

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКО-ПАЙКА РАБОЧИХ КОЛЕС КОМПРЕССОРОВ

Л. МАЙЕРС, ст. инж.-сварщик (Фирма «Dresser-Rand Co.», США),
Г. ЛаФЛАММ, рук. отд. контрактов по сварке (Фирма «PTR-Precision Technologies, Inc.», США)

Описан сварочный процесс, в котором совмещены электронно-лучевая сварка и высокотемпературная пайка, применяемый при изготовлении рабочих колес центробежных компрессоров. Разработаны режимы сварки, определена усталостная прочность при осевом нагружении и изгибе образцов тавровых соединений, выполнены металлографические исследования и измерения твердости. Отмечено высокое качество соединений. В настоящее время процесс электронно-лучевой сварко-пайки широко используется в производстве.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварко-пайка, рабочее колесо компрессора, лопатка, проплавление, усталостная прочность

При изготовлении больших стальных рабочих колес для центробежных компрессоров применяются различные способы сварки. Если газовые каналы колес достаточно большие, чтобы обеспечить доступ для крепления крышки или диска к лопаткам соединяемого компонента, то можно использовать внутренние угловые швы. Если же такой доступ отсутствует, то на крышке или диске выстрагивают пазы, чтобы приварить диски к верхней части лопаток с внешней стороны рабочего колеса. Применяемые в этом случае способы сварки (обычно дуговые) требуют значительного количества присадочного материала, что может привести к существенной деформации изделий и снижению их служебных характеристик из-за неблагоприятной формы швов. Другим вариантом изготовления указанных колес является использование высокотемпературной пайки. Однако и в этом случае этот способ может оказаться нетехнологичным вследствие жестких размерных параметров на изделие и возможности деформации его во время цикла пайки.

Альтернативой указанным способам соединения может стать электронно-лучевая сварка, при которой электронный луч проходит через крышку и приваривает ее к лопатке, не вызывая избыточных деформаций. Однако в труднодоступных («глухих») тавровых соединениях значительная часть контактной поверхности соединения остается не использованной, что снижает выносливость и общую проч-

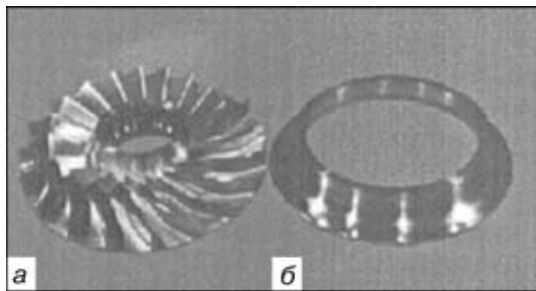


Рис. 1. Типичное рабочее колесо компрессора: а — диск с лопатками, вырезанный из цельной поковки; б — крышка

© Л. В. Майерс, Г. ЛаФлам, 2001

ность такого соединения, а также самого рабочего колеса. Ниже описан новый способ электронно-лучевой сварко-пайки, при котором на границу раздела, находящейся между лопаткой рабочего колеса и крышкой, предварительно наносится припой в виде фольги, обеспечивается направление пучка электронов по центру и параллельно боковым сторонам лопатки, задается ширина шва в зоне проплавления лопатки, шов выполняется через крышку. Остальные непроваренные части кромки на границе раздела лопатка-крышка соединяются с помощью припоя. Это происходит одновременно с выполнением электронно-лучевого шва благодаря выделяемому из него теплу, которого достаточно для расплавления и растекания материала припоя по свободной поверхности участка контакта крышки с лопаткой.

