

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Л. А. КРАВЧУК, Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время рабочие колеса центробежных машин изготавливают вакуумной пайкой, дуговой сваркой и сваркой копайкой. В целях достижения более совершенного производства колес разработана технология электронно-лучевой сварки тавровых соединений типа «диск-лопатка» применительно к рабочим колесам центробежных машин. Проведены исследования по разработке технологии электронно-лучевой сварки высоколегированной коррозионностойкой стали X3CrNiMo13-4 аустенитно-мартенситного класса для создания рабочего колеса центробежного компрессора с толщиной стенки покрывного диска 12, 15, 20 мм и толщиной лопатки 6 мм. Получены оптимальные энергетические, временные и пространственные параметры электронного пучка, обеспечивающие формирование качественных сварных швов прорезного типа требуемой глубины проплавления. Для получения галтелей радиусом 2...3 мм между лопаткой и покрывным диском был предложен метод соединения путем расплавления металлических вставок, которые прикреплялись к обеим сторонам лопатки. Сваренное по разработанной технологии рабочее колесо центробежного компрессора прошло статическое и динамическое балансирование с последующими разгонными испытаниями. Разработанная технология электронно-лучевой сварки рабочих колес может быть использована в конструкциях, предназначенных для работы при вибрационных нагрузках. Библиогр. 6, рис. 14.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, центробежный компрессор, лопатки, диски, высоколегированная сталь, тавровое соединение, высокотемпературные припои, галтель, разгонные испытания

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии, позволяющими соединять за один проход металлы толщиной до 300 мм. Высокие показатели пластичности сварных соединений позволяют успешно применять ЭЛС в производстве деталей из термически упрочненных материалов, когда невозможна последующая термическая обработка.

Технологические перспективы электронно-лучевой сварки дают возможность проектировать и создавать новые высокопроизводительные конструкции газотурбинных двигателей. Так, например, новой перспективной задачей энергетического машиностроения является изготовление рабочих колес центробежного компрессора с повышенными эксплуатационными характеристиками, а также повышение надежности их входных и обратных направляющих аппаратов [1].

Рабочее колесо центробежного компрессора состоит из основного и покрывного дисков с расположенными между ними рабочими лопатками, образующими межлопаточные каналы. При работе рабочего колеса пыль под действием инерционных сил оседает на основном диске, а под действием центробежных сил выталкивается на периметр рабочего колеса. Учитывая высокие скорости вращения колеса, перемещение пыли по межлопаточным каналам сопровождается износом лопаток. Наиболее интенсивному износу подвергаются места сопряжения лопаток с основ-

ным и покрывным дисками колеса. Поэтому для повышения ресурса рабочих колес центробежных компрессоров необходимо места сопряжений выполнять с радиусом 2...3 мм. Разработка технологического процесса соединения покрывного диска с рабочими лопатками с обеспечением радиуса сопряжения 2...3 мм является целью данной работы.

Для изготовления рабочих колес компрессоров широко используется сталь типа X3CrNiMo13-4 (1.4313 по DIN), которая относится к коррозионностойким сталям аустенитно-мартенситного класса. Химический состав стали 1.4313 по стандарту EN 10088-3, мас. %: $\leq 0,05$ C; $\leq 0,7$ Si; $\leq 1,5$ Mn; 12...14 Cr; 0,3...0,7 Mo; $\geq 0,02$ N; $\leq 0,04$ P; $\leq 0,015$ S; 3,5...4,5 Ni. Механические свойства стали 1.4313: $\sigma_{0,2} \geq 800$ МПа; $\sigma_B \geq 900$ МПа; $\delta \geq 12\%$; $\psi \geq 40\%$; $KCV \geq 70$ Дж/см².

Исследование особенностей сварки электронным пучком в вакууме стали X3CrNiMo13-4 проводилось на установке УЛ-209М с компьютерным управлением всеми параметрами и системами. Установка УЛ-209М укомплектована энергетическим комплексом ЭЛА-60/60 и электронно-лучевой пушкой, перемещаемой внутри вакуумной камеры по линейным координатам X, Y, Z, а также поворачиваемой вокруг оси Y-Y по координате QG на угол 0...90°. Дополнительно установка доукомплектована вращателем с горизонтальной осью вращения (рис. 1).

Вакуумная камера установки с внутренними размерами 3850×2500×2500 мм и объемом 24 м³



Рис. 1. Общий вид электронно-лучевой установки УЛ-209М

откачивается в автоматическом режиме управления до рабочего вакуума $2,66 \cdot 10^{-2}$ Па ($2 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) за 25 мин.

