13*). Наиболее эффективным оказался термический цикл при режиме: импульсе обратного тока 15-20 мс, прямого – 2-5 мс; сила прямого тока при этом на 30-50 А выше, чем обратного. Это создаёт условия концентрированного нагрева основного металла, что позволило сократить угловую деформацию сварного соединения.

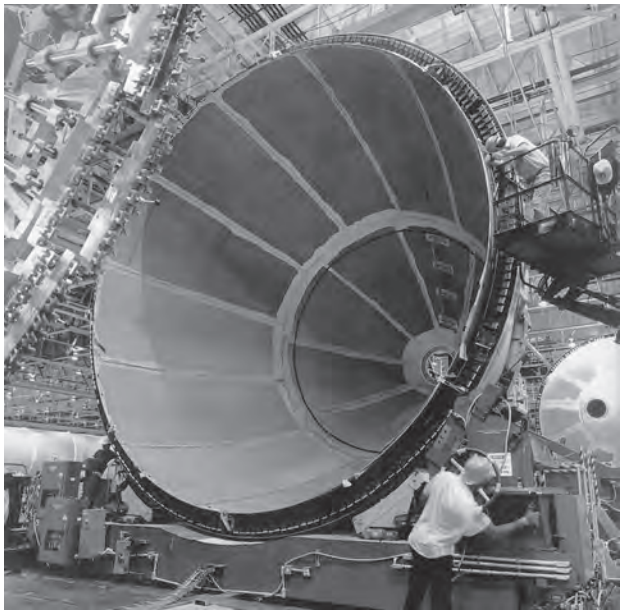


Рис. 12. Сварка купола внешнего бака для топлива космического корабля многоразового использования Space Shuttle (США)

Для соединения стрингеров с обшивкой в самолётах Airbus 318 и 380 как альтернативный вариант клёпаным соединениям применяют лазерную технологию. При сварке фюзеляжа истребителя F-22 взамен алюминиевых клёпаных конструкций использовали электронно-лучевую сварку [4]. Её использовали, поскольку в этом случае отмечают уменьшение размера зоны термического влияния и значительное снижение деформации сварного соединения

Для получения цельных профилей типовых элементов конструкции в настоящее время используется сверхпластическая штамповка и прокатка. Основная задача этих процессов состоит в максимальном приближении деталей при обеспечении необходимых физико-механических свойств. Полые конструкций изготавливают путём применения различных способов сварки. Наибольшее объём внедрения имеют диффузионная и электронно-лучевая сварка, а также новый комбинированный способ ***сварки трением с перемешиванием*** [7, 8]. Основными требованиями к технологии являются высокое качество соединения, обеспечение минимального риска при эксплуатации изделий и приемлемую стоимость производства.

Из алюминиевых сплавов с участием этого способа сварки, а также других технологических операций (прессование, штамповки, проковки и т.д.) изготавливают продольные балки конструкции, вытягивают обшивку и рамы фюзеляжа, формируют дробеструйной обработкой обшивку фюзеляжа и выполняют сверхпластическую обработку смотровых люков. Комплексная технология обработки алюминиевых элементов и их соединения позволила фирме Boeing изготовить бак для жидкого кислорода и топливный отсек стартового ускорителя

ракеты-носителя серии Delta.

Конструкция бака, который загружается криогенным топливом, занимает большую часть габаритов летательного аппарата. Его конструкция должна отвечать следующим требованиям: стойкость к внешнему нагреву - достаточную для сохранения в холоде криогенного ракетного топлива; теплоизоляцию внутри бака; предотвращать возможность утечки жидкого кислорода. Отсек стартового ускорителя состоит из 2-х типов баков длиной 12 и 8,4 м, а также промежуточного цилиндра длиной 4,8 м и диаметром 2,4 м. Его сваривают из 3-х типовых элементов в виде панелей, которые изготавливаются из алюминиевого сплава 2014-Т6 толщиной 22,22 мм с вафельной ромбовидной внутренней поверхностью. Собранные под сварку и прихваченные вафельные панели помещают в установку сварки трением, закрепляют и сваривают 3-я продольными швами изнутри, вращая получаемый цилиндр. В перспективе планируется осуществить соединение колпака с цилиндром кольцевым швом, используя сварку трением.

В 2021 г. готовится к запуску ракета Delta IV. Баки для неё планируют изготовить из алюминиевого сплава 2219. Поскольку бак имеет большие габариты, то его сварку предполагают выполнять в вертикальном положении. При этом бак будет перемещаться относительно платформы со сварочной установкой. Компания Boeing, разработав такой технологический процесс, ожидает увеличения числа коммерческих запусков спутников с помощью ракет серии Delta и планирует производить для системы Delta IV до 100 баков в год. Этой же компанией проводятся широкомасштабные исследования эксплуатационных свойств сварных соединений и разработка новой технологической документации. Такая стратегия производства обусловлена расширением сферы применения данного процесса при изготовлении сварных конструкций для гражданских и военных заводов.

Активно ведутся работы и по освоению криволинейных соединений. Для изготовления сверхлёгких подвесных отсеков многоразового воздушно-космического аппарата типа «Спейс Шаттл» (Space Shuttle) НАСА (*рис. 13*) использовала технологию сварки трением с перемешиванием для соединения листов толщиной от 2 до 5 мм сплава 2195 системы Al-Li. Такие элементы конструкции служат для размещения компонентов топлива и обычно имеют длину 47 м и диаметр 8,38 м. Они включают в себя 2 бака и промежуточный отсек, который воспринимает в процессе полёта летательного аппарата тягу 2-х твердотопливных ускорителей. Результаты исследования качества швов, выполненных сваркой трением, подтвердили, что данная технология может полностью заменить плазменную и электронно-лучевую способы сварки при работе с алюминием и его сплавами. Малая величина погонной энергии сварки создаёт необходимые для формирования сварного шва теплофизические условия. Иными словами, реализуются условие, при которых деформируется уже распавшийся твёрдый раствор, что позитивно проявляется на уровне физико-механических свойств сварных соединений, степени разупрочнения металла в зоне нагрева, деформации сварных изделий.

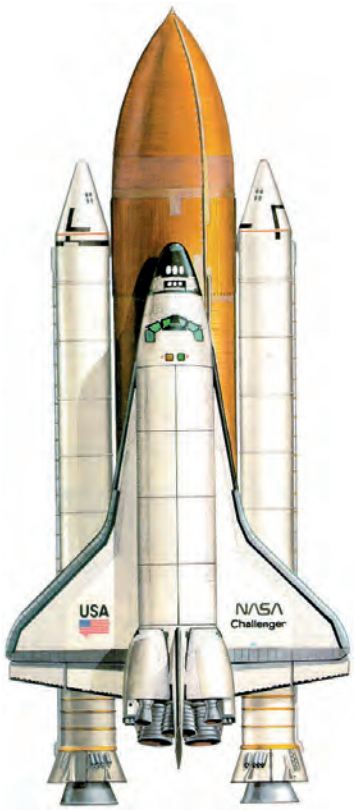


Рис. 13. Космический корабль типа Space Shuttle с базовым внешним топливным отсеком

Способ сварки трением с перемешиванием был опробован и для соединения нового алюминиево-литиевого сплава - С458 (Al-1,8Li-2,7Cu-0,3Mg-0,08Zr-0,3Mn-0,6Zn), который характеризуется более низкой плотностью (0,026 кг/см^3) по сравнению с другими алюминиево-литиевыми сплавами и высоким модулем упругости по сравнению со сплавом 2219. Полученные результаты исследования свариваемости и физико-механических свойств сварных соединений позволяют прогнозировать, что благодаря замене традиционных сплавов на новый сплав С458 в конструкции топливного бака многоразового корабля можно будет сэкономить затраты на производство и обслуживание от 2 до 4 млн. дол. в течение 400 полётов.

Перспективный анализ (до 2021-2025 гг.) использования материалов на алюминиевой основе в летательных аппаратах свидетельствует о том, что эти сплавы сохранят за собой лидерство в конструкциях самолётов, в частности планера (около

80%). Главная тенденция их развития основана на повышении прочности и снижении удельной массы сплава. Значение удельной прочности (σ_B/γ - отношение прочности к удельной массе) как при повышении прочности, так и снижении удельной массы сплава увеличивается. Однако необходимо отметить, что повышение указанных характеристик, как правило, базируется на усложнении химического состава сплава, необходимости оптимизации режимов термической обработки и др. технологических приемах, включая и сварочный процесс, которые вызывают снижение пластических и ресурсных свойств материалов. В связи с этим создание качественных неразъемных конструкций из новых материалов на алюминиевой основе, являясь крупной научной и технологической проблемой, побуждает к широкомасштабному исследованию и освоению новых способов сварки алюминиевых сплавов с учётом того, что сварные соединения должны работать с очень высокой степенью надежности в весьма сложных условиях эксплуатации.

В области судостроения прослеживается аналогичная тенденция перспектив применения новых способов сварки [8-12]. Основным конструкционным материалом при строительстве быстроходных судов для эксплуатации в условиях морских и речных бассейнов являются алюминиевые сплавы группы 5XXX (АМг) системы легирования Al-Mg-Mn. Они обладают по сравнению со сталью существенным преимуществом – высокой коррозионной стойкостью в морской воде. Кроме того, алюминиевые корпуса не обрастают ракушками, что сохраняет обтекаемость судна и увеличивает оборачиваемость в межремонтный период, что снижает расходы на эксплуатацию и покраску. Тем самым обеспечивают условия, необходимые для работы в водной среде (*рис. 14*). Ранее в судостроении широко использовали различные способы сварки плавлением, особенно сварки плавящимся электродом. В последние годы в судостроении отмечается повышенный интерес к внедрению технологии сварки трением для производства. При этом используются все типы сварного соединения: стыковые, тавровые, угловые и др. Наибольшее развитие этот способ сварки получил в скандинавских странах Европы.

Пограничный катер, построенный в 2002 г. с широким применением алюминиевых сплавов. Водоизмещение 200 т, длина 50 м. Развивает скорость 44 узла (Япония)

Прогулочный катер, построенный в 2002 г. Развивает скорость 45,2 узла (Япония)

Малый рыболовецкий траулер, построенный в 2002 г. Корпус выполнен из алюминиевого сплава. Общая длина 50 м, ширина 4,8 м, глубина 2,4 м, водоизмещение 39 т, скорость в прибрежной зоне 39,5 узла (Япония)

Рис. 14. Примеры использования алюминиевых сплавов в судостроительных конструкциях

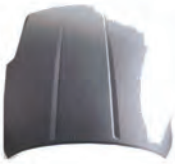
Широкому распространению технологии сварки трением с перемешиванием способствовала успешная разработка сварочного оборудования, которая была осуществлена фирмой ESAB (Швеция) по лицензии, приобретенной у Института сварки (Англия). Согласно данным, представленным фирмой ESAB, создание серии установок SuperStir основывается на базе использования стандартных машин модульного типа. Подобная производственная стратегия позволила разработать типовой ряд сварочного оборудования для соединения различных групп алюминиевых сплавов. Разработанные на модульной основе установки охватывают весь диапазон параметров рабочего пространства под габаритные размеры свариваемых панелей от 0,5х1,5 м до 10х20 м. В состав оборудования входят специальные зажимные устройства с зубчатым механизмом перемещения, сварочная машина, компьютерная система управления. Сварку выполняют в автоматическом режиме. Параметры процесса сварки регистрируются встроенной системой оперативного контроля.

Одна из установок SuperStir была опробована норвежской судостроительной компанией Marine Aluminium при изготовлении корпусов скоростных катеров и крупных корпусных паромов из алюминиевых панелей размером 6х16 м. При этом была выполнена оценка эксплуатационных свойств сварных соединений сплавов 6082 и 7108, и определена возможность использования алюминиевых панелей, сваренных методом трения с перемешиванием, для обшивки морских судов. Согласно имеющимся данным сварные образцы, подвергнутые очистке от продуктов коррозии и последующему растяжению, показали высокую антикоррозионную стойкость после циклических испытаний в камере с морской средой в течение 1000 ч при влажности 98%, а также температуре 50°С и выше. Высокие свойства при баллистических испытаниях показали сварные соединения сплава 2519-Т87, полученные с использованием сварки трением с перемешиванием. Они позволили фирме General Dynamics Land Systems в содружестве с Edison Welding Institute сваривать плиты размером 1219х1219х31,8 мм для создания нового поколения конструкций морских бронированных амфибий.

Шведская фирма SAPA совместно с Технологическим институтом сварки (Великобритания) разработала и освоила производство сварных панелей для холодильных установок быстрой заморозки. К сварным соединениям этих панелей предъявляются повышенные требования по плотности швов,

поскольку они удерживают охлаждающие вещества, опасные для человека и окружающей среды. Эта же фирма, используя сварку трением с перемешиванием, освоила производство сварных панелей для станций предварительного сжатия рыбной массы перед замораживанием. Конструкция подобной станции состоит из 17 панелей толщиной до 30 мм с общей длиной шва 16 м. Оборудование завода SAPS Profil (Швеция) позволяет сваривать из прессованных профилей длинномерные и широкие панели размером 14,5x3,0 м для изготовления палуб судов, крыш и боковин вагонов железнодорожных поездов и метро.

В области автомобилестроения привлекательными качествами алюминиевых сплавов для конструкторов являются: снижение массы автомобиля и, соответственно, уменьшение потребления топлива; замена дефицитной меди и коррозионностойкой стали; более широкие сырьевые возможности по сравнению с другими металлами; высокая эффективность переработки (рециклирования) алюминиевых фрагментов и деталей после окончания срока эксплуатации автомобилей [7, 8]. Специалистами подсчитано, что каждый кг алюминия, использованный в конструкции автомобиля, позволяет на протяжении срока службы машины экономить 7-10 л топлива.