При разработке способа электронно-лучевой сварко-пайки были получены множество образцов тавровых соединений, с помощью которых отработаны оптимальные параметры сварки, а также изготовлены дополнительные образцы, которые использовали для испытания соединений на усталостную прочность при осевом нагружении или изгибе, ударную вязкость, стойкость к коррозии под напряжением, для измерения твердости, металлургии

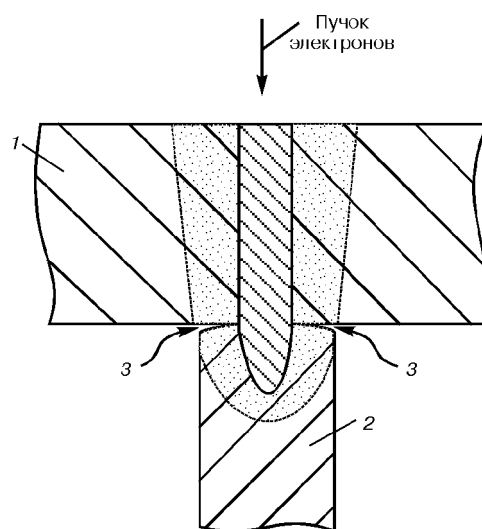


Рис. 2. Схема шва, соединяющего крышку с лопаткой, полученного электронно-лучевой сваркой: 1 — крышка; 2 — лопатка; 3 — зона несплавления

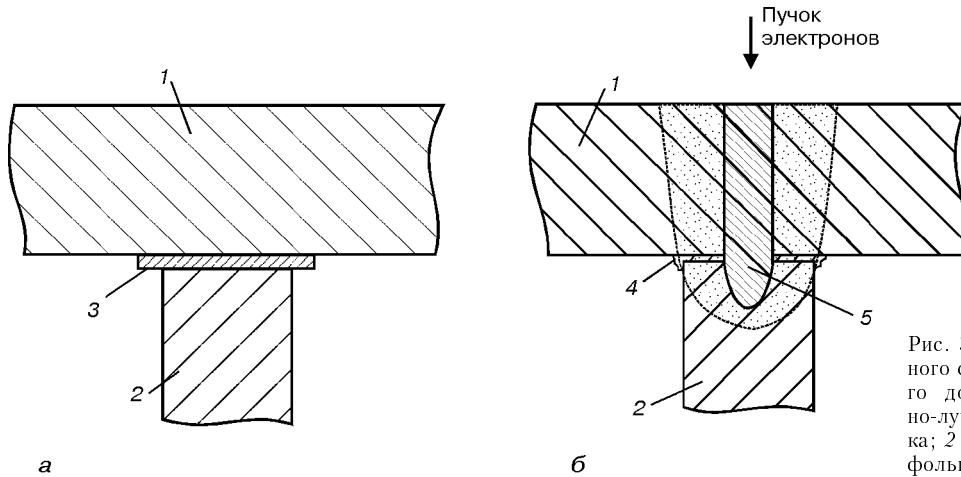


Рис. 3. Предполагаемая схема типичного сварного соединения, полученного до (а) и после (б) электронно-лучевой сварки-пайки: 1 — крышка; 2 — лопатка; 3 — припой в виде фольги; 4 — припой; 5 — шов

ческого анализа и др. Для сравнения изготавливали образцы с угловыми, прорезными швами и с использованием высокотемпературной пайки. Чтобы оценить возможность применения указанного способа для промышленных деталей, по окончании испытаний были изготовлены опытные образцы рабочих колес.

Рабочие колеса компрессоров состоят из трех основных частей — диска (втулки), крышки (кожуха) и лопаток (рис. 1). Лопатки соединяются с диском с помощью сварки либо вытачиваются из цельной поковки или отливаются вместе с диском. Крышка обычно соединяется с диском дуговой сваркой или высокотемпературной вакуумной пайкой в печи. Многолетний опыт сварки рабочих колес имеет фирма «Dresser-Rand», являющаяся признанным лидером в технологии получения сварных рабочих колес компрессоров. Она использует такие способы сварки, как внутренняя дуговая сварка при выполнении угловых швов, сварка прорезными швами и электронно-лучевая сварка. Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки, проявляющиеся при практическом применении. Результаты исследования этих процессов сварки показали, что по сравнению с другими способами электронно-лучевая сварка имеет значительные потенциальные возможности, с точки зрения производительности и повышения качества швов. В этой связи электронно-лучевую сварку исследовали с позиций возможного расширения сфер ее применения и оптимизации в области традиционного использования, включая предупреждение отрицательного влияния зон несплавления в сварном соединении (рис. 2).

