EDN: UZCNXZ
УДК 621.5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Д.Е. Якимов, Е.Н. Поморцев, З.Р. Габдрахманова

АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС
Российская Федерация, 420029, г. Казань, ул. Сибирский Тракт, д. 40

Аннотация. В статье приведены основные результаты комплексных исследований с применением новых материалов и технологий к изготовлению рабочих колес центробежных компрессорных установок. Рассмотрены преимущества технологии высокотемпературной пайки при изготовлении рабочих колес центробежного компрессора. Представлены результаты работ по исследованию и разработке технологии пайки различных материалов рабочих колес с применением припоев на основе никеля.

Ключевые слова: центробежный компрессор, рабочее колесо, пайка, никель, вакуум, высокая температура.

Введение

Для достижения технологического суверенитета и лидерства нашей страны необходимо применение передовых технологий, а также новых подходов к проектированию и изготовлению оборудования для ключевых отраслей промышленности. В частности, создание современного и эффективного компрессорного оборудования, которое является важнейшим звеном многих технологических циклов.

Наиболее важными и ответственными узлами центробежного компрессора являются рабочие колеса, от эффективности которых зависит общая эффективность центробежной компрессорной установки [1]. Наибольшее применение в компрессорных установках получили рабочие колеса закрытого типа, представляющие собой конструкцию из основного и покрывного дисков и расположенных между ними лопаток (рисунок 1). Создание конструкции данного типа возможно с помощью высокотемпературной вакуумной пайки, которая позволяет охватывать производство широкого ряда ступеней компрессора, как с малорасходными, так и с высокорасходными рабочими колесами. При соответствующем выборе припоя и технологических режимов высокотемпературная пайка позволяет создать прочное и качественное соединение, надежно работающее в компрессорных установках. Зачастую пайка является единственным методом получения качественных соединений в скрытых и малодоступных местах конструкций рабочего колеса.

Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора

Материал, используемый для изготовления рабочих колес, оказывает большое влияние на выбор технологии производства. К числу требований, предъявляемых к материалам элементов рабочих колес, относятся высокие прочностные свойства при заданных надежности и ресурсе, хорошая технологичность и химическая стойкость в рабочих средах.

Анализ материалов, применяемых отечественными и зарубежными изготовителями компрессорного оборудования при разработке рабочих колес, показал, что используются различные конструкционные легированные марки сталей и сплавов. Данные марки материалов обладают совокупностью высоких механических характеристик и технологических свойств, обеспечивающим важные преимущества для широкого применения в изделиях повышенной прочности – в качестве перспективных материалов для рабочих колёс центробежных компрессоров.

Для освоения технологии изготовления рабочих колес центробежных компрессоров паяной конструкции из данных марок материалов на производстве необходимо подобрать припой, обеспечивающий достаточную прочность и надежность паяного соединения, а также отработать оптимальные режимы термической обработки, включающие временные и температурные параметры.

В связи с этим целью настоящей работы являются экспериментальные исследования припоев и подбор режимов термической обработки для разработки технологии вакуумной пайки рабочих колёс центробежных компрессоров.

Материалы и методы

Химический состав и механические свойства исследуемых марок материалов для рабочих колёс представлены в таблицах 1-2 [2].

Таблица 1. Химический состав марок материалов

Марка материала	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	B	Cu	S	P
07Х16Н6	0,05-0,09	<0,80	<0,80	15,50-17,50	5,00-8,00	–	–	–	–	–	≤0,020	≤0,035
18ХГТА	0,17-0,23	0,80-1,10	0,17-0,37	1,00-1,30	0,1-0,3	0,05-0,15	0,02-0,05	0,030-0,090	0,002-0,005	–		
Type 630 (17400)	≤0,07	≤1,00	≤1,00	15,00-17,50	3,00-5,00	–	–	–	–	3,00-5,00	≤0,030	≤0,040
Никелевый сплав 718 (N07718)	–	–	–	17,0-21,0	50,0-55,0	2,80-3,30	–	0,80-1,15	–	–	–	–

Таблица 2. Механические свойства материалов после термообработки

Марка материала	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
	Не менее			
07Х16Н6	880	1078	12	45
18ХГТА	800	930	9	45
Type 630 (17400)	725	930	16	50
Никелевый сплав 718 (N07718)	1034	1207	20	25

Комплекс исследовательских и экспериментальных работ по разработке технологии изготовления рабочих колёс включал: изготовление образцов паяной конструкции; подбор припоев; отработка технологических режимов термической обработки; исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства образцов.

По результатам проработки справочных данных и консультаций с производителями припоев были определены несколько марок припоев на основе никеля. Припои данных систем имеют хорошие технологические свойства, обеспечивают хорошую прочность и коррозионную стойкость паяных соединений [3].

В качестве критериев, определяющих качество паяных соединений деталей, были выбраны: физико-механические свойства (предел прочности), характеризующие адгезионную способность припоев; технологичность, характеризующая смачиваемость припоем и его способность заполнять зазор; микроструктура – для оценки диффузионной способности и степени структурных изменений основы металла.