При ускоряющем напряжении $U_{\text{уск}} = 60$ кВ электронно-лучевая пушка с металлическим вольфрамовым катодом совместно с энергетическим комплексом ЭЛА-60/60 обеспечивает диапазон тока электронного пучка $I_w = 0 \dots 500$ мА и формирование технологических разверток пучка в процессе электронно-лучевой сварки (круг, эллипс, штрих, треугольник) с амплитудой $0 \dots 4$ мм. Точность позиционирования электронно-лучевой пушки по координатам составила не менее $0,1$ мм. Изображение места сварки во вторично-эмиссионных электронах, а также совмещение электронного пучка со стыком с точностью не менее $0,1$ мм выполнялось с помощью системы РАСТР-6.

При отработке технологии электронно-лучевой сварки стали Х3СгNiMo13-4 контроль фокусировки электронного пучка производился по чёткости изображения следа луча на поверхности образца, отображаемый на мониторе системы РАСТР-6 и

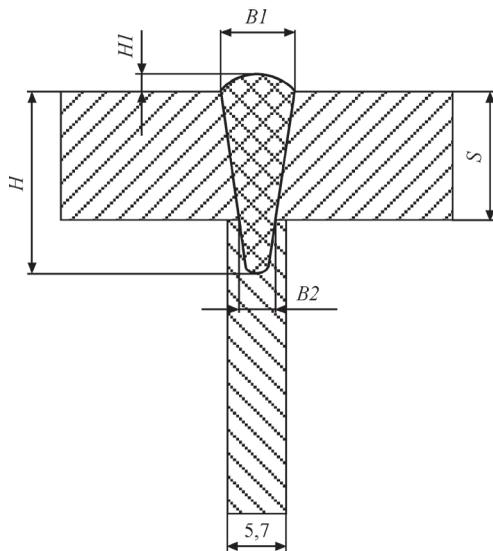


Рис. 2. Схема таврового соединения «диск–лопатка» (H — глубина шва; $H1$ — высота усиления шва; S — толщина покрывного диска; $B1$ и $B2$ — ширина шва в его верхней части и в плоскости контакта покрывного диска с лопаткой)

параллельно по яркости свечения круговой развертки пучка диаметром $d_{\text{круг}} = 5$ мм с током пучка $I_{\text{п}} \approx 10$ мА на медной пластине. Расхождение сравниваемых значений тока фокусировки при рабочем расстоянии от среза пушки до свариваемых пластин в диапазоне $L_{\text{раб}} = 150 \dots 250$ мм составило ± 1 мА на уровне $I_{\text{ф}}^{\text{раб}} = 620 \dots 650$ мА, что вполне приемлемо для практического применения.

На первом этапе исследований обрабатывалась технология соединения покрывного диска с рабочей лопаткой с помощью прорезных швов. Учитывая конструктивные особенности рабочего колеса, подбирались наиболее оптимальные параметры ЭЛС, обеспечивающие формирование швов глубиной 16, 19 и 25 мм. Система одновременного перемещения пушки установки УЛ-209М по координатам X - X , Y - Y и Z - Z совместно с системой РАСТР-6 обеспечивают позиционирование электронного пучка по поверхности покрывного диска с точностью $0,1$ мм. При этом на получаемых тавровых соединениях корень шва располагается точно по центру лопатки (рис. 2).

Перед сборкой тавровых соединений поверхности лопатки и диска были обезжирены растворителем или спиртом. Сборка под ЭЛС осуществлялась с помощью точечных прихваток аргодуговой сваркой по торцам заготовок. Рабочее расстояние от среза пушки до изделия составляло 150 мм. При этом ток фокусировки на поверхности образца составлял 665 мА.

При толщине покрывного диска 12 мм требуемое формирование швов достигалось на режиме: ток сварки $I_{\text{св}} = 110$ мА, ток фокусировки $I_{\text{ф}} = 658$ мА, скорость сварки $v_{\text{св}} = 4,2$ мм/с, амплитуда поперечной развертки $A = 4,0$ мм. Получаемая геометрия швов составляла: ширина верхнего валика $B1 = 7,5$ мм, ширина шва по плоскости контакта диск-лопатка $B2 = 3,5$ мм, с глубиной проплавления $H = 16$ мм и высотой лицевого валика $H1 = 1,7$ мм.