В результате выполненных работ по усовершенствованию способа электронно-лучевой сварки было получено множество различных технологических решений. Одно из них (и наиболее очевидное) заключалось в отработке техники сварки: производить ее ближе к кромке лопатки, изменяя угол наклона электронным пучком так, чтобы он проходил к лопатке сквозь крышку. Однако этот подход оказался нетехнологичным из-за сложной формы сечения полученного шва (направление его прохождения через крышку до попадания в лопатку), а также увеличения расстояния, которое должен пройти электронный пучок. Последнее требует более мощного пучка по сравнению с тем, который

необходим для выполнения шва традиционной формы.

Одновременно оценивался и другой подход, заимствованный из процесса вакуумной высокотемпературной пайки в печи. В ходе экспериментов был поставлен вопрос о том, что может случиться, если поместить припой в виде фольги между крышкой и лопаткой, а затем прямо через него пропустить сварочный электронный пучок? Поскольку припой плавится при более низкой температуре, чем крышка и лопатка, выполненные из стали, предполагали, что жидкий припой заполнит зазор, образующийся при несплавлении с обеих сторон сварного соединения, повторно закристаллизуется и сплавит крышку с лопаткой в зонах несплавления. Предполагали также, что припой не только обеспечит повышение прочности сварного соединения благодаря сплавлению ранее несплавленных зон, но и уменьшит или предупредит образование «классических» концентраторов напряжения, каковыми и являются зоны несплавления.

Для проверки указанных предположений была выполнена серия образцов. Однако оставалось неясным поведение припоя при его перемешивании с жидким металлом шва. Использован тот же материал, который применялся при подготовке образцов для усталостных испытаний. При этом, неизвестно, каким образом электронный луч будет проходить через различные материалы. Тем не менее, эксперименты показали, что исследуемый процесс осуществим (рис. 3). Результаты испытаний продемонстрировали, что в этом случае не только уменьшались концентраторы напряжений, но и очевидным стало дополнительное повышение прочности благодаря соединению крышки и лопатки припоем в ранее несплавленных зонах. Этот новый процесс получил название электронно-лучевая сварка-пайка («EBraze Weld Process») — термин, предложенный фирмой «Dresser-Rand Co.».

Электронно-лучевая сварка выполняется с использованием высокоскоростного потока электронов, который трансформируется в концентрированный пучок, являющийся источником нагрева. Этот процесс, схема которого показана на рис. 4, обеспечивает интенсивный локальный нагрев благодаря совместному действию потока электронов. Каждый электрон, двигаясь по своей короткой траектории,

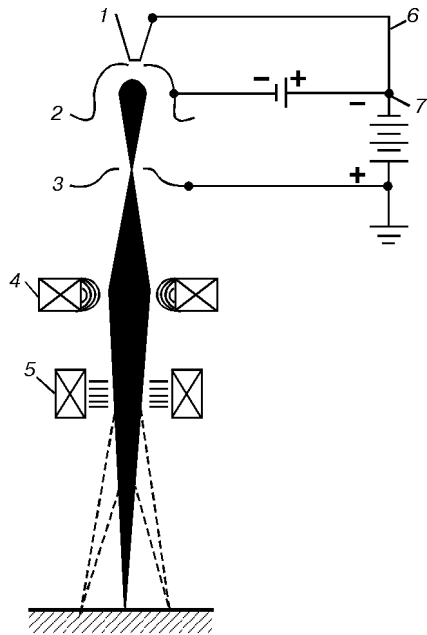


Рис. 4. Схема электронно-лучевого процесса: 1 — эмиттер (катод); 2 — сетка (сетка смещения); 3 — анод; 4 — магнитная фокусирующая линза; 5 — магнитная отклоняющая катушка; 6 — источник управляющего напряжения; 7 — высоковольтный источник питания