а

б

«Феарди» Z33 новой модификации. Алюминий использован для капота (а) и двигателя, позволило на 8 кг уменьшить его массу. Выполнены также из алюминия силовые элементы бампера и подвески (б)

«Скайнлайн» V35 новой модификации. Из алюминиевых поковок сделана передняя (а) и задняя подвески (б)

а

б

Рис. 15. Примеры использования алюминиевых сплавов в легковых автомобилях

Анализ динамики роста применения алюминия и его сплавов в легковых автомобилях стран ЕС и США показывает, что уже в 2000 г. общая масса узлов и деталей из алюминия составляла 120-150 кг или около 10% от всей массы автомобиля. Иллюстрацией перспективных возможностей применения алюминиевых сплавов является автомобиль «Порше 928», в конструкции которого около 300 кг алюминиевых деталей, что составляет около 20% от общей массы автомобиля.

Фирмой «Ford Motor Co» разработана новая модель автомобиля «Synthesis-2010», конструкция которого изготовлена в основном из алюминия, что обеспечивает практически его полное рециклирование. Сварной алюминиевый несущий кузов имеет массу на 46% меньше, чем кузов, выполненный из стали. Автомобиль оснащён трехцилиндровым двигателем с алюминиевым блоком цилиндров.

В автомобилях класса «Ауди-А8», «Лотус», «Экспедшен» («Форд»), «Навигатор» и др. алюминиевые сплавы широко используются в конструкции кузовов. Однако это, как правило, автомобили высокого класса, спортивные или так называемые «внедорожники» (*рис. 15*). Объём производства таких автомобилей не превышает 0,1-0,2% от обще-

«Тоёта» FCHV модификации на топливных элементах. Алюминий использован для корпуса этих элементов, а также для крыши, крыльев, панелей боковых дверей и крышки капота. Значительно снижена масса кузова

Сверхлёгкий грузовой автомобиль FU с алюминиевыми рамами. Это крупногабаритный грузовик, рама шасси которого изготовлена из алюминиевого сплава. Боковые балки, имеющие разную форму сечения, представляют собой цельные пресс-профили, поперечные балки изготовлены путём экструдирования. Цистерна и колеса также из алюминиевых сплавов

Алюминиевая рама

Кузов самосвала из алюминиевого сплава, изготовленный с использованием сварки трением с перемешивашием. Этим способом соединяли полые прессрофили двойной обшивки при изготовлении кузова. Новая технология позволила значительно повысить производительность, сгладить небольшие неровности на соединяемых поверхностях и получить декоративные швы

Швы, выполненные сваркой трением

Швы, выполненные сваркой трением

Рис. 16. Примеры использования алюминиевых сплавов в грузовых автомобилях

го объёма выпуска легковых автомобилей в мире.

Наиболее распространенными узлами и деталями автомобилей из деформируемых и литых алюминиевых сплавов являются каркас (рама), теплообменники (радиатор и отопитель), бампер, дверцы, крышка багажника и капота, кузов, диски колес, блок цилиндров, поршни, профили наружной и внутренней отделки, кабины кузовов и борта грузовых автомобилей и рефрежираторов, топливные баки (*рис. 16*).

В зарубежных марках легковых автомобилей в каркасной конструкции для рам и других элементов применяют прессованные профили из алюминиевых сплавов. В частности автомобильная компания AOS/APC сообщила о широком внедрении в процессе изготовления сварной рамы автомобиля из алюминиевого профиля методом сварки трением с перемешиванием.

В *табл. 7* представлены основные типы сварных соединений и способы сварки, которые нашли широкое применение при изготовлении элементов конструкции автомобилей из алюминия и его сплавов. Их реализация в производстве автомобилей была обусловлена решением целого ряда производственных сложностей. К их числу следует отнести: отсутствие алюминиевых сплавов оптимального состава для изготовления кузовов грузовых и легковых автомобилей; низкий предел текучести сплавов по сравнению со сталью; отсутствие серийной технологии штамповки автомобильных заготовок, особенно тонкостенных изделий, подготовки алюминиевого полуфабриката под сварку (лазерную, контактную, дуговую) и последующего нанесения защитных покрытий. В настоящее время разрабатываются новые конструктивно-технологические, металлургические и организационные методы, которые в основном направлены на дальнейшее снижение массы кузова и расхода топлива, улучшение экологических показателей, высокую надёжность и длительный ресурс, а также высокую комфортность и безопасность при эксплуатации автомобиля.

Анализ современных тенденций развития автомобилестроения показывает, что на сегодняшний день имеются 3 основных направления применения алюминиевых сплавов при изготовлении кузовов автомобилей. Первое – это все детали и узлы кузова в автомобилях с несущим кузовом. Второе - это навесные детали и узлы капотов, крышек багажников, люков, съёмных крыльев, дверей, топливных баков, силовых балок переднего и заднего бамперов, систем выхлопа и т.д. Третье – это детали и узлы автомобилей рамной конструкции кузова. Последнее направление особенно широко распространено в США и Европе. Для этого широко применяют

Таблица 7. Основные типы соединений и способы сварки алюминиевых сплавов при изготовлении элементов конструкции автомобиля

Элемент конструкции	Сплав	Толщина	Способ сварки	Основной тип соединения
Крылья перед-ние и задние	АМг2, сплавы системы Al-Mg-Sc (1523)	1-2,5	Лазерная, контактная (точечная или шовная)	
Двери	АМг2, АД37, АМг4, 1523, 1535	1-2,0	Лазерная, контактная (точечная или шовная), точечная дуговая, ручная дуговая	
Капоты, крышки	АМг2, АМг4, АД37, сплавы системы Al-Mg-Sc (1523, 1535)	1-2,5	Лазерная, контактная (точечная или шовная), точечная дуговая, ручная дуговая	
Топливный бак	АМг2, АМг4, АМг6, сплавы системы Al-Mg-Sc (1523)	1,5-2,5	Лазерная, контактная (точечная или шовная), точечная дуговая, ручная дуговая, автоматическая аргонодуговая	
Система выхлопа газов	1419, 1151, САП	1,2-1,8	Лазерная, контактная (точечная или шовная), точечная дуговая, ручная дуговая, автоматическая аргонодуговая	
Силовые элементы, лонжероны, бампер	АМг4, АМг6, АД37, сплавы системы Al-Mg-Sc (1535, 1545,1570)	1,5-3,0	Лазерная, контактная (точечная или шовная), точечная дуговая, ручная дуговая, автоматическая аргонодуговая	

алюминиевые сплавы систем легирования Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, сплавы 5083, 5456, 5556, 6061, 6013, 7033. В России для тех же целей применяют их аналоги: АВ, АД33, АД37, АМг2, 1515, 1523. Для силовых конструкций и узлов автомобилей широко используют сплавы системы Al-Mg и Al-Mg-Sc: 1535, 1545, 1570, АМг6, для систем выхлопа – сплавы 14190, САП-3, 1151, для силовых рычагов торсионов, штанг – сплавы 1970, АК6, 1460, 1933, 1973.

Алюминий и его сплавы применяются также в сельскохозяйственных транспортных средствах, а именно, в производстве грузовых автомашин для перевозки скота, рефрижераторов, муковозов, специализированных кузовов автомобилей и прицепов для транспортировки минеральных удобрений. Помимо снижения массы кузова машин и увеличения полезной нагрузки, что снижает транспортные расходы и экономит горючее, при этом обеспечиваются высокая гигиеничность и длительный срок эксплуатации.

Разработаны также сварные конструкции цельно-алюминиевых бортовых и самосвальных платформ, которые используют при международных перевозках легковых автомобилей. Разработаны конструкции полуприцепов с бортами и решётками для тентов из алюминиевых профилей, полуприцепов-фургонов общего назначения, полуприцепов-рефрижераторов различной грузоподъёмности.

Формирование сварных составных заготовок (ССЗ) в готовый фрагмент кузова автомобиля осуществляется путём их штамповки (*рис. 17*). Конструкция штампового инструмента для глубокой вытяжки ССЗ имеет ряд отличий, определяемых особенностями сварной заготовки, состоящей из частей разной толщины. При проектировании и изготовлении штампов для формоизменения ССЗ учитывается не только разная толщина заготовки, но и различие механических свойств металла отдельных элементов, способ сварки, свойства сварного шва, результаты механических испытаний сварных соединений при статическом растяжении и глубокой вытяжки. Учитывается также ряд общих положений о поведении сварного соединения в условиях пластического деформирования алюминиевых сплавов в процессе штамповки, в частности, образование трещин и разрывов металла при вытяжке заготовок. Поэтому штампы проектируют так, чтобы сварные соединения располагались только перпендикулярно или под определённым углом к краю матрицы.

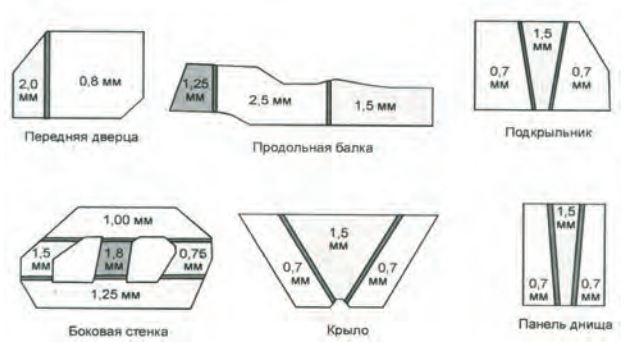


Рис. 17. Конструктивные фрагменты кузова легкового автомобиля, штампуемых из заготовок – «Tailored Blanks»

Арсенал сварочных технологий для производства ССЗ в настоящее время, в частности, из алюминиевых сплавов значительно расширяется. Наряду со сваркой CO_2-лазером (мощностью до 5 кВт) и Nd:YAG - лазером (мощностью до 6 кВт) пластины из алюминиево-магниевых сплавов толщиной 0,5-1,5 мм, в производстве начато использование гибридных лазерно-дуговых технологий (лазер + MIG), которые позволяют снизить расход электроэнергии и требования к точности сборки стыков между элементами ССЗ. Требования к качеству подготовки кромок, точности сборки стыка для сварки алюминиевых сплавов включают: наличие строго прямолинейных кромок без заусениц при волнистости не более 0,04 мм. Зазор в стыке между состыкованными кромками толщиной 0,5-3,0 мм не должен превышать 0,08 мм. На *рис. 18* представлена ССЗ, состоящая из 3-х элементов, которые были соединены сваркой лазером. Штамповка заготовки была выполнена по оптимизированной технологии, которая учитывала геометрию и расположение металла шва.

На ряде автомобильных предприятий и фирм США в ходе освоения производства ССЗ эксплуатируются новые установки для выполнения технологии безвакуумной электроннолучевой сварки (БВ ЭЛС). В Японии выполняются исследования по применению сварки тонколистового алюминия и его сплавов (0,8-1,5 мм), в т. ч. и ССЗ, сварки трением с перемешиванием в автомобилестроении. Всё это свидетельствует о разнообразии сварочных технологий (дуговых, контактных, лучевых, гибридных и т.д.), которые применяют производители автомоби-

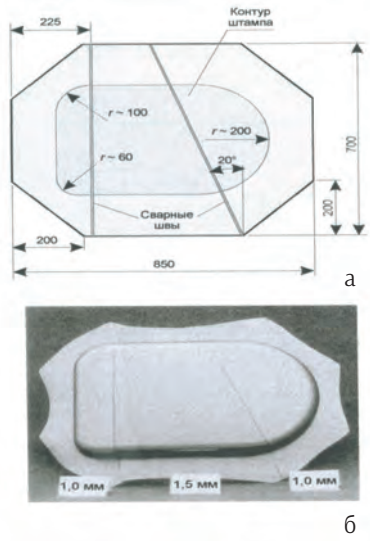


Рис. 18. Оптимизированная по условиям штамповки составная размерная заготовка, сваренная из трёх элементов: а – тонколистовая заготовка; б – отштампованная деталь

лей при изготовлении сварных элементов конструкций. Выбор определённого процесса сварки при организации производства в основном базируется на оценке их технологических возможностях, а также анализе их преимуществ при сварке заготовок конкретных элементов кузова (днище, стойки, двери и т.д.). Большое значение имеет и стоимостное сравнение технологий сварки заготовок в зависимости от типажа и объёмов производства автомобилей.

Для серийного производства ССЗ сегодня выпускаются тонколистовые заготовки исключительно с прямолинейными сварными соединениями. Это отчасти определяется и существующим типом установок, и требованиями по резке, сборке и сварке заготовок. Дальнейшая конструкторская оптимизация заготовок предполагает также применение непрямолинейных и замкнутых, контурных швов для приварки или сварки усиливающих сечений элементов ССЗ. Следует отметить, что это возможно лишь при использовании лучевых и гибридных технологий. Испытание готовых элементов включает всесторонний контроль качества сварных швов после штамповки с использованием традиционных подходов: оценка прочности и пластичности соединения, а также его пригодность к глубокой вытяжке при штамповке.

В железнодорожном транспорте (*рис. 19*) алюминий и его сплавы применяют в виде штампованных и прессованных заготовок при изготовлении буксов вагонов. Масса букс при этом снижается вдвое. Демпфирующие свойства алюминия способствуют уменьшению на 10% нагрузки на путь и элементы конструкции вагона. Благодаря высокой коррозионной стойкости и хорошей свариваемости алюминия, его успешно используют при изготовлении железнодорожных цистерн для перевозки концентрированной азотной кислоты, молока, виноматериалов, расплавленной серы и др. химических материалов. В интерьере пассажирских вагонов широко применяют профили и др. элементы. Трубы с внутренней плакировкой из коррозионностойкого алюминиевого сплава используют для систем водоснабжения и отопления вагонов. Срок их службы в 10 раз больше, чем монометаллических, что исключает необходимость ремонта систем в период эксплуатации.

В настоящее время рассматривается возможность использовать в конструкциях вагонов крупногабаритные панели из алюминиевых сплавов шириной до 800 мм в качестве элементов силовых конструкций. Рядом преимуществ обладают алюминиевые транспортные контейнеры всех типов по сравнению со стальными изделиями. Их масса вдвое меньше стальных, коррозионная стойкость значительно выше, они более долговечны и экономичны в эксплуатации, т.к. имеют более высокую полезную нагрузку и не требуют окраски.