С ростом толщины покрывного диска до 15 мм параметры ЭЛС изменялись до следующих значений: $I_{\text{св}} = 120$ мА, $I_{\text{ф}} = 655$ мА, $v_{\text{св}} = 3,5$ мм/с и $A = 4,0$ мм. На таких режимах получали хорошее формирование лицевого валика шва шириной $B1 = 8,0$ мм, с шириной шва по торцу диск-лопатка $B2 = 3,7$ мм, с глубиной проплавления $H = 19,5$ мм и высотой лицевого валика $H1 = 1,7$ мм.

Для сварки тавровых соединений покрывных дисков толщиной 20 мм применялись следующие параметры ЭЛС: $I_{\text{св}} = 130$ мА, $I_{\text{ф}} = 652$ мА, $v_{\text{св}} = 2,8$ мм/с и $A = 4,0$ мм. При этом получили хорошее формирование лицевого валика шва с шириной $B1 = 9,0$ мм, с шириной шва по торцу диск-лопатка $B2 = 3,5$ мм, с глубиной проплавления $H = 24,5$ мм и высотой лицевого валика $H1 = 1,9$ мм.



Рис. 3. Внешний вид швов, получаемых при ЭЛС тавровых соединений «диск-лопатка», толщиной 12, 15 и 20 мм

Общий вид верхних валиков при ЭЛС покрывных дисков толщиной 12, 15 и 20 мм приведен на рис. 3, а их поперечное сечение на рис. 4.

Проведенный контроль качества сварных соединений показал отсутствие в них каких-то дефектов. Для получения сопряжений радиусом 2...3 мм между лопаткой и покрывным диском исследовалась возможность применения припоев и дополнительных металлических вставок в местах сопряжений. Подобные технологические процессы известны и их результаты опубликованы в литературе [2–6].

В работе использовали припои, широко применяемые в промышленности Украины. В первую очередь к ним относятся высокотемпературные припои: ВПр2, Впр2М, ПМФС 6-0,15 и порошкообразные припои на основе Cr, Ni, Si, В. В предлагаемой технологической схеме предполагалось получить расплавление припоя и формирование галтелей за счет тепла от нагрева металла во время электронно-лучевой сварки.

Припой ВПр2 (ПМ20МЛ) относится к медным припоям, обеспечивающим высокое качество паяных соединений. Соединения, паянные припоями ВПр2, имеют значительно большую прочность, чем паянные серебряными припоями. Эти припои не отличаются способностью к избирательному проникновению по границам зерен нержавеющей сталей и поэтому могут быть применены при пайке тонкостенных конструкций. Коррозионная стойкость в неагрессивных средах соединений, паянных этими припоями, практически не отличается от коррозионной стойкости соединений, паянных серебряными припоями.



Рис. 4. Поперечные сечения швов, получаемых при ЭЛС соединений «диск-лопатка», толщиной 12, 15 и 20 мм



Рис. 5. Схема закладки припоя в тавровое соединение

Также хорошие свойства имеет припой ПМФС 6-0,15 с пониженным содержанием фосфора, легированный кремнием или кремнием и серебром. Пределы содержания легирующих элементов в припое, мас. %: 5...8 P; 0,1...1,5 Si; Cu — остальное. Припой такого состава рекомендован для пайки изделий из меди и латуни, работающих без воздействия значительных ударных нагрузок; температура плавления припоя 725 °С, температура пайки 750...780 °С. Для изделий с повышенной ударной вязкостью паяных соединений предложен припой состава, мас. %: 5...6 P; 3 Ag; 0,15 Si; Cu — остальное; температура пайки 750...780 °С.

Для нанесения припоя в тавровое соединение лопатка-покрывной диск приготавливалась смесь на основе акриловой смолы БМК-5, порошкообразного припоя и растворителя. Данную тестообразную смесь наносили на тавровое соединение, как показано на рис. 5. После затвердевания смеси на воздухе образцы загружали в вакуумную камеру и проводили сварку по уже подобранным режимам.

К сожалению, приведенный выше технологический прием не дал положительного результата. Независимо от марки припоя после ЭЛС уверенного формирования сопряжений не получалось.

В дальнейших разработках применялись припои в виде фольги:

- № 1. Припой на основе меди толщиной 1,5 мм;
- № 2. Припой на основе латуни толщиной 1,5 мм;
- № 3. Стальной припой без меди толщиной 1,5 мм;
- № 4. Стальной припой с небольшой примесью меди толщиной 1,5 мм;
- № 5. Стальная фольга толщиной 0,1 мм;
- № 6. Латунная фольга толщиной 0,1 мм.