проникает в обрабатываемое изделие, отдавая ему свою кинетическую энергию в виде тепла. При достаточно высокой плотности электронов (в потоке тока 1 мА проходит приблизительно $6,3 \cdot 10^5$ электронов в секунду) в изделии выплавляется отверстие, которое имеет форму «замочной скважины». По мере продвижения пучка электронов по изделию расплавленный материал протекает по отверстию от лицевой к задней стенке ванны. Если отверстие перемещается вдоль траектории соединения без зазора, то между двумя деталями получают сварной шов.

Электронно-лучевая сварка имеет значительные преимущества. Так, она может обеспечить получение глубоких узких швов с почти параллельными боковыми поверхностями при низкой общей погонной энергии и зоной термического влияния относительно небольшой ширины. Отношение глубины шва к ширине может быть более 10:1 (рис. 5).

Программа испытаний была составлена таким образом, чтобы можно было на небольших образцах (в виде двутавровых балок) моделировать механические характеристики соединений на реальных рабочих колесах, полученных электронно-лучевой сварко-пайкой. Известно, что большинство усталостных разрушений на рабочих колесах происходит в соединениях, расположенных между лопаткой и крышкой или лопаткой и диском. Эти разрушения чаще всего наблюдаются либо на ведущей кромке (в зоне проушины), либо на выходной кромке лопатки. Анализ напряжений в рабочих колесах показал, что центробежная сила и давление газа в них, действующие на эти участки, различны. Считается, что в зоне проушины колеса основной действующей силой является растягивающее усилие, в то время как на внешнем диаметре колеса преобладающей силой, вероятно, является усилие изгиба/сдвига.



Рис. 5. Типичный вид поперечного сечения сварного соединения, полученного электронно-лучевой сварко-пайкой

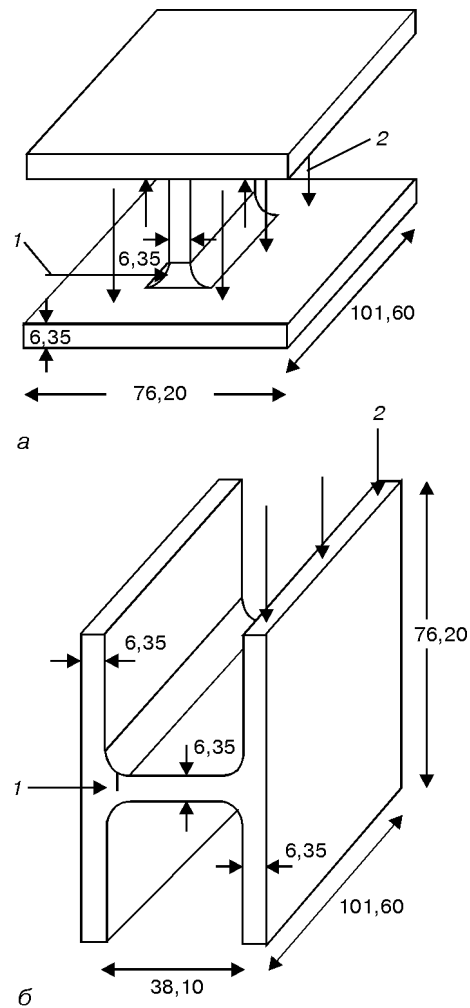


Рис. 6. Образец для испытаний на осевое растяжение (а) и на изгиб/сдвиг (б) при усталостном нагружении: 1 — усталостная трещина; 2 — нагрузка

Поэтому образцы подвергались испытаниям либо на осевое растяжение либо на изгиб/сдвиг в зоне стенки (лопатки рабочего колеса) двутавровой балки.