Железнодорожный локомотив серии 800 для новых скоростных магистралей. Имеет двойной корпус из пресспрофилей и алюминиевый настил пола. Благодаря применению алюминиевых сотовых панелей и консолей значительно снижен уровень шума внутри и снаружи

Пригородная электричка типа 817 из крупногабаритных полых пресспрофилей (с двойной оболочкой). Их сваривали трением с перемешиванием. Планируется строительство 24 составов

Экспресс типа TX-1000. Максимальная скорость 130 км/ч. Корпус вагона представляет собой неокрашенную конструкцию с двойной обшивкой, изготовленную сваркой трением с перемешиванием

Рис. 19. Примеры использования алюминиевых сплавов в ж/д вагонах и вагонах метро

В строительстве гражданских и промышленных сооружений - основой для применения алюминиевых сплавов систем легирования Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Mg-Zn, Al-Cu-Mg послужили - высокая прочность, отсутствие порога хладноломкости, малая плотность, высокая пластичность, хорошая стойкость против коррозии, отсутствие искрообразований при ударе, антимагнитность, высокая сейсмостойкость, бактерицидность, а также хороший внешний вид конструкции. Большинство алюминиевых конструкций не похожи на стальные металлические конструкции и привычные элементы: балка, стойка, ферма – не единственные их образующие. Наиболее экономичными являются листовые плоские, иногда объёмные детали и прессованные стержни, вместе составляющие пространственные системы.

Своеобразные, характерные для алюминия конструктивные формы, в которых видна специфика материала, его конструктивные и архитектурные качества неразрывно связаны с возможностью минимального расхода материала и получения большого экономического эффекта. Наибольшая выразительность алюминия и его сплавов в строительных сооружениях достигается в том случае, когда архитектурно-конструкторское решение носит пространственный характер (*рис. 20*). Его осуществлению

способствует использование современных способов сварки. Наибольшее применение для изготовления строительных конструкций получили дуговые способы сварки в струе инертных газов вольфрамовым и плавящимся электродами, автоматическая по слою флюса полупогружённой дугой и газовая. В последнее время нашла распространение импульсно-дуговая сварка, при которой напряжение и ток изменяются по заданному закону, которая позволяет получать швы в любом положении при изготовлении конструкции самой сложной конфигурации.

Все алюминиевые конструкции и детали, использующиеся в строительстве гражданских и промышленных сооружений, разделяют на 4 класса. Три из них – это большие размерные элементы, которые подвергаются значительным эксплуатационным нагрузкам: листовые, каркасные с ограждением или настилом, каркасы без ограждения; 4-й класс элементов – строительные и архитектурные детали. Номенклатура их очень обширна. Этому способствуют технологические возможности сплавов, которые они проявляют в условиях пластического деформирования полуфабрикатов при прокате, прессовании, холодной гибки и штамповки, что позволяет получать широкое многообразие деталей и узлов с оптимальными в функциональном отношении формами. Хорошие технологические свойства способствуют индустриальному изготовлению алюминиевых строительных элементов, а небольшая масса – быстрому их монтажу. Благодаря свойству бактерицидности и стойкости против коррозии алюминий и его сплавы могут обеспечить самые высокие гигиенические требования к помещению внутри здания любого назначения. А разнообразие форм и цвета удовлетворяет самым взыскательным эстетическим требованиям к интерьерам и фасадам зданий и сооружений.

а

б

Рис. 20. Примеры использования алюминиевых сплавов в строительстве мостов (а) и гражданских сооружений (б), которые используются с 2004 г. Для соединения труб (сплав 6061-Т6, максимальный диаметр 227 мм) с концевыми пуансонами применяли сварку трением с перемешиванием

Несмотря на преимущества, которыми обладают алюминиевые конструкции, следует подчеркнуть, что поиск рациональных технических решений их изготовления повышает трудоёмкость проектирования в несколько раз по сравнению со стальными. Это определяется необходимостью большей степени проработки конструктивных схем и форм сечений элементов конструкций, а также проведением натурных испытаний отдельных образцов для установления ресурсных и коррозионных свойств изделий. Однако, большие затраты на проектирование окупаются продолжительностью эксплуатации таких конструкций, поскольку минимальная стоимость сварного изделия с участием отдельных элементов из алюминиевых сплавов обратно пропорциональна расходам при проработке проекта.

Оценка целесообразности применения алюминиевых сплавов в сооружении гражданского и промышленного назначения традиционно выполняется на основании свода технологических требований и экономических обоснований. Они связаны со значимостью проектируемого изделия или сооружения, а также сроком его эксплуатации. Например, если это зрелищные сооружения, то срок их эксплуатации очень короткий (2-4 года) и быстро окупаются затраты на строительство. В зданиях сельскохозяйственного назначения, где используется быстрый монтаж лёгких конструкций, применение алюминия рационально, поскольку ускоряется ввод объекта.

Эксплуатация алюминиевых конструкций имеет свою специфику. Расходы при этом идут, главным образом, на то, чтобы обеспечить систематическое наблюдение за состоянием поверхности элементов конструкций и мест их сопряжения с деталями из других материалов, которые желательно изолировать от алюминия. При отсутствии агрессивных сред (галоидов или щелочей) алюминиевые конструкции не требуют расходов на ремонт в течение 20-50 лет.

Особенно эффективно применение свариваемых алюминиевых сплавов в сооружениях, расположенных в труднодоступных районах Арктики, Антарктики, горных и пустынных местностях. Это обусловлено специфическим свойством алюминия и его сплавов – повышать прочностные свойства в условиях низких и криогенных температур, сохраняя при этом пластичность, которыми они облада-

ют при комнатной температуре (20-25°С).

Большой экономический эффект получается и при использовании легких конструкции в ходе строительства или реконструкции мостовых переходов. В этом случае имеется возможность не только сохранить прежний архитектурный облик моста, но и увеличить поток движения транспорта. Несмотря на большую разницу в структуре алюминия и бетона, алюминия и армоцемента, использующихся при строительстве мостовых сооружений, основанием для их использования является сравнительно низкий модуль упругости. Именно одинаковые значения данной характеристики у обоих этих материалов позволяет продлить конструктивные схемы алюминиевых сооружений к схемам пространственных армоцементных и железобетонных конструкций.

Таким образом, приведенные выше примеры мирового освоения сварных алюминиевых конструкций в различных областях машиностроения отражают многообразие технологических возможностей и форм реализации уникальных свойств алюминия и его сплавов. Они показывают существующие тенденции их мирового производства и потребления, которые постоянно расширяют спектр использования лёгких конструкций на основе совершенствования известных способов сварки и разработки новых технологий соединения. Примеры их реализации убедительно иллюстрируют тот факт, что эффективность конструкций определяется функциональными требованиями изделия, свариваемостью выбранного алюминиевого сплава и уровнем технологии его соединения при минимальных затратах и сроках изготовления. Этому способствует как появление более совершенных сплавов, обладающих необходимым набором физико-механических и технологических свойств, так и рациональный выбор способов получения их неразъемных соединений, обеспечивающих высокое качество швов и надежность сварной конструкции.

Непрерывность процесса совершенствования традиционных методов сварки и развития специальных технологий соединения свидетельствует о возможности появления в ближайшее десятилетие новых конструктивных решений формообразования типовых элементов конструкции с учётом технологических возможностей высокопрочных алюминиевых сплавов, которые ранее считались трудно свариваемыми, и более широкой их номенклатуры. Они позволят повысить скорость перемещения транспортных средств, увеличить их манёвренность на земле, в воде и воздушном пространстве при обеспечении ресурса и живучести в условиях эксплуатации. При этом также снизятся стоимость производства и обслуживания.

Подобный процесс протекает и в России и Украине. В Украине темпы его осуществления более замедлены. Для интенсификации производства лёгких конструкций необходимо промышленное освоение новейших достижений высокотехнологичных процессов, в разряд которых входит и сварка. Это обеспечит наряду с использованием современного автоматизированного оборудования рост производительности производства сварных конструкций при значительном сокращении ручного труда, снижении трудоемкости, улучшении экологической обстановки при изготовлении типовых элементов. В итоге открывается перспектива создания нового поколения более эффективных изделий различного назначения – от аэрокосмической техники до наземных и водных транспортных средств, а также строительных и мостовых сооружений с широким использованием сварных деталей и узлов из алюминиевых сплавов.

Литература

1. Братухин А.Г., Лукин В.И., Глотов Е.Б., Побежимов П.П. Перспективные литейные алюминиевые сплавы для литодеформированных сварных конструкций изделий авиационной техники. // Сварочное производство. - 1995. - № 4. – С. 3-5.

2. Huang J.C., Shen Y.D., Ho N.J. Characterization of electron beam welding of superplastic 8090 Al-Li alloys. // Materials science and technology. – 1994. - Vol. 10. - № 7. - P. 647-657.

3. Dickerson P.B., Irving B. Welding aluminium: it`s not as difficult as it sounds. // Welding Journal. - 1992. - Vol. 71. - № 4. - P. 45-50.

4. Irving B. Welding the four most popular aluminum alloys. // Welding Journal. – 1994. - Vol. 73. - № 2. – P. 51-55.

5. Guan Q., Shao Y. Progress of welding technology in aviation industry. // China welding. - 1994. - V. 3. - № 2. - P. 97-104.

6. Hart R. Alloy 5083-0 used widely in cryogenic applications. // Metal Progress. - 1974. – V. 105. - № 4. – P. 41-44.

7. Kramer L.S., Pickens J.S. Microstructure and properties of a welded Al-Cu-Li alloy. // Welding Journal. – 1992. - Vol. 71. - № 4. - P. 115-121.

8. Kruder U. Choice of Parameters and Electrode Life at Resistance Forge Welding of Al-Li Alloys in Comparison to 2024. // Sixth International Aluminium-Lithium Conference, 1991, Garmisch-Partenkirchen.: Informations gesells chaft, Ver lag. – 1992. – P. 1159-1164.

9. Stegemann T. und Frings A. Fügeverfahren zur Ezzeügung von maßgeshneiderten, geschweißten Platinen (Tailored Blanks).// DVS-Bericnte-Band. – 1995. – V. 168 - S. 21-25.

10. Irwin B. Welding Tailored Blanks is Hot Issue for Automakers. // Welding Journal. - 1995. – № 8. - P. 49-52.

11. Bachem H. Neue entwicklungen in der Strahltechnik. // Schweissen und Schneiden. – 1997. – № 7. – P. 481-484.

12. Dilthey U., Behr W. Elektronen-strahlschwei en in Atmosphare. // Schweissen und Schneiden. – 2000. – № 8. – P. 461-465.

13. Bierman B., Dierken R., Kupfer R., Lang A., Bergmann H.W. Laser Beam Cutting and Welding of Al-Li sheets. // Sixth International Aluminium-Lithium Conference, 1991, Garmisch-Parten kirchen.: Informations gesells chaft, Ver lag. – 1992. – P. 1159-1164.

14. Katayama Seiji, Lundin C.D. Laser welding of 2092 aluminium alloy. / Journal of light metal welding and construction. – 1991. - Vol. 29. - № 9. – P. 1-13.

15. Yue T.M., Xu J.H., Man H.C. Pulsed Nd-YAG Laser Welding of SiC Particulate Reinforced Aluminium Alloy Composite. // Proc. of X Intern. Conf. on Composite Materials. Metal Matrix Composites. Canada, 1995. - Vol. II. - P.169-176.

16. Schneider C., Prange W. Tailored Blanks – ein Werkstoff f r neue Formen der Konstrution. // Thyssen Technische Berichte. - 1992. – № 1. – P. 97-106.

17. Schneider C., Fzings A. Laserstrahlgeschwei te Platinen - tin neuartiges Konstrution-sement. // Blech Rohre Profile. - 1993. – № 4. – P. 304-311.

18. Siegert K., Knabe E. «Tailored Blanks» – eine neue Technologie zum Automobileichtbau. // Blech Rohre Profile. - 1995. – № 3. – P. 161-171.

19. Vollerstein Frank. Tailored Blanks. // Blech Rohre Profile. - 1995. – № 3. – P. 172-178.

20. Baron Jay S. A Cost Comparison of Weld Technologies for Tailored Welded Blanks. // Welding Journal. – 1997. - № 10. – P. 39-45.

21. New Applications for TWBs – and Laser Welding. // Welding and Joining Europe. - 1998. - № 10. – P. 31.

22. Вильхельм М., Рацим К. Материалы и процессы как факторы прогресса в автомобилестроении. // Чёрные металлы. – 1995. - № 3. – С. 33-38.

23. Рябов В.Р., Павленко Ю.В. Сварка композиционных материалов (Обзор) // Автомат. сварка. – 1991. - № 3. – С. 46-56.

24. Рябов В.Р., Ищенко А.Я., Пап П.А. и др. Получение армированного стальными волокнами композиционного материала на основе алюминия методом напыления в вакууме. // Автоматическая сварка. – 1994. - № 9/10. – С. 40-44.

25. Кривов Г.А. Технология самолётостроительного производства. - К.: КВІЦ, 1997. – 114 с.

26. Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Афанасьева Л.Ф. Мировая авиация на рубеже XX-XXI столетий. Промышленность и рынки. - К.: КВІЦ, 2003.- 295 с.

27. Дмитриев В.Г., Замула Г.Н., Коновалов В.В., Нестеренко Г.И. Приоритетные направления совершенствования материалов для конструкций перспективных самолётов. // Технология легких сплавов. - 2003. - № 1.- С. 3-8.

28. Kuvin B.F. Switch to Al-Li lightens shutts fuel tank. // Welded design and fabrication. - 1995. – V. 7. – P. 14-15.

29. Parwais A.A., Khan, Anand, Paul J. High speed Joining of Aluminium Metal Matrix Composites using Continuous Wave and Pulsed Lasers. // Joining and Adhesion of Advanced Inorganic Materials. San Francisco, 1993. - P. 137-142.

30. Backlund Ian, Norlin Anders, Andersson Ake. Friction Stir Welding-Weld properties and manufacturing techniques. // Proc. 7th Int. Conf. on Joints in Aluminium (INALCO-98). TWI, Abington, Cambridge, UK, 15-17 April 1998.

