



# ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ АВТОВАКУУМНАЯ ПАЙКА СТАЛЬНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

В. Н. РАДЗИЕВСКИЙ, д-р техн. наук, Г. Г. ТКАЧЕНКО, Ю. Ф. ГАРЦУНОВ, инженеры  
(ВНИИкомпрессормаш, г. Сумы)

Показано, что с помощью комбинации аргонодуговой сварки и высокотемпературной автовакуумной пайки с формированием большой галтели из металлического порошка можно создать надежное тавровое соединение в труднодоступных каналах рабочего колеса центробежного компрессора. Простой в осуществлении автовакуумный нагрев, примененный для пайки, позволяет очистить поверхности перед плавлением припоя, способствует формированию каркаса из порошка в большой галтели и создает условия для образования композиционной структуры металла с требуемыми механическими свойствами.

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, высокотемпературная пайка, автовакуумный нагрев, очистка поверхности, структурообразование, формирование галтели, образование каркаса, рабочее колесо, тавровое соединение, металлический порошок, припой

Надежность и долговечность центробежного компрессора во многом зависят от усталостной прочности наиболее нагруженной детали — рабочего колеса. В компрессорах большой мощности применяются закрытые рабочие колеса (рис. 1), состоящие из двух дисков (основного и покрывающего), которые соединены между собой лопатками. Лопатки фрезеруются в теле одного из дисков или штампуются отдельно из листа и соединяются с дисками посредством сварки или пайки. Наружный диаметр колеса составляет 200...1200 мм, а ширина канала на наружном диаметре — 5...60 мм. Для изготовления колес применяют прочные стали с пределом текучести свыше 800 МПа. При достаточной ширине канала тавровое соединение диска с лопаткой выполняют посредством двусторонней сварки с требуемым размером катета углового шва. В узких каналах сварка затруднена и соединение осуществляется через прорезанные в диске пазы. При этом процесс сварки усложняется из-за необходимости гарантированного провара с формированием в тавровом соединении галтелей из расплавленного или близкого к плавлению металла.

В работе [1] показано, что для гарантированного формирования качественных галтелей целесообразно применять одновременно электронно-лучевую сварку и пайку. Для этого в зазор между деталями помещают ленту высокотемпературного припоя, а электронным лучом проплавляют диск и частично лопатку. При электронно-лучевой сварке лента припоя расплавляется и под действием капиллярных сил формирует галтели.

Прочное и надежное соединение диска с лопатками обеспечивается в процессе высокотемпературной пайки в вакууме с помощью высокопрочного припоя на основе палладия [2–5]. Однако в тавровых соединениях, в которых галтель формируется

расплавленным припоем под действием капиллярных сил, радиус галтели не превышает 1 мм. Известно, что галтель не создает концентрацию напряжений при условии  $R = 2S$  ( $R$  — радиус галтели,  $S$  — толщина стенки тавра). Обычно толщина лопаток и дисков составляет не менее 4 мм. Поэтому галтель радиусом 1 мм является существенным концентратором напряжений и способствует усталостному разрушению дисков. При этом усталостная прочность таврового соединения почти вдвое ниже усталостной прочности основного металла.

В статье [6] показано, что усталостную прочность таврового паяного соединения можно повысить до уровня основного металла путем формирования галтели требуемого размера из металлического порошка, пропитанного расплавом высокотемпературного припоя при нагреве в вакууме. Наряду с преимуществами технология пайки посредством формирования галтелей большого радиуса имеет существенный недостаток. Галтель формируют из пасты, которая состоит из металлического порошка, связанного раствором сополимера. После испарения растворителя и затвердевания пасты колесо нагревают в печи до температуры пайки, при которой расплавленный припой пропитывает галтель и соединяет ее с основным металлом. При неравномерном нагреве деталей колеса, связанном с их разной толщиной, а также при фазовых превращениях структуры металла происходит деформация, изменяющая размер зазора, что приводит к разрушению



Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора

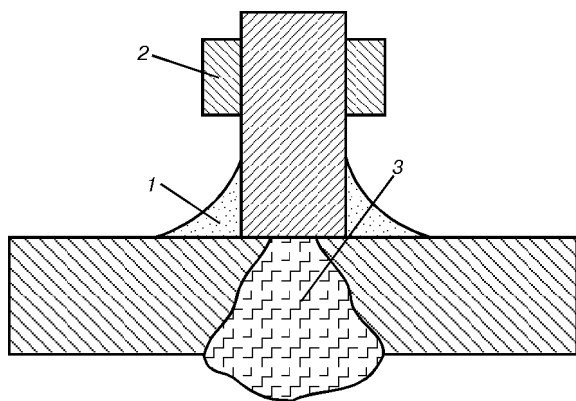


Рис. 2. Схема сварно-паяного таврового соединения: 1 — галтель паяного шва; 2 — припой; 3 — сварной шов

галтелей, сформированных из металлического порошка. В них образуются трещины или отслоения от основного металла. Трещины при пайке не заполняются расплавленным припоем, так как расплав не перемещается из микрокапиллярных каналов между частицами порошка в более широкие каналы, образованные трещинами.

Представляет интерес закрепление деталей колеса с помощью сварки плавлением перед формированием галтелей большого радиуса из металлического порошка (рис. 2). При этом перспективным является применение аргодуговой сварки через пазы в покрывающем диске в сочетании с последующей высокотемпературной пайкой с использованием автовакуумного нагрева (рис. 3) [7]. В герметизированной с помощью приварки технологических заглушек и бандажа полости колеса сорбент из порошков активных металлов создает вакуум с низким парциальным давлением кислорода. В таких условиях происходит качественная (сравнимая с пайкой в вакуумных печах) пропитка расплавленным припоем галтелей паяных швов, сформированных из металлического порошка. Сварные швы, составляющие 0,5... 0,7 длины лопатки, надежно устраняют опасность разрушения галтелей из порошка при нагреве до температуры пайки.

Для формирования бездефектного комбинированного таврового соединения лопатка проваривается по всей ее толщине к диску. При этом возможные наплывы и деформация поверхности в углу тавра не являются браком, поскольку при последующем формировании галтели из порошка устраняются дефекты формы.

При выполнении сварных швов с проваром по всей толщине лопатки в зоне термического влияния происходит окисление поверхности металла. Эта зона располагается в местах формирования галтелей паяного шва. Поэтому удаление оксидной пленки с поверхности является непременным условием качественной пайки. Применение абразивной зачистки или травления недопустимо, так как при этом загрязняются паяльные зазоры. Эффективной является «самоочистка» от оксидной пленки поверхности металла при автовакуумном нагреве [8]. В публикации [9] показано, что при автовакуумном нагреве до 900 °С оксидная пленка синевато-фиолетового цвета толщиной 60... 70 мкм на углеродистой стали (такая пленка образуется в зоне сварных швов

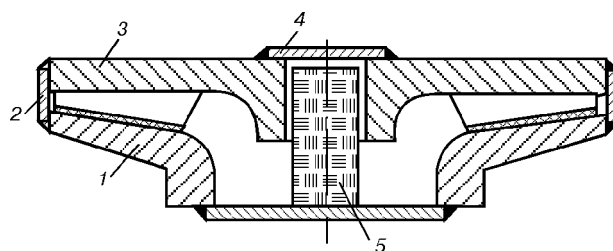


Рис. 3. Схема процесса автовакуумной пайки рабочего колеса: 1 — диск; 2 — бандаж; 3 — диск с лопатками; 4 — технологическая заглушка; 5 — патрон с сорбентом и активатором

в колесе) восстанавливается до чистого железа с образованием рельефной поверхности, способствующей смачиванию и растеканию расплавленного припоя. Поэтому затруднений с очисткой поверхности при автовакуумной пайке сварных тавровых соединений в колесах из углеродистых конструкционных сталей не возникает. Однако рабочие колеса в основном изготавливаются из легированных сталей (07X16H6, 13XГМРБ, 14X2ГМР, 20XНЗФА). «Самоочистка» от оксидной пленки на указанных сталях имеет несколько иной характер и завершается в зависимости от состава стали при температуре свыше 1000... 1100 °С, что может привести к образованию дефектного паяного соединения, так как температура пайки по ряду причин выбрана в пределах 900... 1050 °С. В этом случае расплавленный припой пропитывает галтели из порошка при неочищенном от оксидной пленки основном металле. Такое соединение разрушается хрупко по спаю. Для гарантированной очистки окисленной поверхности необходимо вводить в состав сорбента галоидосодержащую соль, пары которой активируют процесс раскисления [10].