На рис. 6, а показан образец для испытаний на осевое растяжение в виде половины стенки балки, а на рис. 6, б — образец для испытаний на изгиб/сдвиг в виде поперечной стенки балки.

Целью исследований являлось определение характеристик процесса электронно-лучевой сварко-пайки по сравнению с традиционными способами соединения рабочих колес компрессоров с точки



Результаты испытаний образцов на осевое растяжение и изгиб/сдвиг

Вид соединения и способ сварки	Усредненная усталостная нагрузка, $P-15$, Н/м	Количество образцов
Цельное (без сварки)	2850/1835	14/18
Угловое	3260/1170	19/19
Прорезное	2595/1136	19/21
Электронно-лучевая сварка	1838/650	31/33
Высокотемпературная пайка	2225/1063	20/18
Электронно-лучевая сварко-пайка	2603/1252	18/16

Примечание. В числителе приведены значения нагрузки и количество испытанных образцов на осевое растяжение, а в знаменателе — на изгиб/сдвиг.

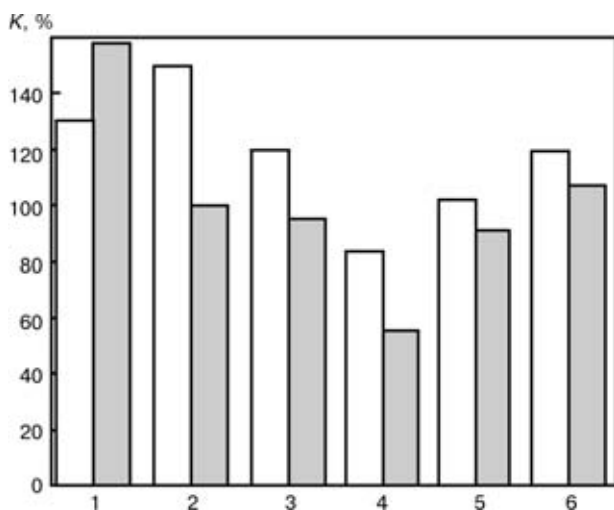


Рис. 7. Несущая способность образцов (в виде половины стенки балки с различным способом соединения) при усталостных испытаниях на осевое растяжение (□) и изгиб/сдвиг (■): 1 — цельное; 2 — угловое; 3 — прорезное соединение; 4 — электронно-лучевая сварка; 5 — высокотемпературная пайка; 6 — электронно-лучевая сварко-пайка; K — процент от соответствующего значения для углового соединения

зрения их несущей способности при усталостном нагружении.

При усталостных испытаниях как на осевое растяжение, так и на изгиб/сдвиг коэффициент R (отношение минимального напряжения к максимальному при усталостных испытаниях) поддерживался на уровне 0,1 благодаря используемой методике моделирования. Состояние отказа образца при усталостных испытаниях определялось потерей контроля нагрузки из-за большой стрелы прогиба в узле с трещиной. Это соответствует растрескиванию приблизительно 90 % поверхности соединения при осевом растяжении и около 60 % при изгибе/сдвиге. Дополнительная долговечность соединения до полного разрушения вне выбранной точки разреза была очень небольшой. Все усталостные испытания проводили по методу ступенчатого нагружения (стандарт ASTM STP 91A Американского общества испытания материалов) на базе $2 \cdot 10^6$ циклов.

В таблице приведены результаты усталостных испытаний при среднем усталостном нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ циклов. Несмотря на то что расположение усталостной трещины зависело от нагрузки и типа

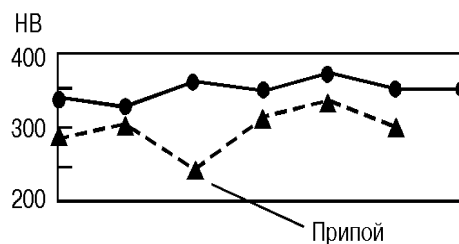


Рис. 8. Изменение твердости сварного соединения колеса, полученного электронно-лучевой сварко-пайкой: ▲ — зона исследования от А до В; ● — то же от В до С (сталь 4330; предел текучести составляет 21 Па; предел прочности — 23 Па)

соединений, оно оставалось неизменным в течение нескольких испытаний.