31. Hibben M., Stemmiel F. Tailored Blanks aus Alluminium. // Blech Rohre Profile. – 1999. – Vol. 42. - № 6. – P. 394-397.

32. Midling Ole T., Oosterkamp Ljiana Djapic, Bersaas Jan. Friction Stir Welding Aluminium-process and applications. // Proc. 7th Int. Conf. on Joints in Aluminium (INALCO-98). TWI, Abington, Cambridge, UK, 15-17 April 1998.

33. Campbell G., Stotler T. Friction Stir Welding of Armour Grade Aluminium Plate. // Welding Journal. - 1999. - № 12. - P. 45-47.

34. Yasuda K., Isizawa Y., Kitaura I. Stady on Hybrid Joining Method Using TIG Arc Welding (Report 1) // Welding of light metals. – 1996. - Vol. 34. - № 11. – P. 537-543.

35. Wemah K. Equipment for Aluminium Welding. // Svetsaren. - 2000. - № 2. - P. 1-13.

36. TWI team is match for aerospace challenge. // TWI Connect. – 1995. - № 73. - P. 12.

37. Кривов Г.А., Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы в автомобилестроении. // Технологические системы. – 2001. - № 5. – С. 86-95.

38. Okura I., Nagisawa N., Iwata S., Kitamura K. Technological developments for realizing aluminium bridges. // Journal of Japan institute of light metals. - 2004. - Vol. 54. - № 9. - P. 380-387.

39. Okura I. Application of the Aluminium Alloys to Bridges. // Journal of Light Metal Welding and Construction. - 2003. - Vol. 41. - № 10. - P. 441-446.

40. Nakagomi T., Ichikawa Y. The Present Condition of Application of the Aluminium Alloys to a Construction Steel Frame. // Journal of Light Metal Welding and Construction. - 2003.- Vol. 41. - № 10. - P. 447-451.

41. Sakurai K. Report of the Aluminium Alloy Bridges in Europe and United States. // Journal of Light Metal Welding and Construction. - 2003. - Vol. 41. - № 10. - P. 452-459.

42. Araya M. Special Constitution and Expression in the Aluminium Structure – The Future and the Past of the Aluminium Structure. // Journal of Light Metal Welding and Construction. - 2003. - Vol. 41. - № 10. - P. 460-471.

43. Wada J. Application of Pre-Ribbed Aluminium Alloy Plate to Architectural Structure. // Journal of Light Metal Welding and Construction. - 2003. - Vol. 41. - № 10. - P. 472-476.

#1303

Резак Р3-ФЛЦ для ручной кислородной резки прибылей крупного литья

В.М. Литвинов, Ю.Н. Лысенко, ООО «НИИПТмаш-Опытный завод» (Краматорск)

Резак Р3-ФЛЦ является первым ручным резаком специального назначения, конструкция которого учитывает особенности кислородной резки прибылей крупного литья, имеющего по линии предполагаемого реза пригар и остатки формовочной смеси. Резак позволяет выполнять разделительную резку прибылей литья толщиной до 500 мм без отставания линии реза, а с применением специальных технологических операций (резка с изменением угла режущей струи в плоскости реза, разводка полости реза, ввод головки резака в полость реза и т.д.) – до 800 мм.

Резак сертифицирован на соответствие ГОСТ-ам и другим нормативно-техническим документам, регламентирующим конструкцию, технологию и правила безопасной работы аппаратуры для газопламенной обработки металлов.

Ручной газокислородный резак Р3-ФЛЦ специального назначения для резки прибылей литья толщиной свыше 300 мм не имеет аналогов. Альтернативой ему является стандартный резак Р3, который переделывают для резки прибылей литья: перепаивают газоподводящие трубки наконечника, изменяют угол наклона головки относительно продольной оси резака и рассверливают отверстия инжектора, смесительной камеры и выходных каналов. Все это делается в кустарных условиях на случайном оборудовании для механообработки без соблюдения правил техники безопасности. Как следствие, при работе с резаком Р3, переделанном для резки прибылей литья, часто возникают обратные удары пламени и др. нештатные ситуации. Для сравнения на ПАО «НКМЗ» для кислородной резки прибылей среднего и крупного литья годовая потребность в резаках Р3-ФЛЦ последние 15 лет колебалась от 40 до 50-ти штук. За все время эксплуатации этих резаков не зафиксировано ни одного случая обратного удара пламени.

Резак Р3-ФЛЦ, разработанный и сертифицированный для кислородной резки прибылей крупного литья толщиной до 500 мм за один проход, а с применением специальных технологических операций – до 800 мм, работает как на природном газе, так и на пропан-бутановых смесях без замены мундштуков.

Газокислородный резак Р3-ФЛЦ предназначен для работы в цехах предприятий, имеющих централизованное снабжение кислородом и горючим газом. Резак подключается к газораздаточным постам цеховых магистралей кислорода с давлением 1,0±0,2 МПа и горючего газа с давлением 0,1±0,02 МПа.

При автономном использовании резака для нормальной его работы необходима кислородная рампа минимум на 10 баллонов и пропан-бутановая рампа на 3 баллона.

Технические характеристики резака Р3-ФЛЦ представлены в *табл. 1*.

Данные, приведенные в *табл. 1*, справедливы при использовании кислорода чистотой не менее 99,5 % и горючего газа теплотворной способностью не менее 8000 ккал/м^3. Разрезаемая заготовка не должна иметь по предполагаемой линии реза пригара, окалины, раковин и остатков формовочной смеси. Если приходится резать по пригару и окалине, средняя скорость резки падает на 20–40 %, а расход энергоносителей растет на 15–30 % в зависимости от масштаба загрязнений.

Газокислородный резак Р3-ФЛЦ рассчитан для работы в тяжелых условиях, воспринимает большие термические нагрузки собственным пламенем и тепловым излучением расплавленного металла и шлака заготовки, берет на себя обратные выбросы жидкого шлака и расплавленного металла. Мощность резака в 2 раза выше, чем мощность стандартного резака Р3 и этим определяются особенности его конструкции.

Основные отличия от других ручных инжекторных резаков, следующие:

1. Все детали резака, воспринимающие высокие термические нагрузки извне (головка, наружный и внутренние мундштуки) и при проскоке пламени внутрь резака (смесительная камера, инжектор, газоподводящие трубки) выполнены в усиленном варианте, толщина стенок этих деталей увеличена.

Таблица 1. Технические характеристики резака Р3-ФЛЦ

Толщина металла, мм		200–300	300–400	400–500
Мундштук внутренний, №		1	2	3
Давление, МПа	кислорода	0,5	0,5	0,6
	горючего газа	0,06		
Расход, м^3/час	кислорода	33	45	60
	природного газа	1,9	3,8	7,5
	пропан-бутана	1,1	2,7	4,4
Резьба на штуцерах	кислорода	М16х1,5		
	горючего газа	М16х1,5LH		
Масса резака, не более, кг		1,3		
Длина резака, не более, мм		1000		

2. Общепринятой является схема, при которой внутренний и наружный мундштуки вкручиваются в головку по резьбе, а герметичность соединения обеспечивается жесткой посадкой их конической части на кромку цилиндрического отверстия головки. Такая схема не исключает перекос внутреннего мундштука относительно наружного за счет значительных допусков в резьбовых соединениях. Кольцевой выходной канал для горючей смеси становится неравномерным по толщине, пламя горит криво и этим нарушается нормальный процесс резки.

У резака Р3-ФЛЦ уплотнение головки резака и внутреннего мундштука происходит по его торцевой поверхности, перпендикулярной продольным осям головки, внутреннего и наружного мундштуков, что обеспечивает концентричность выходного кольцевого канала. Пламя равномерно окружает режущую струю кислорода и обеспечивает нормальный процесс резки.

3. В конструкции резака Р3-ФЛЦ заложено техническое решение, защищенное патентом Украины [1]. Суть этого решения изложена при описании резаков Р1Ш-Сп и Р3Ш в статьях, опубликованных в этом журнале ранее [2, 3]. Применительно к резаку Р3-ФЛЦ получены следующие преимущества:

- пламя резака разделено на два факела: основное мощное и высокоскоростное, не привязанное к мундштукам и не перегревающее их, и дополнительное малой мощности с незначительной скоростью, привязанное к мундштукам и обеспечивающее стабильное горение, но в силу своей незначительности, также не перегревающее мундштуки. Одновременно, благодаря большой площади поверхности шлицевого участка внутреннего мундштука и большому количеству охлаждающих эти мундштуки режущего кислорода и горючей смеси, обеспечивается эффективный теплоотвод внутрь резака. Резак не перегревается даже при прямом контакте с расплавленным металлом и жидким шлаком, что часто происходит при кислородной резке прибылей литья;
- основной факел имеет высокую концентрацию, и, как следствие, малое пятно нагрева, но с высокой температурой. Такой факел быстро расплавляет пригар и окалину, не горящие в струе режущего кислорода, и повышает производительность резки;
- основной факел имеет большую длину и благодаря высокой скорости потоков горючей смеси реакция горения в факеле происходит по всей его длине. Температура в факеле высока по всей его длине, он эффективно обжимает и защищает режущую струю кислорода, сохраняя ее чистоту и скорость, т.е. режущие свойства;
- основной факел имеет высокую скорость, приближающуюся к скорости режущей струи. Тормозящее действие такого факела на режущую струю за счет трения и перемешивания потоков газов уменьшается, т.е. улучшаются ее режущие свойства.

Суммарное действие перечисленных выше факторов влияния подогревающего пламени на процесс резки резко уменьшает вероятность возникновения обратных ударов пламени, повышает безопасность работы и увеличивает производительность резки.

4. В стандартных инжекторных резаках инжектор вворачивается в смесительную камеру, подогревающий кислород из центрального отверстия инжектора попадает в соосное отверстие смесительной камеры, увлекая за собой горючий газ через радиальные отверстия этой камеры. Радиальные отверстия оказывают высокое сопротивление потоку горючей смеси, снижая степень инжекции. У резака Р3-ФЛЦ инжектор вворачивается в главный корпус ствола, а смесительная камера выполнена без радиальных отверстий и входит в состав наконечника. При сборке наконечника и ствола образуется кольцевая щель для подсоса горючего газа в смесительную камеру, легко регулируемая по длине, способная пропустить любое количество горючего газа и не оказывающая сопротивление потоку. Повышается степень инжекции, что приводит к улучшению качества горючей смеси. Качественная горючая смесь позволяет получить равномерное и высокотемпературное пламя, что приводит к повышению производительности процесса резки и экономии энергоносителей.

5. У стандартных резаков одно рабочее отверстие инжектора расположено соосно с рабочим отверстием смесительной камеры. Если взять за основу эту схему при проектировании резака большой мощности, то рабочее отверстие инжектора получится диаметром больше 2-х мм, это снижает качество полученной горючей смеси, а степень инжекции увеличится незначительно. Через отверстие больше 2-х мм облегчается проникновение через него взрывной волны, которая достигает резинотканевых рукавов и рвет их на части.

В резаке Р3-ФЛЦ реализовано техническое решение, защищенное патентом Украины [4], у которого необходимый для резки металлов больших толщин расход подогревающего кислорода обеспечивается не увеличением диаметра рабочего отверстия инжектора, а увеличением количества рабочих отверстий малого диаметра.

Величина разрежения в канале горючего газа напрямую зависит от суммарного периметра инжектирующих струй и не зависит от площади поперечного сечения этих струй. Отсюда следует, что у нескольких отверстий малого диаметра, равновеликих по площади поперечного сечения одному отверстию большого диаметра, суммарный периметр рабочих отверстий больше, чем периметр одного отверстия большого диаметра. Площадь контакта инжектирующих струй подогрева-

ющего кислорода и инжектируемых потоков горючего газа увеличивается пропорционально квадратному корню от количества отверстий и степень инжекции растет.

Через сетку отверстий малого диаметра проникновение взрывной волны затруднено и это повышает безопасность работ.

6. В стандартных резаках используются вентили режущего и подогревающего кислорода, и горючего газа, построенные на использовании винтовой пары: шпиндель и корпус вентиля. При вращении барашка, жестко закрепленного на хвостовике шпинделя, последний получает осевое перемещение, и его коническая часть запирает седло корпуса вентиля.

Вследствие малого диаметра резьбы, равного 8 или 10 мм, и шага резьбы 1 или 1,25 мм для полного запирания вентиля необходимо совершать несколько оборотов шпинделя.

У резака Р3-ФЛЦ диаметр седла корпуса вентиля режущего кислорода равен 8 мм и описанная выше схема нежелательна:

- для полного запирания шпиндель должен совершать несколько оборотов. Это слишком долго и недопустимо при возникновении обратного удара пламени;
- коническая часть шпинделя запирает седло, совмещая поступательное и вращательное движение, что увеличивает взаимный износ седла и запорного тела;
- длина линии контакта седла и запорного тела велика и необходимо прилагать большое усилие при запирании вентиля, которого не всегда хватает.

В вентиле режущего кислорода резака Р3-ФЛЦ, защищенном патентом [5], использован плавающий шток с коническим участком, запирающим седло. Возвратно–поступательное перемещение штока осуществляется без его вращения. Винтовая пара состоит из барашка и наружной частью корпуса вентиля. Такое исполнение винтовой пары позволило применить резьбу с наружным диаметром 24 мм и шагом 3,5 мм. Такая резьба позволяет надежно запирать седло, не применяя значительных усилий, и полностью открывать вентиль за один оборот барашка.

Плавание штока относительно барашка компенсирует зазоры в винтовой паре и неточность изготовления деталей. Вентиль с плавающим штоком прост по конструкции, долговечен и удобен в эксплуатации.

7. Вентили подогревающего кислорода и горючего газа также оригинальны. Винтовая пара, обеспечивающая возвратно–поступательное перемещение запорного тела, образована сальниковой гайкой и шпинделем. Такое исполнение вентиля упрощает его конструкцию, повышает долговечность и улучшает удобство при эксплуатации.