Для припоев в виде фольги использовалась схема сборки сварного соединения, приведенная на рис. 6. Верхний край лопатки вставлялся в профрезерованный паз на покрывном диске глубиной 1 мм. Между стенками лопатки и боковой поверхностью паза обеспечивался зазор, в который плотно укладывался припой прямоугольного сечения. Таким образом, ширина паза изменялась в зависимости от толщины применяемого припоя.

Пластинки припоя, которые запрессовывались в канавку, были толщиной от 0,1 до 1,5 мм. После запрессовки и выставления таврового соединения в вакуумной камере проводилась сварка по выбранным режимам. Но в результате ни один из

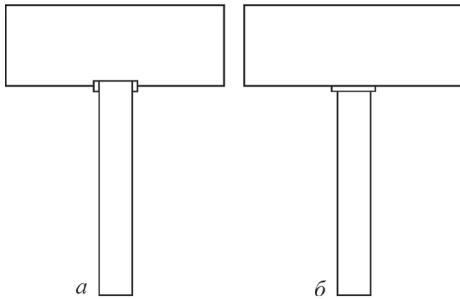


Рис. 6. Схема закладки припоя в соединении «лопатка-покрывной диск»: а — с использованием паза в покрывном диске; б — без паза

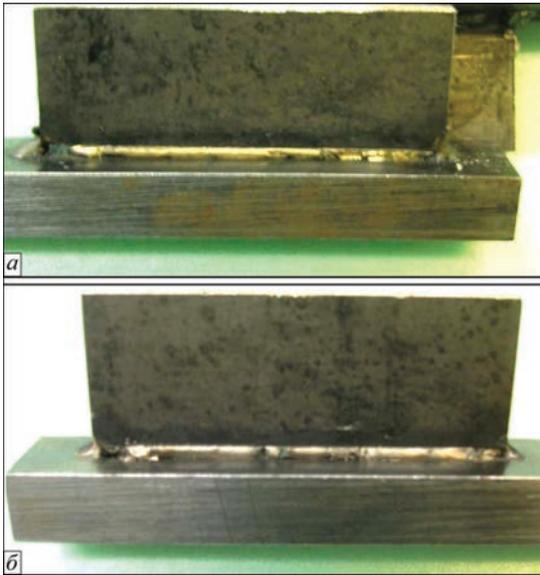


Рис. 7. Формирование сопряжения при использовании припоя на основе латуни (а) и меди (б)



Рис. 8. Макрошлиф сварного соединения «лопатка-диск», получаемого с применением медного припоя

применяемых припоев так и не позволил получить равномерного формирования галтели между лопаткой и диском. Наилучшее формирование получено при применении припоя на основе латуни и меди, однако уверенного смачивания припоя с поверхностью диска тоже нет (рис. 7). Макрошлиф сварных соединений с медным припоем приведен на рис. 8.

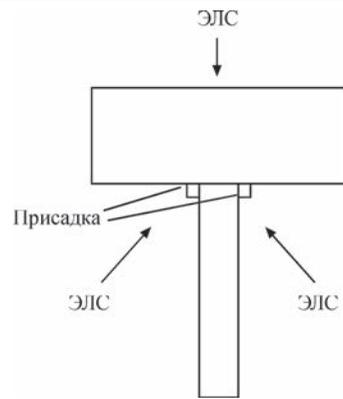


Рис. 9. Схема сварки таврового соединения «лопатка-диск» с применением электронного луча для расплавления присадки из стали X3CrNiMo13-4



Рис. 10. Формирование перехода «лопатка-диск» при расплавлении присадки электронным лучом

Для обеспечения надежного формирования галтелей был предложен метод соединения лопаток с покрывным диском с дополнительными проходами и расплавлением присадки из стали X3CrNiMo13-4 электронным пучком. Схема процесса приведена на рис. 9.

Присадка прикреплялась по обеим сторонам лопатки (рис. 9) и электронно-лучевая сварка соединения «диск-лопатка» выполнялась вертикальным пучком на режимах, приведенных выше. После чего образец переворачивался на 90° и закреплялся на рабочем столе. Электронно-лучевая пушка выставлялась под углом 5° к горизонту, позволяя проникнуть лучу в зазор рабочего колеса на всю длину лопатки, расплавлять присадку и формировать галтель. В результате получаем надежный сварной шов и идеальное формирование галтели соединения «диск-лопатка» (рис. 10, 11).