Для формирования паяного соединения необходимы специальные порошки, отвечающие ряду требований. Во-первых, они должны образовывать с раствором сополимера пластичную пасту, позволяющую формировать в тавре гладкую, с плавным переходом к основному металлу, галтель. Эта характеристика зависит как от грануляции, так и от формы частиц. Во-вторых, при нагреве порошок должен способствовать сохранности формы галтели и ее связи с основным металлом. В-третьих, грануляция и форма частиц порошка должны обеспечивать образование микрокапиллярных каналов для их надежного заполнения расплавом припоя. В-четвертых, состав порошка следует выбирать таким образом, чтобы в процессе взаимодействия припоя с расплавом происходила активная взаимная диффузия компонентов, обуславливающая изотермическую кристаллизацию металла шва и повышение его механических свойств. Указанным требованиям отвечают порошки из железоникелевых сплавов (пермаллоев).

При выборе состава порошка следует учитывать особенность автовакуумного нагрева. На первой стадии нагрева до 500... 600 °С наряду с окислением сорбента окисляются основной металл и порошок в галтелях. При температуре свыше 600 °С резко снижается парциальное давление кислорода, и поверхности начинают очищаться от оксидной пленки. При этом на поверхности частиц порошка образу-

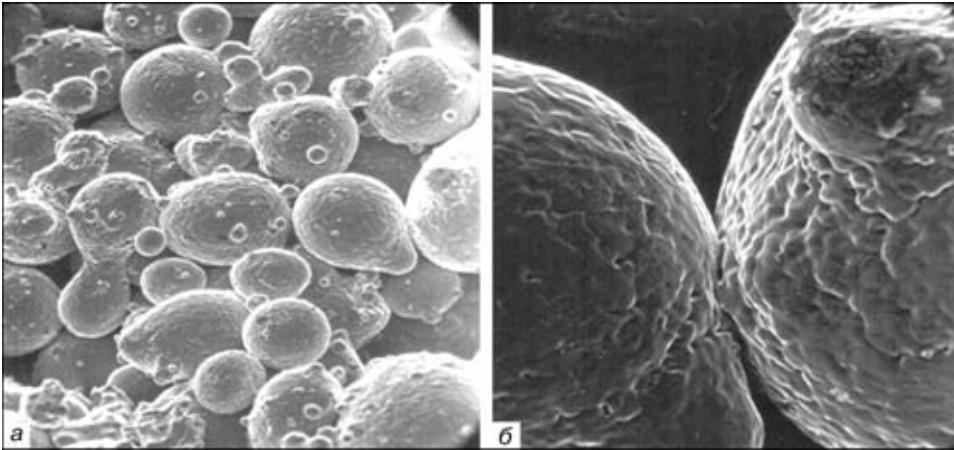


Рис. 4. Фрактограмма излома каркаса галтели, сформированной из порошка пермаллоя (а —  $\times 1500$ ; б —  $\times 3000$ , уменьш. 4/5)

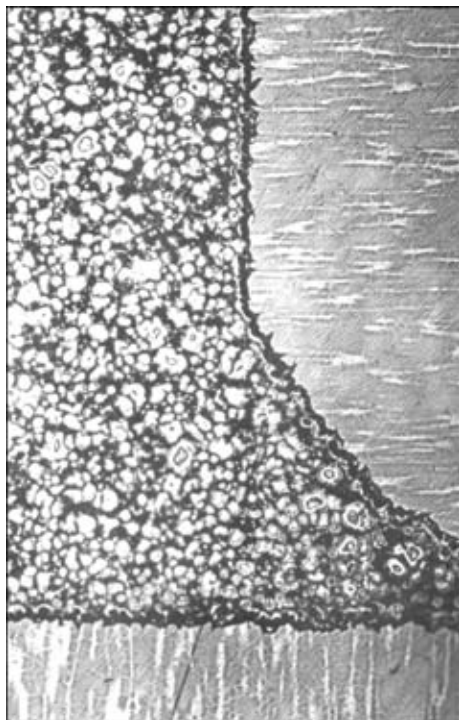


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 50$ , уменьш. 4/5) композиционного металла шва, образованного легированным медно-марганцевым припоем и порошком из пермаллоя