8. По желанию заказчика в резаке Р3-ФЛЦ предусмотрена его поставка с рычажным клапаном (без фиксации рычага или с его фиксацией) вместо вентиля режущего кислорода с плавающим штоком [6].

Новые технические решения, рассмотренные выше, позволили создать простой и надежный резак Р3-ФЛЦ, способный стабильно работать в тяжелых условиях кислородной резки по пригару и окалине заготовок толщиной до 500 мм, показывая при этом высокую производительность и экономичность.

В газокислородном резаке специального назначения Р3-ФЛЦ использован инжекторный принцип образования горючей смеси, при котором подогревающий кислород, истекая из рабочего отверстия инжектора в смесительную камеру под большим давлением, увлекает за собой горючий газ, имеющий меньшее давление, там перемешивается сначала за счет разницы скоростей, затем за счет торможения в диффузоре. Инжекторный принцип выбран потому, что он гарантирует максимальную температуру пламени, что важно при кислородной резке по пригару и окалине.

Порядок работы резака Р3-ФЛЦ мало отличается от порядка работы резака Р3Ш и подробно описан в статье [3].

Чертеж газокислородного инжекторного резака Р3-ФЛЦ представлен на *рис. 1*. Он состоит из трех узлов: наконечника 1, ствола 2 и ниппельного соединения 3.

Маркировка Р3-ФЛЦ предполагает использование ствола с вентилем для режущего кислорода. Если используется ствол с рычажным клапаном для режущего кислорода, то резак маркируется как ФЛЦ-РК, а если на рычаге клапана для режущего кислорода предусмотрен фиксатор положения его ручки, то резак маркируется как ФЛЦ-РКФ.

Наконечник соединен со стволом с помощью накидных гаек М16х1,5 и М20х1,5. Ниппельное соединение обеспечивает связь резака с источниками кислорода и горючего газа, причем на ниппели надевают резинотканевые рукава Ду9, а накидными гайками М16х1,5 и М16х1,5 LH осуществляют подключение резака к системам газопитания.

Наконечник резака Р3-ФЛЦ (*рис. 2*) состоит из головки в сборе 1, к торцевой задней поверхности головки которого припаяны трубки для подвода режущего кислорода 6 и горючей смеси 7. К противоположной

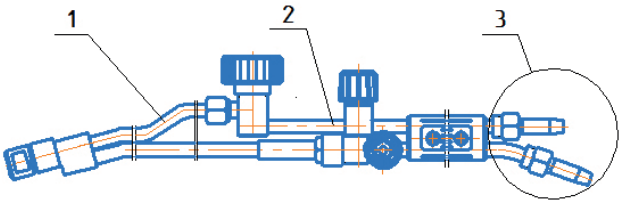


Рис. 1. Газокислородный инжекторный резак Р3-ФЛЦ

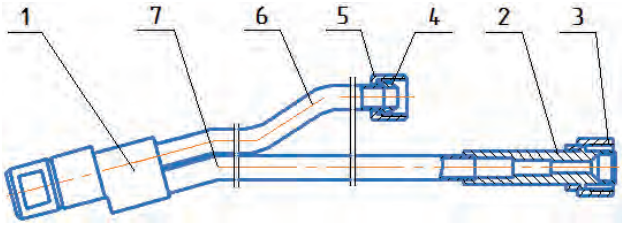


Рис. 2. Наконечник резака Р3-ФЛЦ

стороне трубки 6 припаяна линза 4, удерживающая на трубке накидную гайку 5. Линза 4 и накидная гайка 5 предназначены для крепления наконечника к стволу. К другому концу трубки 7 припаяна смесительная камера 2, удерживающая накидную гайку 3, предназначенную также для крепления наконечника к стволу.

Головка в сборе (*рис. 3*) включает в себя корпус 1, в которую коаксиально вкручены мундштуки внутренний 2 и наружный 3, полость между которыми состоит из шлицевого разгонного и кольцевого выходного участков. В корпусе 1 перпендикулярно к каналу для подвода горючей смеси, пересекаясь с ним, выполнено технологическое отверстие, закрытое снаружи заглушкой 4, а изнутри соединяющее канал для подвода горючей смеси с коллектором для перераспределения потоков этой смеси.

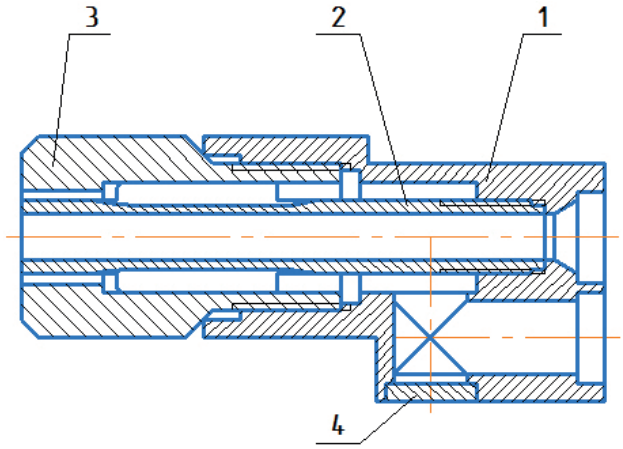


Рис. 3. Головка в сборе резака Р3-ФЛЦ

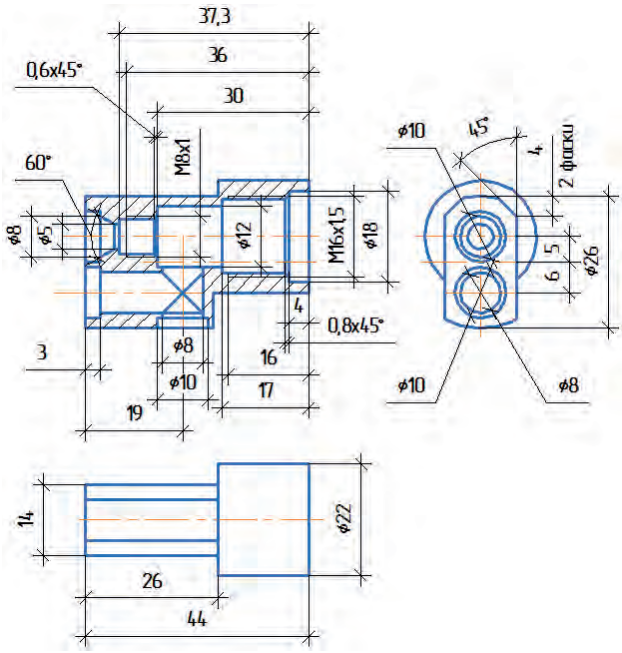


Рис. 4. Корпус резака Р3-ФЛЦ

Резак укомплектован одним наружным мундштуком (№ 1) и тремя внутренними мундштуками (№ 1, № 2 и № 3), технические характеристики которых приведены в *табл. 1*.

Чертежи деталей резака, имеющих расчетные каналы, представлены на *рис. 4–7* и *рис. 9*.

Базовым узлом ствола в сборе резака Р3-ФЛЦ (*рис. 8*) является каркас ствола 18, относительно которого базированы все остальные детали ствола.

В корпус вентиля режущего кислорода свободно вставлен шток 3, имеющий две кольцевые проточки, в которых расположены уплотнительное кольцо 7 и скоба 2. Осевое перемещение штока 3 ограничено с одной стороны седлом корпуса вентиля, с другой – сальниковой гайкой 4, вкрученной по резьбе в корпус вентиля.

На наружную резьбу корпуса вентиля накручен барашек 5, который при вращении обеспечивает осевое перемещение штока, открывая или закрывая вен-

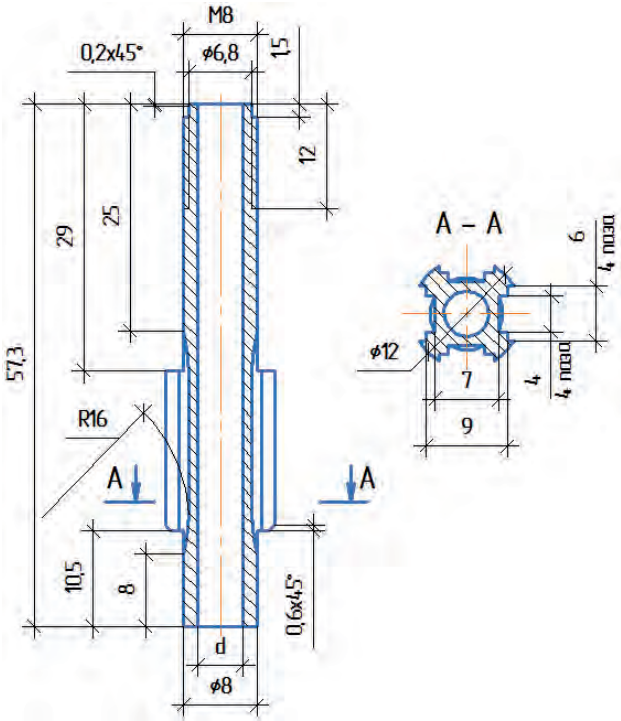


Рис. 5. Мундштук внутренний

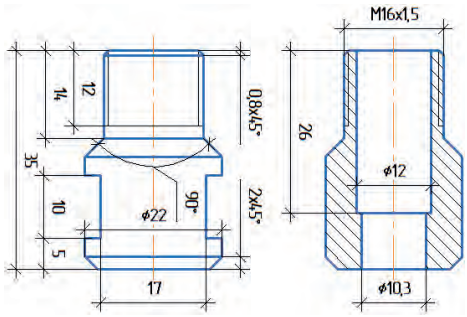


Рис. 6. Мундштук наружный

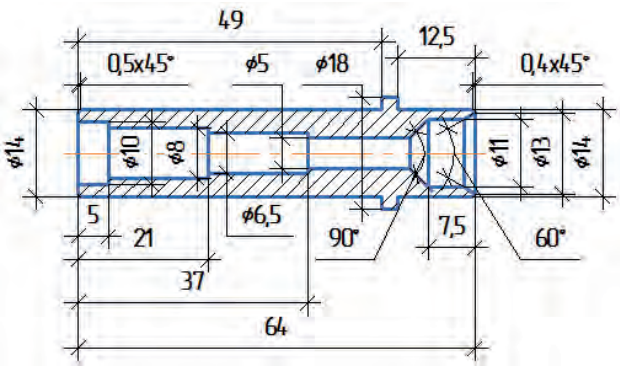


Рис. 7. Смесительная камера резака Р3-ФЛЦ

тиль. Барашек 5 расположен между сальниковой гайкой 4 и скобой 2. На наружную поверхность барашка по резьбе накручен маховик 6 до упора, выбирая все люфты, и в процессе сборки положение маховика зафиксировано гужоном 1.

В корпус вентиля подогревающего кислорода по резьбе вкручена сальниковая гайка 12. Герметичность резьбового соединения обеспечивает уплотнительное кольцо 13. По внутренней резьбе в сальниковую гайку вкручен шпиндель 11, в кольцевой проточке которого расположено уплотнительное кольцо 8, обеспечивающее герметичность резьбового соединения. На конический хвостовик шпинделя надет барашек 10, зафиксированный гайкой М5, прикрытой синим колпачком.

В корпус вентиля горючего газа по резьбе вкручена сальниковая гайка 16. Герметичность резьбового соединения обеспечивает уплотнительное кольцо 14. По внутренней резьбе в сальниковую гайку вкручен шпиндель 15, в кольцевой проточке которого расположено уплотнительное кольцо 8, обеспечивающее герметичность резьбового соединения. На конический хвостовик шпинделя надет барашек 10, зафиксированный гайкой М5, прикрытой красным колпачком.

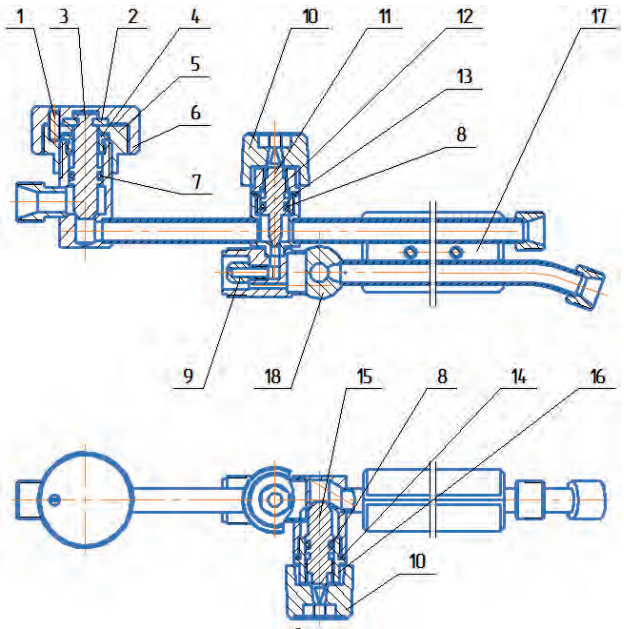


Рис. 8. Ствол в сборе резака Р3-ФЛЦ

В главный корпус каркаса ствола со стороны наконечника по резьбе вкручен инжектор 9. На газоподводящих трубках каркаса ствола закреплены накладки рукоятки 17 с помощью двух винтов с гайками М4 и одного шурупа.

Каркас ствола (*рис. 10*) – это корпуса вентилей и присоединительные штуцера, расположенные определенным образом и соединенные пайкой между собой трубками для подвода рабочих газов.

К главному корпусу 3 перпендикулярно к его продольной оси и под углом 90° друг к другу припаяны корпуса вентилей подогревающего кислорода 4 и горючего газа 5. Параллельно продольной оси главного корпуса к корпусу вентиля подогревающего кислорода припаяна трубка для подвода кислорода 8 с кислородным штуцером 6, а к корпусу вентиля горючего газа припаяна трубка для подвода горючего газа со штуцером 7.

Корпуса вентилей подогревающего кислорода 4 и режущего кислорода 2 соединяет трубка для подвода режущего кислорода 10. С другой стороны от этой трубки к корпусу вентиля режущего кислорода припаян штуцер 1, соединяющий ствол с наконечником.