Полученные результаты ЭЛС моделей соединений «лопатка-диск» рабочего колеса позволили нам спроектировать, изготовить и сварить модель, аналогичную реальным рабочим колесам, выпускаемым в ОАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе». Выставленная под определенным углом пушка перемещалась по координатам Z-Z и Y-Y. Одновременно с движением пушки поворот макета осуществлялся с помощью прецизионного вращателя. Составление программы изменения



Рис. 11. Макрошлиф получаемого соединения «лопатка–диск»



Рис. 12. Формирование галтелей на модели рабочего колеса



Рис. 13. Общий вид основного и покрывного дисков рабочего колеса перед сборкой и сваркой

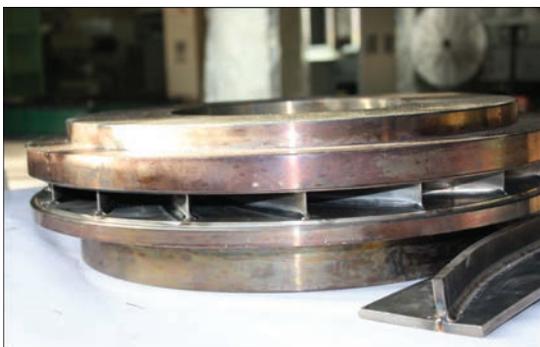


Рис. 14. Общий вид сваренного рабочего колеса с галтелями радиусом 3 мм между лопатками и покрывным диском

координат перемещения пушки и макета во времени осуществлялось с помощью системы наблюдения РАСТР-6. Равномерность формирования галтели между диском и лопатками показана на рис. 12. Ультразвуковой контроль качества соединений по всей длине лопаток не выявил каких-либо отклонений. На завершающем этапе исследований было подготовлено и сварено рабочее колесо центробежного компрессора из стали Х3СrNiМо13-4 (рис. 13). После чистки, сборки и стяжки основного и покрывного дисков колесо было закреплено на вращателе и установлено в вакуумную камеру. Используя отработанный технологический процесс, были проварены галтели сначала со стороны выпуклой части лопаток, а затем со стороны вогнутой.

Движение пушки осуществлялось по двум координатам: $X-X$ и $Y-Y$, а поворот изделия во время сварки обеспечивался высокоточным вращателем. ЭЛС проводили на следующем режиме:

ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, ток бомбардировки $I_6 = 65$ мА, рабочее расстояние от среза пушки до изделия составляло 300 мм, ток сварки $I_{\text{св}} = 65$ мА, ток фокусирующей линзы $I_{\text{ф}} = 615$ мА, скорость сварки $v_{\text{св}} = 4$ мм/с. Общий вид сваренного рабочего колеса представлен на рис. 14.

После финальной механической обработки колесо прошло статическое и динамическое балансирование с последующими разгонными испытаниями при скорости вращения 11295 об/мин. После разгонных испытаний были измерены контрольные размеры рабочего колеса, которые сохранились и были равны соответствующим размерам до разгонных испытаний.

Таким образом, подтверждена возможность изготовления рабочих колес центробежных машин с применением электронно-лучевой сварки, которая обеспечивает формирование галтелей между диском и лопатками радиусом 3 мм. Результаты работы позволяют рекомендовать технологию ЭЛС для изготовления штатных рабочих колес центробежных машин.

1. Белоусов А. Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / А. Н. Белоусов, Н. Ф. Мусаткин, В. М. Радько. – Самара: ФГУП «Издательство Самарский Дом печати», 2003. – 336 с.
2. Hybrid EBW Process Joins Heavy-Duty Impellers / G. Laflamme, J. Rugh, S. MacWilliams [et al.]. // *Welding Journal*. – 2006. – № 1. – P. 44–47.
3. Myers L. Electron beam braze welding of compressor impellers / L. Myers, G. Laflamme // *The Paton Welding Journal*. – 2000. – № 8. – P. 53–57.
4. C7.1M/C7.1:2004, Recommended Practices for Electron Beam Welding. – Miami, Fla.: American Welding Society.
5. Особенности формирования толстостенного таврового соединения с применением высокотемпературной пайки и сварки плавлением / В. Н. Радзиевский, Ю. Ю. Гарцунов, Г. Г. Ткаченко [и др.] // *Сварочное производство*. – 2001. – № 4. – С. 42–46.
6. Радзиевский В. Н. Высокотемпературная пайка в вакууме тавровых соединений с большой галтелью из металлического порошка / В. Н. Радзиевский, В. И. Рымарь, В. К. Беспалов // *Сварочное производство*. – 1991. – № 8. – С. 5–6.

Поступила в редакцию 11.04.2016