Сами по себе значения среднего усталостного нагружения при данном испытании особого значения не имели. Они важны лишь при сравнении их друг с другом (рис. 7).

Процесс электронно-лучевой сварко-пайки предопределяет несколько аспектов, являющихся объектом для исследований. Наиболее интересным из них является роль жидкого припоя в сварном соединении. Как правило, металл с более низкой температурой плавления не должен перемешиваться при сварке с основным металлом с более высокой температурой плавления. Известно много случаев, когда низкотемпературный сплав является причиной растрескивания швов. В процессе электронно-лучевой сварко-пайки используется промышленный припой. Причиной того, что в указанном процессе низкотемпературный металл не вызывает растрескивание, может быть очень низкая растворимость золота в железе или его отсутствие на границах зерен в основном металле. Еще одна область, представляющая интерес для исследования, — это возможность появления определенных фаз в металле шва или вблизи него, которые при последующей термообработке могут привести к образованию так называемых твердых точек. И снова, низкая растворимость золота в железе препятствует возникновению этого явления. Кроме того, отсутствует диффузия большого количества никеля из припоя в прилегающий основной металл или шов с образованием твердых точек, так как большой размер атома никеля предотвращает его миграцию в основной металл. Результаты разрушающего контроля и исследование твердости металла рабочего колеса, сваренного способом электронно-лучевой сварко-пайки и прошедшего полную термообработку, показали беспочвенность этих опасений (рис. 8).

В типичном сварном соединении, полученном способом электронно-лучевой сварко-пайки (рис. 9, а), обычный электронно-лучевой шов формируется в центральной зоне по толщине лопатки. В ранее несплавленных зонах в сварном соединении, выполненном электронно-лучевой сварко-пайкой, наблюдается слой припоя, образующего обычный паяный шов. Некоторое количество припоя выдавливается из соединения при затвердевании шва. Исследование указанного способа сварки выявило, что исходная толщина припоя в виде фольги составляла несколько сотых долей миллиметра, конечная же толщина слоя припоя была менее 0,025 мм. Считается, что крышка и лопатка при затвердевании электрон-

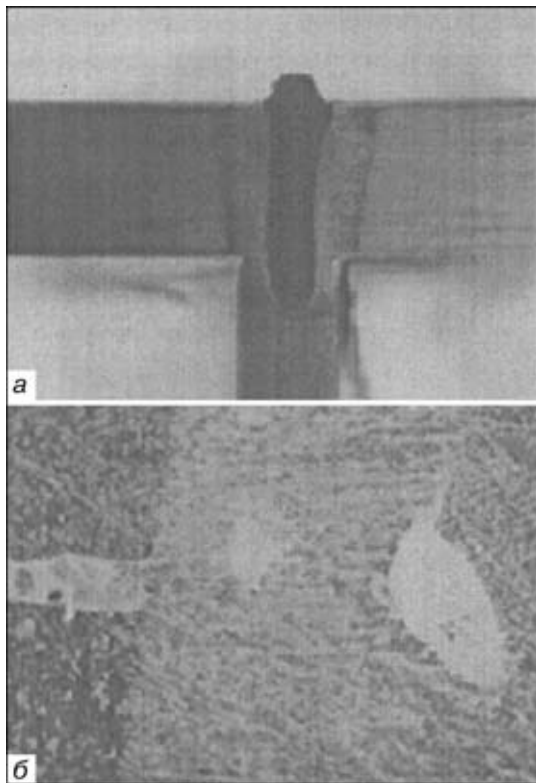


Рис. 9. Типичное сварное соединение, полученное способом электронно-лучевой сварки-пайки: а — $\times 3$; б — $\times 200$

но-лучевого шва вытягиваются. Это является положительным моментом в технике сварки, так как требования к допускам на механическую обработку могут быть не столь жесткими, как в случае пайки. При более тщательном исследовании установлено, что некоторое количество припоя «захватывается» в шов и образует в его металле указанные выше золотые сферические включения (рис. 9, б). Однако эти небольшие зоны являются пластичными и когерентными с микроструктурой шва.