Ниппельное соединение резака Р3-ФЛЦ взаимозаменяемо с аналогичным узлом резаков, рассматриваемых ранее. Накидные гайки 1 (М16х1,5) и 2 (М16х1,5 LH) заимствованы у этих резаков. Конструкция ниппеля 3 оригинальная. Отличие заключается в увеличении диаметра проходного канала до 8 мм.

Фотография общего вида резака Р3-ФЛЦ представлена на *рис. 11*.

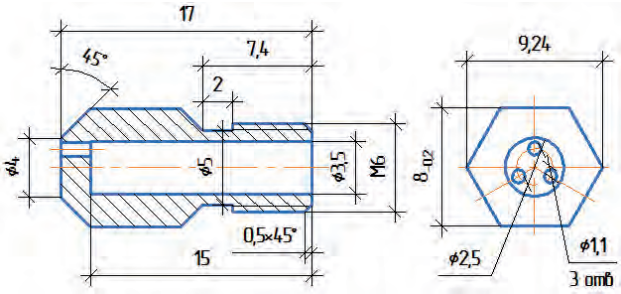


Рис. 9. Инжектор резака Р3-ФЛЦ

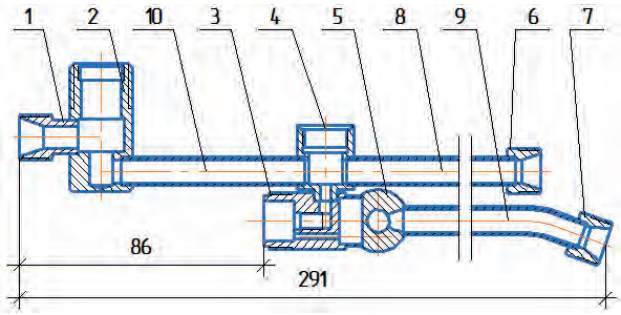


Рис. 10. Каркас ствола резака Р3-ФЛЦ

Рис. 11. Газокислородный резак Р3-ФЛЦ

Рис. 12. Дружковский машзавод. Процесс резки блюмса толщиной 400 мм

Рис. 13. Днепротяжмаш. Процесс резки прибылей среднего литья

Рис. 14. Днепротяжмаш. Резка прибыли чаши шлаковоза

Рис. 15. Обсуждение резака Р3-ФЛЦ – после резки прибыли чаши шлаковоза

Процесс кислородной резки блюмса на Дружковском машзаводе показан на *рис. 12*.

На Днепротяжмаше налажен процесс кислородной резки прибылей литья, некоторые эпизоды показаны на *рис. 13–15*.

Кислородная резка колоны пресса диаметром 800 мм на НКМЗ в КПЦ-2 и поверхность реза представлены на *рис. 16, 17*. Резка выводных планок ЭШС в термическом цехе НКМЗ показана на *рис. 18*.

Примеры кислородной резки прибылей крупного литья различного сечения в обрубном цехе НКМЗ собраны на *рис. 19–21*.

Процесс резки овальной прибыли сечением 1200х600 мм в ФЛЦ-2 на НКМЗ представлен на *рис. 22–24*.

Рис. 16. НКМЗ. КПЦ-2. Резка колоны пресса усилием 10000 т резаком Р3-ФЛЦ

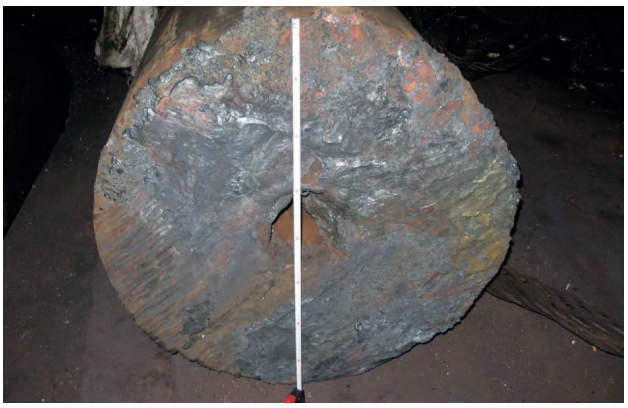


Рис. 17. НКМЗ. КПЦ-2. Поверхность реза колоны пресса

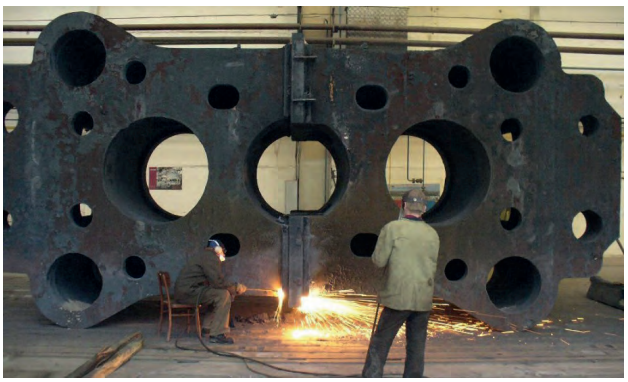


Рис. 18. НКМЗ. Термический цех. Резка выводных планок ЭШС 350 мм

Рис. 19. НКМЗ. ФЛЦ-2. Резка прибыли литья диаметром 550 мм

Рис. 20. НКМЗ. ФЛЦ-2. Резка прибыли литья диаметром 700 мм

Рис. 21. Удаление пригара по линии реза прибыли толщиной 1400 мм

Рис. 22. НКМЗ. ФЛЦ-2. Процесс резки овальной прибыли 1200х600 мм

Рис. 23. НКМЗ. ФЛЦ-2. Резка прибыли 1200х600 мм и полость реза

Рис. 24. НКМЗ. ФЛЦ-2. Подприбыльный остаток сечением 1200х600 мм

Литература

1. Патент 29654 UA, МПК B 23 K 7/00. Газокислородный резак. / Ю.Н. Лысе-нко, В.М. Литвинов, С.А. Чумак, Е.К. Цвентух, С.Л. Василенко, О.И. Коровченко, С.Г. Красильников. – № u200709167, заявл. 10.08.2007, опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.

2. Литвинов В.М., Лысенко Ю.Н. Газокислородный резак Р1Ш-Сп для ра-боты в труднодоступных местах. // Сварщик в России. – 2020. - № 5. – С. 16 – 20.

3. Литвинов В.М., Лысенко Ю.Н. Резак Р3Ш для газокислородной резки прибылей литья и лома толщиной до 300 мм. // Сварщик в России. – 2020. - № 6. – С. 18-21.

4. Патент 15678 UA, МПК F 23 D 14/02. Резак для ручной газокислородной резки металлов. / В.Н. Литвинов, С.Г. Красильников, С.А. Чумак, С.Л. Василенко, О.И. Коровченко, Е.К. Цвентух. - № u200600039, заявл. 03.01.2006, опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

5. Патент 141424 UA, МПК F23D 14/00. Ручной резак для кислородной резки металлов больших толщин. / В.М. Литвинов, В.А. Белинский, А.Е. Мерз-ляков, Ю.Н. Лысенко, В.А. Пантелеймонов, С.М. Косинов, А.В. Марчен-ко, Т.Б. Золотопупова, В.В. Шевченко. - № u201909110, зявл.02.08.2019, опубл. 10.04.2020, Бюл. № 7.

6. Литвинов В.М., Лысенко Ю.Н. Кислородная резка и внепечной нагрев в тяжелом машиностроении. – Киев: НТК «ИЭС им. Е.О. Патона» НАНУ, 2017. – 368 с.

#1304

Восстановление сваркой уникальных базовых деталей промышленного оборудования

В промышленном комплексе Украины и России более 70 % уникального металлургического, горно-обогатительного, кузнечно-прессового и другого технологического оборудования изготовлено в 1980 гг. XX столетия и эксплуатируется более 35 лет. Исчерпание назначенного срока службы, интенсивная эксплуатация, конструкторские и монтажные ошибки приводят к закономерному выходу из строя базовых деталей этих машин. Основной вид отказа – усталостное разрушение в наиболее нагруженных и несущих узлах со сложными сечениями и повышенной концентрацией напряжений. Общепризнано, что поддержание работоспособности металлоконструкций представляется возможным на основе использования сварочных технологий.

Как правило, базовые детали такого оборудования, работающего в условиях динамического нагружения, изготавливаются из литых углеродистых сталей (0,3-0,5% С) в литом или литосварном вариантах, из поковок в кованом или ковано-сварном вариантах. Это могут быть сварные металлоконструкции из толстолистового низколегированного проката повышенной или высокой прочности. Сложные базовые детали редукторов отливаются из конструкционных серых чугунов.

На основании нашего многолетнего опыта и принимая во внимание такой спектр применяемых конструкционных материалов, характеризующихся ограниченной или неудовлетворительной свариваемостью, накопленные необратимые структурные и механические макро и микроповреждения металла, связи в закреплениях, толщины стенок (40-350 мм), пространственные положения мест разрушения, утверждаем, что использование технологий изготовительной сварки в ремонтных целях не результативно и снижает шансы на восстановление работоспособности в проектном режиме хоть на какой-то прогнозируемый период времени.

Институт электросварки предлагает научно-обоснованные разработки, направленные на продление ресурса базовых деталей уникального оборудования. Ученые и специалисты Института оказывают услуги в разработке технических решений и технологических процессов в ремонтной сварке.

В рамках оказываемых услуг Институт командирует своих специалистов для оценки фактического состояния ремонтируемого объекта, установления причин отказа, осуществления неразрушающего контроля, отбора проб металла для комплексных исследований. Выполняет анализ состояния металла и конструкции в целом, дает заключение о ремонтопригодности базовой детали и только после этого разрабатывает технологический процесс его восстановления. Разработка технологических рекомендаций и процесса ремонтной сварки базируется на моделировании технических приемов выполнения восстановительных работ. При этом производится выбор наиболее оптимального, для каждого конкретного изделия и условий выполнения работ, способа удаления дефектов и формирования кромок сварного соединения, а также процесса сварки, сварочных материалов и метода неразрушающего контроля ремонтных соединений. С учетом этого разрабатывается технологический процесс проведения ремонта, производится обучение рабочего персонала и формируются специализированные ремонтные бригады. После выполнения ремонтных работ дается заключение о техническом состоянии восстановленной конструкции и рекомендации по ее обследованию при последующей эксплуатации. В процессе восстановления конструкции специалистами Института электросварки осуществляется авторский надзор за ходом выполнения ремонтных работ.

Затраты на восстановление базовых деталей не превышает 35% от их первоначальной стоимости. После ремонта оборудование может эксплуатироваться в проектном режиме.

Применение механизированной сварки для восстановления работоспособности деталей из чугунного литья

Пример 1. Ремонт средней части чугунного корпуса редуктора А-1100 главного привода эскалатора ЭМ-5.

- Габаритные размеры 2400х700х700 мм. Масса 2 т. Материал – чугун СЧ-20.
- Толщина стенок в сечениях, подлежащих сварке, 40-80 мм.

Причина поломки – ошибка при монтаже, нештатная ситуация.

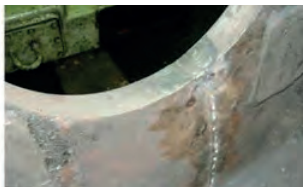
Принятое решение – ремонтная сварка по принципу изготовления лито-сварой конструкции, длина швов – более 5 м.

Пример 2. Ремонт основания редуктора главного привода эскалатора ЭТ30.

- Габаритные размеры 2700х400х400 мм. Масса 1,5 т. Материал – чугун СЧ-20.
- Толщина стенки 20-60 мм.

Причина поломки – раскрытие дефекта литья – рыхлости в результате нештатной ситуации.

Принятое решение – наплавка стенки в зоне рыхлости и заварка трещины, длина швов – более 3 м.



Пример 3. Ремонт крышки и корпуса редуктора

главного привода эскалатора ЭТ-4Б.

- Габаритные размеры 2700х400х400 мм. Масса 1,5 т. Материал – чугун СЧ-20.
- Толщина стенок 20-60 мм.

Причина поломки – трещины в посадочном месте подшипника, нештатная ситуация.

Принятое решение – заварка трещин, длина швов – более 3 м.

Пример 4. Ремонт чугунного корпуса редуктора малого привода эскалатора, используемого при экстренном или аварийном торможении.

- Габаритные размеры 1000х250 мм. Масса 1,5 т. Материал – чугун СЧ-20.
- Толщина стенок 20 мм.

Причина поломки – эксплуатационное разрушение контактной поверхности корпуса.

Принятое решение – замена стенки и утраченных элементов фланца на стальные вставки, длина швов – более 1,5 м.

Пример 5. Ремонт зубчатого колеса малого привода эскалатора.

- Габаритные размеры 1000х250 мм. Масса 1,5 т. Материал – чугун СЧ-20.
- Толщина 25–30 мм.

Причина поломки – трещина в ступице, нештатная ситуация.

Принятое решение – заварка трещин, длина швов – более 1 м.

Пример 6. Восстановление работоспособности чугунных крышек редукторов ЦЗН-710 вагоноопрокидывателей типа ВРС.

- Размеры крышки 2000х700х600 мм, масса более 0,5 т, кол-во – 3 шт.

Причина поломки – трещины эксплуатационного характера в зоне посадочных мест подшипников среднего вала, конструктивный недостаток, дефекты литья.

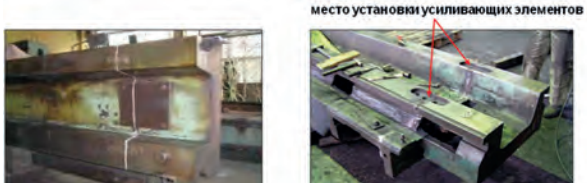
Принятое решение – заварка трещин и применение усиливающей двухслойной наплавки, длина швов более 5 м.

Пример 7. Ремонт чугунной траверсы токарно-карусельного станка модели 1Л532.

- Размеры траверсы составляет 8000х1000х250 мм, толщина стенки 50 мм, масса – около 5 т, СЧ20.

Причина поломки – трещина по всему сечению траверсы из-за нештатной ситуации.