Сборка опытных образцов осуществлялась таким образом, чтобы максимально сымитировать реальное соединение и зазор. При пайке образцов использовались вакуумные печи со степенью разрежения вакуума не менее 10^{-4} мм рт. ст.

Для каждого припоя отрабатывался временной и температурный режим пайки. После проведения вакуумной пайки образцы подвергались визуальному контролю. Во внимание принимались форма и размер галтелей, смачиваемость, растекаемость припоя. Далее изготавливались образцы для испытаний на определение физико-механических свойств по

ГОСТ 28830-90 и ГОСТ 1497-84, а также образцы для металлографического анализа. Испытания на определение прочностных характеристик проводились на разрывной машине FP-100/1. Металлографический анализ проводился на базе оптических микроскопов AT30 и BX51-OLYMPUS.

Результаты исследования

Основные результаты по определению механических свойств образцов паяной конструкции различными припоями в зависимости от технологических параметров процесса для исследуемых материалов представлены в таблице 3. В результате проведенных исследований установлено, что припои на основе никеля обеспечивают оптимальный комплекс механических и технологических характеристик для высокотемпературной вакуумной пайки выбранных марок материалов и способствуют формированию качественного паяного соединения. Соединения, полученные данными припоями, имеют прочность паяных соединений на разрыв, соизмеримой с пределом текучести основного материала, что свидетельствует о высокой адгезии припоев к основе.

Металлографический анализ паяных образцов показал, что припои на основе никеля формируют швы толщиной до 50-60 мкм. Наблюдается диффузионное проникновение припоя в границы зёрен основного металла.

Таблица 3. Механические свойства паяных образцов

Исследуемый материал	Марка припоя	Предел прочности, МПа
Сталь 07Х16Н6	Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn	920
	Ni-Si-B	402
	Ni-Cr-Fe-Si-B-Co	907
	Ni-Cr-Fe-Si-B	850
	На основе Ni	815
Сталь 18ХГТА	Ni-Si-B	774
	Ni-Cr-Si	823
	Ni-Co-Fe	715
	Ni-Cr-Fe	735
Никелевый сплав 718 (N07718)	Ni-Cr-Si-B-Fe	943
	Ni-Si-B	915
	Ni-Cr-Si-Fe-B	856
	Ni-Co-Fe-Si-B	995
	На основе Ni	955
Type 630 (17400)	Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn	1012
	Ni-Cr-Fe-Si-B	988
	На основе Ni	1077

Заключение

По проведённому комплексу исследований, подбору припоев, результатам отработки временного и температурного режимов термической обработки были разработаны технологии изготовления рабочих колёс из данных марок материалов [4-6]. По разработанным технологическим процессам были изготовлены рабочие колеса центробежного компрессора. Результаты динамических испытаний рабочих колёс показали работоспособность конструкции.

Список литературы

1. Хисамеев И.Г. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов, Г.С. Баткис и др. - Казань: Изд-во «ФӘН», 2010. - 671 с.
2. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко. - М.: Машиностроение, 2003. - 784 с.
3. Петрунин И.Е. Справочник по пайке / И.Е. Петрунин. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
4. Поморцев Е.Н. Технология изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из стали 18ХГТА / Поморцев Е.Н., Чигарин В.И., Габдрахманова З.Р. // Труды XVIII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. - Казань, 2019. - С. 314-320.
5. Поморцев Е.Н. Исследование вакуумной пайки аустенитно-мартенситной стали припоями на основе никеля / Е.Н. Поморцев, Д.Е. Якимов, З.Р. Габдрахманова // Компрессорная техника и пневматика. - 2025. - №1. - С. 54-59.
6. Ибрагимов Е.Р. Исследование сплава на основе никеля 718 (N07718) для изготовления рабочих колёс центробежных компрессорных установок / Е.Р. Ибрагимов, Е.Н. Поморцев, З.Р. Габдрахманова // Компрессорная техника и пневматика. - 2022. - № 1. - С. 44-47.

ADVANCED DEVELOPMENT IN THE FIELD OF THE HIGH-TEMPERATURE SOLDERING OF IMPELLER MATERIALS FOR CENTRIFUGAL COMPRESSION MACHINES

D. E. Yakmov, E. N. Pomortsev, Z. R. Gabdrakhmanova

V.B. Shnepp NIIturbokompressor JSC, HMS Group,
40, Sibirskiy Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation

Absrtact. The article presents the main results of comprehensive research using new materials and technologies for the manufacture of impellers of centrifugal compressor machines. The advantages of high-temperature soldering technology in the manufacture of impellers of a centrifugal compressor are described. The results of research by the process development of a technology for soldering various materials of impellers using nickel-based solders are presented.

Keywords: centrifugal compressor, impeller, soldering, nickel, vacuum, high temperature.

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.