Для подтверждения технологичности электронно-лучевой сварки-пайки с помощью этого способа было изготовлено колесо диаметром 375 мм из стали 4330 с объемной лопаткой. Был проведен комплексный анализ для исследования осуществимости процесса, последующей термообработки, целостности сварного колеса и оптимальных параметров процесса. Колесо сначала подвергали термообработке до получения предела текучести 840 МПа, а потом — конечной механической обработке, проверили методом ультразвукового контроля по методике «С-скан» с целью обнаружения несплавлений или трещин в соединении и провели эксплуатационные испытания на повышенной (18000 об/мин) скорос-

The joining process combining electron beam welding and brazing, which is used for the manufacture of the centrifugal compressor impellers, is described. Welding conditions were developed, fatigue strength of specimens under axial loading and bending was determined and metallographic examinations and hardness measurements were conducted. All specimens exhibited excellent results. At present the EB-braze welding process is applied in industry.

ти. Это колесо разрезали, чтобы проверить корреляцию результатов «С-скан» и условий сплавления шва, а затем исследовали его твердость.

Таким образом, способ электронно-лучевой сварки-пайки, разработанный фирмой «Dresser-Rand Co.» является значительным шагом вперед в области технологии соединения металлов и, в частности, в изготовлении рабочих колес для центробежных компрессоров. Результаты проведенных испытаний подтвердили, что указанный процесс обеспечивает получение колес с такой и даже лучшей усталостной прочностью, чем традиционный процесс сварки, и является качественным с металлургической точки зрения. Использование электронно-лучевой сварки-пайки обеспечивает приемлемое качество получаемых колес.

К моменту написания этой статьи с применением способа электронно-лучевой сварки-пайки было изготовлено несколько сотен колес, которые успешно прошли испытания методами неразрушающего контроля и в настоящее время находятся в эксплуатации в различных странах мира. Продолжаются их испытания на коррозию и ударную вязкость. Исследуется возможность применения указанного способа для соединения колес из различных материалов (нержавеющая сталь AISI410, 17-4, 15-5 PH и Cartech 625). Хотя испытания еще проводятся, полученные предварительные результаты их положительны и они будут отражены в публикациях.

Для дополнения программы испытаний была выполнена обширная аналитическая работа. Исследования проводили методами традиционного анализа последствий отказов, последствий упруго-пластических разрушений, переходных тепловых разрушений и анализа методами механики разрушений. Большая часть этой аналитической работы имела новаторский характер. Полученные результаты заложили техническую основу для дальнейшего усовершенствования процесса.

От лица фирмы «Dresser-Rand Co.» авторы выражают благодарность сотруднику Эдисоновского института сварки и фирмы «PTR-Precision Technologies, Inc.» за сотрудничество и помощь, без которых выполнение указанной работы было бы невозможным.

1. O'Brien R. L. Welding handbook // Amer. Welding Soc. — 1991. — Vol. 2. — P. 673.
2. Committee E-9 on Fatigue. A Guide for fatigue testing and the statistical analysis of fatigue data // Amer. Soc. for Test. Mater. — 1962. — P. 12.
3. Mechanical behavior and microstructure of Au-Ni Brazes // M. C. Tolle, M. E. Kassner, E. Cerri, R. S. Rosen // Mater. Trans. — 1995. — 26A, April. — P. 941.

Поступила в редакцию 26.09.2000