Принятое решение – заварка трещин, применение усиливающих элементов, длина швов более 3 м.



Пример 8. Восстановление шеек чугунных прокатных валков чистовой клети стана 1700 на ПАО «ММК им. Ильича».

- Валки чистовой рабочей клети стана 1700 массой 6,7 т, изготовлены из специального серого чугуна с пластинчатым графитом. Гарантийный срок эксплуатации 125 тыс. т. металла.

Причина поломки – повреждение шеек валков, разрушенной внутренней обоймой подшипника до исчерпания ресурса «бочки» валков.

Принятое решение механическое удаление поврежденного слоя, наплавка. Прокатано 90 тыс. т металла до исчерпания ресурса «бочки».

Пример 9. Реставрация чугунного литья архитектурно-декоративных элементов перильного ограждения моста Коцебу в г. Одесса.

www.stc-paton.com

#1305

Сварка и термическая обработка сварных швов

И.В. Щудлак, директор ДП «ГСИ-Укрнефтегазстрой» (Одесса), **В.Г. Левицкий,** IWE, главный сварщик, ДП «ГСИ-Укрнефтегазстрой», ЧАО «ИСРЗ» (Черноморск, Одесская обл.)

Статья посвящается Дмитрию Константиновичу Чернову (1838-1921 гг.), в 2021 г. исполняется 100 лет со дня смерти ученого, открывателю теории термической обработки сталей и диаграммы Fe-C (железо-углерод), и его продолжателю Петру Мстиславовичу Королькову (1931 г.), в 2021 г. исполняется 90-то лет со дня его рождения, бывшему заведующему лабораторией термической обработки сварных соединений в Минмонтажспецстрое.

История термической обработки металлов уходит корнями в древние времена. Так, нагревая металл докрасна, а затем быстро охлаждая его в воде или другой жидкости, металл приобретал большую твердость.

В 1868 г. ученый Дмитрий Константинович Чернов определил и объяснил, что происходит внутри стали при ее нагревании и охлаждении.

Д.К. Чернов впервые определил и обосновал существование критических точек, соответствующих определенным температурам структурных превращений стали, ведущих к изменению структуры и свойств. Эти критические температуры, зависящие от содержания углерода в сталях, определенные Д.К. Черновым визуально по цветам каления поковок, были названы им – точка «а» (темно-вишневого каления), точка «b» (красное, не блестящее каление) и т.д.

Д.К. Чернов впервые графически изобразил влияние углерода на положение критических точек, воспроизведя при этом очертания важнейших линий Fe-C диаграммы.

Одним из основных технологических процессов при монтаже и ремонте сварных соединений трубопроводов и сосудов давления в различных отраслях промышленности (нефтяной и газовой, нефтеперерабатывающей, нефтехимической отраслях, в тепловой энергетике и др.) является местная (иногда объемная) термическая обработка сварных соединений, направленная на снижение содержания водорода и уровня сварочных напряжений, на улучшение структуры, механических и специальных свойств (коррозионной стойкости, жаропрочности, хладостойкости и т.п.) сварных соединений.

В строительно-монтажных и ремонтных условиях для сварных соединений технологических трубопроводов и оборудования применяются следующие виды термообработки:

- высокий отпуск, нормализация, термический отдых, стабилизирующий отжиг, аустенизация (*таблица*).

Процесс термообработки состоит из следующих этапов:

- контролируемый нагрев до температуры (в зависимости от марок сталей):
- 560°С / 750°С / 850°С / 1130 °С (*табл.*);
- скорость нагрева зависит от толщины стенки: ≤ 200 °С/час - при толщине стенки 20-60 мм и ≤ 300°С/час при толщине стенки 10-20 мм;
- выдержка при температуре 720-750 °С в течении 2,0-3,0 часов;
- охлаждение под слоем изоляции до 300°С.

При выполнении сварки и последующей термической обработки сварочных швов емкостей, элементов печей пиролиза, трубопроводов, а также других изделий в монтажных условиях, в соответствии с требованиями технологии сварки, используются передвижные установки для местной термической обработки сварных швов.

Требования к качеству термической обработки возрастают с каждым годом в связи с применением новых марок сталей, увеличением диаметров

Таблица. Типовые режимы местной термической обработки сварных соединений [1]

Свариваемая сталь	Вид термообработки	Толщина стали, мм	Температура, °С	Скорость нагрева, °С/ч	Выдержка, час	Характер охлаждения
Сталь 20	Высокий отпуск	≥ 36,0	560-590	≤ 300	1,0-2,0	Под слоем изоляции
09Г2С	Высокий отпуск	≥ 30,0	560-590	≤ 300	1,0-2,0	Под слоем изоляции
15Х5М / 12Х1МФ	Высокий отпуск	≥10,0	720-750	≤ 200	2,0-3,0	Под слоем изоляции
08Х18Н10Т	Аустенизация	≥10,0	1080-1130	≤ 400	1,5-2,0	На воздухе
12Х18Н9Т	Стабилизирующий отжиг	≥ 20 ,0	850-870	≤ 400	2,0-3,0	На воздухе

VAS 82/6

STANDARD EUROPA 82/6

и толщины стенок трубопроводов и сосудов давления, ростом эксплуатационных параметров рабочей среды (увеличение давления, температуры, возникновение коррозионных трещин и т.д.). Все это требует применения новых, более сложных видов оборудования, материалов и приборов для термообработки, что в свою очередь повышает требования к квалификации персонала, занятого в процессе термообработки сварных соединений, в первую очередь операторов-термистов, работающих на передвижных термических установках.

Для выполнения сварочных работ из материалов, требующих последующую термическую обработку и труб марок 15Х5М (12Х1МФ) с предварительным, сопутствующим подогревом, ДП «ГСИ-Укрнефтегазстрой» приобрело, на тендерной основе, две передвижные шестиканальные установки WELDOTHERM®: VAS 82/6 и STANDARD EUROPA 82/6. Установки поставлялись фирмой ООО «Велдотерм-Украина», которая является филиалом германской компании Weldotherm® в Украине. При поставке установок специалисты ООО «Велдотерм-Украина» провели обучение операторов-термистов работе на установках прямо на территории нашего предприятия.

Для круглосуточного выполнения термической обработки сварных соединений были обучены и аттестованы два руководителя ИТР, отвечающих за качественное проведение ТО, и 22 оператора-термиста. За время эксплуатации установок для местной ТО (с 2003 по 2019 гг.) ДП «ГСИ-Укрнефтегазстрой» были проведены ТО сварных соединений и более 25 000 стыков трубопроводов различных диаметров, начиная от 50 мм и до 1000 мм. Работы проводились на: Одесском НПЗ, Херсонском НПЗ, ООО «Карпатнефтехим», Одесском цементном заводе, Красноперекопском содовом заводе, на заводе «ТИТАН» (г. Армянск) и др. промышленных предприятиях Украины.

Благодаря тому, что в оборудовании компании Weldotherm® используются простые, но в то же время современные высококачественные приборы контроля и регистрации в сочетании с наилучшими немецкими силовыми агрегатами, делает установки Weldotherm надёжным, высокоточным и очень удобным в использовании, как в стационарных условиях (внутрицеховых), так и в тяжёлых монтажных условиях.

Литература

1. Корольков П.М. Термическая обработка сварных соединений. – Киев: Экотехнология, 2002. – 176 с.

#1306

Если у Вас возникли вопросы по технологии сварки, организации рабочих мест сварщиков, правильному выбору сварочных материалов и оборудования, Вы можете отправить письмо в редакцию журнала по адресу: 03150, Киев, а/я 337 или e-mail: demuv@ukr.net, позвонить по тел. +38(044) 205 26 07, м. (050) 331 56 65. На Ваши вопросы ответит кандидат технических наук, Международный инженер-сварщик (IWE) Юрий Владимирович ДЕМЧЕНКО.

Почему, несмотря на то, что высоколегированные стали называются нержавеющими, при определенных условиях они и их сварные соединения подвержены коррозии.

«КАГМАСЛО» и др. (*г. Кагарлык*)

Рассмотрим виды коррозии изделий из нержавеющей стали, а также методы ее защиты.

Точечная коррозия

Точечная коррозия – это вид крайне узко локализованной коррозии, приводящей к образованию небольших отверстий в металле. Движущей силой точечной коррозии служит недостаток кислорода в небольшой области. Эта зона становится анодной, в то время как зона избытка кислорода становится катодной, вызывая узко локализованную гальваническую коррозию. Коррозия этого типа имеет свойство проникать в глубь металла. Ограниченная диффузия ионов сохраняет местный недостаток кислорода. Этот вид коррозии весьма коварен, поскольку он не причиняет значительного вреда поверхности металла, при этом глубоко повреждая его структуру. Питтинги на поверхности металла зачастую скрыты продуктами коррозии.

Развитие питтинга начинается с небольшого поверхностного дефекта: царапины, местного изменения состава или повреждения защитного покрытия. Полированные поверхности демонстрируют более высокую устойчивость к точечной коррозии, если полирование было выполнено правильно. Некачественная полировка может ускорить развитие коррозии.

Рис. 1. Точечная коррозия

Точечной коррозии обычно более всего подвержены те сплавы, коррозионная устойчивость которых обеспечивается поверхностным слоем: нержавеющие стали, никелевые и алюминиевые сплавы. Металлы же, подверженные равномерной коррозии, обычно не страдают от точечной коррозии. Например, обыкновенная углеродистая сталь в морской воде будет равномерно разрушаться под действием коррозии, в то время как на нержавеющей стали будут возникать питтинги. Добавление около 2% молибдена повышает стойкость нержавеющих сталей к точечной коррозии. Присутствие хлоридов (например, в морской воде) значительно повышает образование и рост питтингов через автокаталитический процесс. Стоячая вода также способствует точечной коррозии.

Точечная коррозия является самым распространенным видом коррозийного разрушения нержавеющей стали, приводящий к образованию отверстий в баках, резервуарах и стенках труб. Она встречается в виде небольших в диаметре, но глубоких полостей (питтингов). Их диаметр обычно не превышает 1 мм, но проникновение в глубину металла может быть велико.

В коррозионной реакции в роли анодов выступают питтинги, катодом служит остальная поверхность. Старт образованию питтинга дает повреждение защитной оксидной пленки (пассивного слоя) на поверхности стали. Обычно эти повреждения представляют собой включения в сталь посторонних примесей, например, таких как сера. Посторонние включения могут приводить к местной нехватке легирующих элементов, тем самым нарушая равномерность защитного оксидного слоя.

Благоприятные условия для точечной коррозии – это умеренно высокая температура, высокая концентрация хлорид-ионов и прочих галогенидов (фторидов, бромидов, йодидов). Кислотные среды также способствуют развитию питтингов, которые сами по себе кислотные.

Кислотность внутри питтинга – это та причина, по которой они, однажды образовавшись, продолжают расти вглубь.

Числовой эквивалент стойкости к точечной коррозии (PREN)

Числовой эквивалент стойкости к точечной коррозии (PREN) – это полезный справочный показатель, отражающий склонность определенных

нержавеющих сталей к образованию питтингов. Его следует использовать только в качестве ориентира, а не как гарантированный способ предсказания коррозионной устойчивости в любых обстоятельствах. Было обнаружено, что сплавы, имеющие высокую концентрацию азота (N), хрома (Cr) и молибдена (Mo), демонстрируют высокую устойчивость к точечной коррозии. Сравнительная эффективность сочетания этих элементов выражается следующей формулой:

PREN = (%Cr) + (3,3 x %Mo) + (16 x %N)

(обращаем внимание, что в некоторых вариантах используется 32 x %N)

Чем выше значение показателя PREN, тем выше устойчивость к точечной коррозии. Типичные значения показателя PREN таковы:

Марка стали	**PREN**
430	16
444	25
304	19
304LN	21
316	26
316LN	27,5
904L	36
Zeron 100	41
SAF 2507	42

Щелевая коррозия – это второй по распространенности вид повреждения нержавеющих сталей после точечной коррозии. Щелевая коррозия возникает в тех местах, где между стальным изделием и другим предметом образуется небольшой зазор. В роли этого второго предмета обычно выступает изолирующий материал: уплотнитель или резиновая прокладка, хотя это может быть и металлический предмет. Геометрия зазора – решающий фактор начала развития щелевой коррозии. Зазор должен быть достаточно большим для проникновения химически агрессивной жидкости, но не настолько большим, чтобы материал мог вымываться из зазора течением или конвекцией жидкости.

Механизм образования щелевой коррозии хорошо известен. Первая стадия – это накопление в зазоре агрессивных ионов (таких как хлорид-ионы) и вытеснение кислорода из раствора внутри зазора. Это приводит к формированию анода в зазоре, а материал вне зазора становится катодом. Коррозия образуется в зазоре по двум причинам: во-первых, пассивная пленка разрушается из-за вытеснения кислорода, во-вторых, коррозионные реакции в анодной зоне вызывают изменение кислотности среды (со временем кислотность в зазоре возрастает).

Правильное проектирование – один из лучших способов избежать щелевой коррозии. Выбор материалов сравним с ним по важности. Щелевая коррозия наиболее интенсивна в кислотных условиях, в хлоридсодержащих нетекучих средах. Катодная защита может снизить уровень как точечной, так и щелевой коррозии, повышая щелочность анодного участка. Повышение текучести среды также уменьшит последствия обеих форм местной коррозии.

Пассивирование нержавеющей стали

Для условий, где риск возникновения точечной коррозии является критичным фактором, общепринятой практикой для придания большей равномерности поверхности металла служит пассивирование.

Оно выполняется путем нанесения на поверхность окислителей, которые растворяют железо, но не оксиды легирующих элементов. Стандарт ASTM A967-1 в качестве простого и относительно безопасного способа предлагает применять 8%-ю лимонную кислоту в течение 3 ч при комнатной температуре. Пассивирование проходит быстрее при использовании 20%-ой азотной кислоты в течение 30 мин. при 55°С. Для улучшения процесса пассивации к азотной кислоте также может быть добавлен 2%-й дихромат натрия, но это значительно снижает безопасность. Для пассивации нержавеющей стали также может быть использована фтороводородная кислота, но этот процесс очень опасен. В фармацевтической индустрии для пассивации иногда используется особо чистый раствор фосфорной кислоты. В кислотах, используемых для пассивирования, должны практически отсутствовать хлорид- или фторид-ионы, иначе может возникнуть точечная коррозия стали.