ется рельефная пленка из восстановленного металла, способствующая образованию в местах контакта диффузионного соединения (рис. 4). Образующийся каркас из соединенных частиц удерживает форму галтели при ее пропитке расплавленным припоем. Активностью этого процесса можно управлять посредством выбора соответствующего состава порошка.

Автовакуумную пайку колеса предпочтительно выполнять при минимально возможной температуре, при которой обеспечиваются требуемые механические свойства паяного соединения. Повышение температуры при автовакуумном нагреве требует увеличения технологических припусков на наружной поверхности дисков для предупреждения их деформации под действием атмосферного давления, а увеличение толщины дисков нежелательно, так как при этом усложняется сварка в глубоких пазах. Кроме того, повышение температуры способствует росту зерна в металле и окислению границ зерен со стороны наружной поверхности дисков. Оптималь-

ной представляется температура в пределах  $900 \dots 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ , при которой происходят нормализация, закалка или аустенизация сталей, применяемых для изготовления колес. Поскольку стальные рабочие колеса не предназначены для сжатия агрессивных газов, то для рассматриваемого технологического процесса пригодны припои на медно-марганцевой основе. Применяя легирование медно-марганцевой основы никелем и элементами-диспергаторами, можно выбрать припой с необходимой температурой плавления, обеспечивающей при диффузионном взаимодействии с порошком требуемые механические свойства соединения [11].

По технологическим условиям размеры частиц порошка должны составлять  $50 \dots 150 \text{ мкм}$ . Металл шва, образованный пропиткой порошка данной грануляции расплавом медно-марганцевого припоя, при кратковременной выдержке в условиях температуры пайки имеет низкие пластические свойства. При длительной изотермической выдержке в контакте частиц происходит кристаллизация жидкой фазы, а в полостях между частицами жидкий припой диспергирует частицы порошка [12]. При выдержке  $40 \dots 60 \text{ мин}$  формируется однородный металл паяного шва, состоящий из легированной медно-марганцево-никелевой матрицы, армированной сфероидальными частицами размером  $5 \dots 20 \text{ мкм}$ , образованными из порошка (рис. 5). Металл с такой однородной равновесной мелкодисперсной структурой характеризуется следующими механическими свойствами:  $\sigma_T = 340 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_B = 640 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 30 \%$ ,  $\psi = 60 \%$ ,  $KCU = 120 \text{ Дж/см}^2$ ,  $HB 160$ . Указанные свойства обеспечивают металлу таврового соединения в колесе равнопрочность с основным металлом при соответствующем выборе величины галтели. Следует отметить преимущество автовакуумного нагрева в процессе формирования структуры металла паяного шва. Для высокотемпературной пайки характерна кратковременная выдержка, при которой, как правило, образуется структурно-неоднородный шов. Увеличение выдержки для диффузионных процессов при пайке в атмосфере нежелательно из-за опасности окисления, а при пайке в вакууме с непрерывной откачкой газов недопустимо из-за опасности испарения элементов с высокой упругостью пара. При этом значительно изменяются свойства припоя и условия формирования соединения. При автовакуумном нагреве создается нейт-

ральная атмосфера низкого разрежения, в которой устанавливается равновесное давление паров металлов и активных химических соединений. Это позволяет вводить в состав припоев легкоиспаряющиеся металлы, а в сорбент — активные соли для создания оптимальных условий формирования соединения.

Технология автовакуумной пайки комбинированных тавровых соединений испытана при изготовлении рабочих колес с шириной каналов от 8 до 60 мм. Натурные испытания сварно-паяных колес подтвердили надежность соединений.