Скорость процесса пассивации с использованием как азотной, так и лимонной кислоты можно повысить путем увеличения температуры. Пассивация может длиться от нескольких минут до нескольких дней в зависимости от марок обрабатываемой стали.

Стандарты ASTM – это лишь общие рекомендации. Химикаты, условия и время воздействия должны подбираться в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации, включая характер коррозионной среды.

Проверка эффективности пассивирования может быть электрохимической, с использованием кривых поляризации и карты потенциалов, или химической, путем проведения анализа на сульфаты меди либо ферроцианиды. Электрохимические методы более совершенны, они выигрывают в точности и предоставляют больше информации.

Там, где положительный участок кривой вертикален или близок к вертикали, находится пассивная область, т.е. на поверхности присутствует высокопрочная тонкая пленка хрома. Диапазон напряжений, в котором пленка остается стабильной, является показателем ее качества.

Сенсибилизация нержавеющих сталей и коррозия сварных швов

Сенсибилизация нержавеющей стали – это вид межкристаллитной (межзеренной) коррозии, который приводит к выпадению кристаллов стали с поверхности металла, как показано на *рис. 2*. Если это явление происходит в зоне сварного соединения, его часто называют коррозией сварного шва. Если сенсибилизация происходит в пределах

Рис. 2. Межкристаллитная (межзеренная) коррозия

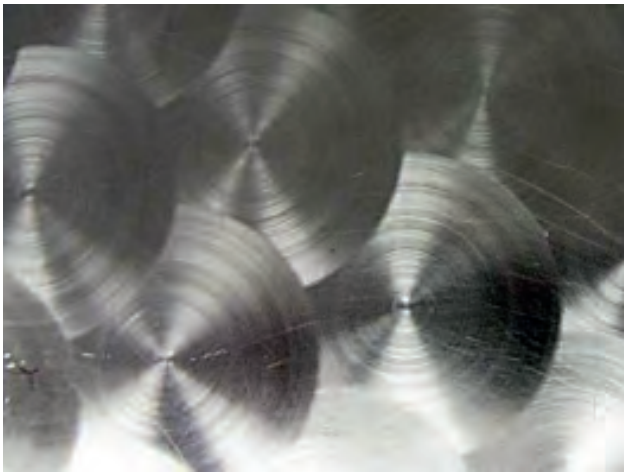


Рис. 3. Отфрезерованная поверхность нержавеющей стали

узкой полосы, это называется ножевой коррозией: в прошлом нагретая область лезвия стального ножа вблизи рукоятки имела свойство терять кристаллы, оставляя чернеющие выемки. Нержавеющая сталь 316 может сенсибилизироваться при нагревании до температур в диапазоне 480-900°С. При более высоких температурах сенсибилизация может начаться по прошествии всего лишь 3-х мин. Если температура ниже, потребуется более часа.

Сенсибилизация вызывает коррозию, т.к. межзеренные границы теряют хром из-за образования интерметаллических карбидов. Шесть атомов углерода изымают из сплава 23 атома хрома. Это может привести к снижению местного содержания хрома с 18 до 12%. Когда сенсибилизированная нержавеющая сталь встречается с агрессивной средой, центр кристалла становится катодом, а межзеренная граница – очень активным местным анодом. Начальный период развития процесса может затянуться, поскольку разрушение поверхностных кристаллов занимает длительное время. Тем не менее, когда межзеренные связи ослабевают, кристаллы выпадают с поверхности и оставляют черноватые ямки.

Контактная коррозия

Пассивная поверхность нержавеющей стали постоянно преобразуется. Если сталь вступает в контакт с углеродистой или ферритной сталью, частицы могут остаться на поверхности и образовать местные аноды. Образующаяся в результате коррозия выглядит некрасиво. Контакта между этими типами металлов следует избегать. Нужно применять отдельные инструменты для разных типов материалов; рабочие зоны должны быть разделены.

Коррозия и поверхностная обработка нержавеющей стали

Существует много способов обработки поверхности изделий из нержавеющей стали. На *рис. 3* показана отфрезерованная поверхность. Также распространены зачищенные, отшлифованные и полированные поверхности. Обычно выбор способа поверхностной обработки нержавеющей стали основан на внешних предпочтениях архитекторов или конструкторов, но следует также принимать в расчет соображения коррозионной стойкости. В целом, чем более гладкая поверхность стали, тем устойчивей она к коррозии и появлению пятен ржавчины. Шероховатые поверхности склонны к возникновению точечной коррозии в тех условиях, где более гладкие поверхности проявили бы устойчивость. Шероховатые поверхности накапливают загрязнения и требуют большего ухода. Такие марки стали, как 304 или 316, лишь в малой степени устойчивы к образованию пятен ржавчины при использовании в морских условиях или в пищевой промышленности и определенно уязвимы, если изделия имеют шероховатую поверхность.

Уход за нержавеющей сталью

Если нержавеющая сталь должна сохранять хороший внешний вид, не стоит полагать, что она может обходиться без ухода. В городской среде или в морских условиях для поддержания достойного облика требуется регулярное мытье теплой водой с содержанием ПАВ. Обычно интервал между чистками составляет порядка полугода, однако в суровом климате может потребоваться более регулярное мытье. Следует строго избегать очистителей, содержащих такие активные ингредиенты, как хлориды или аммиак. При обнаружении на поверхности стали пятен или ямок следует удалить пятна жесткой губкой. С момента появления питтингов потребуется более регулярный уход.

Коррозия кухонного оборудования из нержавеющей стали

Оборудование на кухне заведения общественного питания, такое как полки или рабочие поверхности из нержавеющей стали, часто изготавливают из сталей группы прочности меньше 316, которые проще поддаются формовке (AISI 304). Промышленные холодильники и посудомоечные машины почти всегда изготовлены из более устойчивых к коррозии сталей 316 или 316L.

Кухонные поверхности из нержавеющей стали могут быстро подвергаться коррозии, если оборудование поступило в некачественном состоянии.

На *рис. 4* продемонстрирован крайний случай точечной коррозии: хлоросодержащий очиститель вызвал коррозию раковины. Более мягкие формы этого вида коррозии возникают, когда в контакт с

Рис. 4. Точечная коррозия раковины

нержавеющей сталью вступает неверно выбранный очиститель или отбеливатель.

Коррозия изделий из нержавеющей стали в фармацевтической промышленности

Многие фармацевтические фабрики работают с соляными растворами и используют нержавеющую сталь 316L. Обычно нержавеющая сталь хорошо справляется с такими условиями, но, если соединения кромок остаются в контакте с соляным раствором, может возникнуть щелевая коррозия, как показано на *рис. 5*.

При стерилизации паром поверхность нержавеющей стали может покрываться рыжеватыми пятнами. Применяемая в фармацевтической промышленности нержавеющая сталь, может также подвергаться точечной коррозии, если технологическая жидкая среда недостаточно текучая. Нетекучие растворы также могут вызывать коррозию шаровых и поворотных клапанов из нержавеющей стали. Дезинфицирующие пары, такие как пары надуксусной кислоты, также могут приводить к поражению нержавеющих сталей. Там, где используются регулируемые насосы, нержавеющая сталь может подвергаться коррозии под воздействием блуждающих токов.

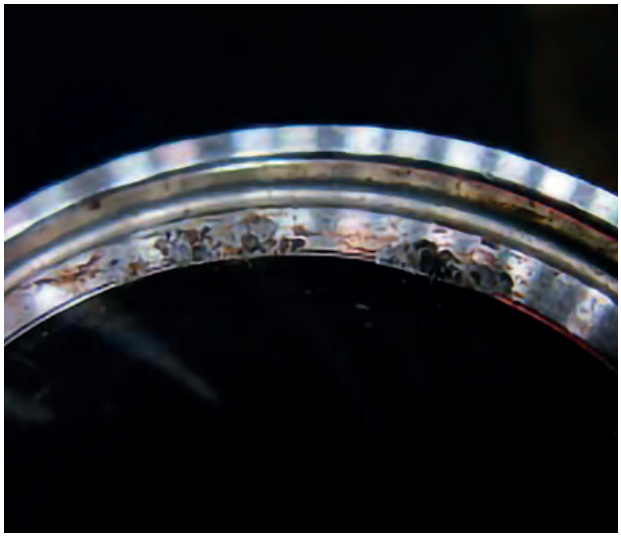


Рис. 5. Щелевая коррозия

Коррозия нержавеющих сталей в пищевой промышленности

На *рис. 6* видна коррозия стального распылителя из молочного цеха, начавшаяся на внутренней стороне и вышедшая наружу. Молочные и прочие продукты часто содержат соль. Если они долго находятся в контакте с нержавеющей сталью, может возникнуть коррозия.

Рис. 6. Коррозия стального распылителя из молочного цеха

Рис. 7. Конвейер в пищевой промышленности

Конвейеры в пищевой промышленности, подобные изображенному на *рис. 7*, могут быстро корродировать, если состояние поверхности неудовлетворительно. Поверхность этого конвейера подвергалась дробеструйной обработке. Зачищенные поверхности на том же предприятии оставались в хорошем состоянии. В мясной промышленности крайне важна стерильность, поэтому зачастую необходимо использовать хлоридсодержащие очистители. После обработки их нужно тщательно удалять с поверхности.

#1307

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

Название книги	Цена (руб.)*
В. М. Литвинов, Ю. Н. Лысенко. **Кислородная резка и внепечной нагрев в тяжелом машиностроении.** 2017. — 368 с.	600
В. И. Лакомский, М. А. Фридман. **Плазменно-дуговая сварка углеродных материалов с металлами.** 2004. — 196 с.	400
А.Н. Корниенко. **История сварки. под ред. акад. Б.Е. Патона.** –2004 г. – 210 с.	700
А. А. Кайдалов. **Электронно-лучевая сварка и смежные технологии.** Издание 2-е, переработанное и дополненное. 2004. — 260 с.	500
В. Я. Кононенко. **Газовая сварка и резка.** 2005. — 208 с.	400
С. Н. Жизняков, З. А. Сидлин. **Ручная дуговая сварка.** Материалы. Оборудование. Технология. 2006. — 368 с.	500
А. Я. Ищенко и др. **Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях.** 2006. — 112 с. с илл.	400
П. М. Корольков. **Термическая обработка сварных соединений.** 3-е изд., перераб. и доп. 2006. — 176 с.	400
А. Е. Анохов, П. М. Корольков. **Сварка и термическая обработка в энергетике.** 2006. — 320 с.	500
Г. И. Лащенко. **Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом.** 2006. — 384 с.	500
А. А. Кайдалов. **Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов.** 2007. — 456 с.	500
П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. **Плазменная наплавка.** 2007. — 292 с.	500
** ***А. Г. Потапьевский.*** **Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах.** 2007. — 192 с.	500
Г. И. Лащенко, Ю. В. Демченко. **Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций.** 2008. — 168 с.	400
Б. Е. Патон, И. И. Заруба и др. **Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги.** 2008. — 248 с.	400
З. А. Сидлин. **Производство электродов для ручной дуговой сварки.** 2009. — 464 с.	600
В. Н. Радзиевский, Г. Г. Ткаченко. **Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении.** 2009. — 400 с.	500
В. Н. Корж, Ю. С. Попиль. **Обработка металлов водородно-кислородным пламенем.** 2010. — 194 с.	400
Нормирование расхода покрытых электродов при ручной дуговой сварке и наплавке. Нормирование расхода сварочных материалов при сварке под флюсом. Справочные пособия. 2008. — 68 – 68 – 40 с.	200
** ***Г. И. Лащенко.*** **Современные технологии сварочного производства.** 2012. — 720 с.	400

* Цены на книги указаны без учета стоимости отправки.

** Продается только в электронной версии.

Тарифы на рекламу в 2021 г.

На внутренних страницах		
Площадь	*Размер, мм*	*Стоимость, руб.**
1 полоса	210×295	**25000**
1/2 полосы	180×125	**13000**
1/4 полосы	88×125	**7000**
На страницах основной обложки		
Страница	*Размер, мм*	*Стоимость, руб.*
1 (первая)	215×185	**50000**
4 (последняя)	210×295 (после обрезки 205×285)	**36000**
2		**33000**
3		**30000**

*(*все цены в руб. с НДС)*

Изготовление оригинал-макета

- 10% стоимости рекламной площади

Статья на правах рекламы

- 1 стр. — 13 000 руб.

Прогрессивная система скидок

Количество подач	2	3	4	5	6
● Скидка	**5%**	**10%**	**13%**	**17%**	**20%**

Требования к оригинал-макетам

Для макетов «под обрез»: формат издания после обрезки 205×285 мм; до обрезки 210×295 мм; внутренние поля для текста и информативных изображений не менее 15 мм. **Файлы принимаются в форматах:** PDF, AI, INDD, TIF, JPG, PSD, EPS, CDR, QXD с прилинкованными изображениями и шрифтами. Изображения должны быть качественными, не менее 300 dpi, цветовая модель CMYK, текст в кривых, если нет шрифтов. Размеры макета должны точно соответствовать указанным редакцией.

Зам. глав. ред., рук. ред., **В. Г. Абрамишвили,** к. ф.-м. н.:
тел./факс: +380 44 200-80-14, моб.: +380 50 413-98-86,
моб.: +380 95 146-06-91
e-mail: welder.kiev@gmail.com
www.welder.stc-paton.com

Подписка-2021 на журнал «Сварщик в России»

Подписной индекс **20994**
в каталоге «Пресса России»

Подписной индекс **E20994**
в каталоге Агентства «Книга-Сервис»

Подписной индекс **K0103**
в каталоге российской прессы
«Почта России» – персональная подписка

На электронную версию журнала можно подписаться в редакции или на сайте:
www.welder.stc-paton.com