Результаты разработки позволяют считать новую технологию изготовления рабочих колес перспективной, поскольку для ее осуществления не требуются дорогостоящие материалы и специальное оборудование. Она может быть реализована с привлечением незначительных капитальных затрат в серийном и единичном производстве при изготовлении, ремонте и модернизации центробежных компрессоров.

## Выводы

1. Применение аргодуговой сварки с полным проваром лопатки через паз в диске в сочетании с высокотемпературной пайкой с формированием галтелей большого радиуса из металлического порошка способствует устранению недостатков, свойственных каждому из способов таврового соединения деталей колеса.

2. Автовакуумный нагрев при выполнении пайки создает оптимальные условия для формирования соединения на всех его этапах: при подготовке поверхности, создании каркаса из частиц и образовании структуры металла шва. Путем выбора необходимого состава технологических материалов можно активно управлять физико-химическими и

металлургическими процессами на всех стадиях формирования соединения.

1. Myers L. W., LaFlamme G. Electron beam braze welding of compressor impellers. — S. I., [1998]. — Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-732-98.
2. Радзиевский В. Н., Бондарев А. А., Рымарь В. И. Пайка рабочих колес центробежных машин // Свароч. пр-во. — 1971. — № 3. — С. 40–41.
3. Радзиевский В. Н., Лоцманов С. Н., Рымарь В. И. Паяные рабочие колеса центробежных компрессоров из низколегированных сталей // Хим. и нефт. машиностроение. — 1974. — № 8. — С. 3–8.
4. Радзиевский В. Н., Рымарь В. И., Чернов В. Ю. Технология изготовления цельнопаяных рабочих колес центробежных компрессоров // Там же. — 1976. — № 12. — С. 10–12.
5. Радзиевский В. Н., Рымарь В. И. Высокотемпературная вакуумная пайка колес центробежных компрессоров из стали 07X16H6 // Там же. — 1978. — № 5. — С. 9–11.
6. Радзиевский В. Н., Рымарь В. И., Беспалов В. К. Высокотемпературная пайка в вакууме тавровых соединений с большой галтелью из порошка // Свароч. пр-во. — 1991. — № 8. — С. 5–6.
7. Взаимодействие марганца, хрома и титана с воздухом в условиях автовакуумного нагрева при пайке / В. И. Рымарь, С. Н. Лоцманов, В. Н. Радзиевский, В. Ю. Чернов // Там же. — 1973. — № 11. — С. 6–8.
8. Самоочистка от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Автомат. сварка. — 1998. — № 2. — С. 16–23.
9. Радзиевский В. Н., Гарицун Ю. Ф. Очистка поверхности углеродистой стали от оксидной пленки при автовакуумном нагреве // Свароч. пр-во. — 1990. — № 5. — С. 31–33.
10. А. с. 803962 СССР, МПК В01j 1/22, В23К 35/22. Сорбент для автовакуумной пайки труднопаяемых материалов / В. И. Рымарь, В. Н. Радзиевский. — Опубл. 15.02.81, Бюл. № 6.
11. Радзиевский В. Н., Гарицун Ю. Ф., Ткаченко Г. Г. Высокотемпературная пайка стали медно-марганцевым припоем с наполнителем при широком зазоре // Автомат. сварка. — 1997. — № 11. — С. 18–21.
12. Радзиевский В. Н., Гарицун Ю. Ф., Ткаченко Г. Г. Влияние диспергирования наполнителя из железного порошка медным припоем на свойства металла паяного шва // Там же. — 1997. — № 8. — С. 18–22.

It is shown that application of a combination of argon-arc welding and brazing with formation of a large fillet of metallic powder allows production of a reliable tee-joint in fabrication of a centrifugal compressor impeller. Autovacuum heating applied for brazing, allows cleaning the surfaces before the braze alloy melting, promotes formation of a powder frame in the large fillet and allows producing a composite structure of the metal with the required mechanical properties.

Поступила в редакцию 04.09.2000,  
в окончательном варианте 04.04.2001