

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.

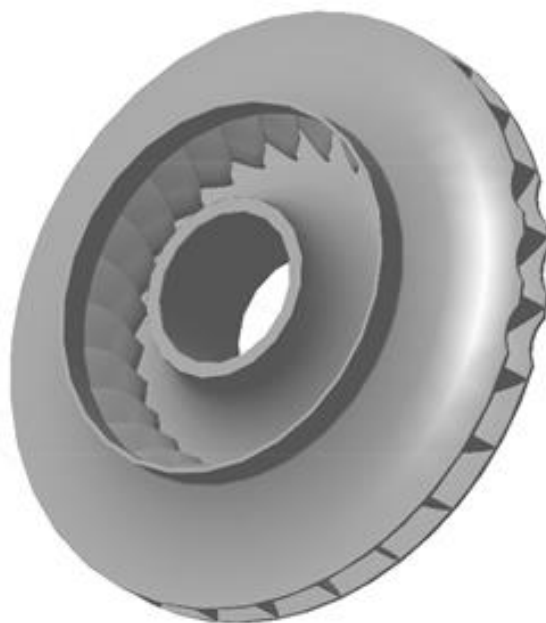


Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора

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
07X16H6	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	–	–	–
Туре 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			
07X16H6	880	1078	12	45
18ХГТА	800	930	9	45
Туре 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. Припой 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 симитировать 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 FR-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 припой 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 припой 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 07X16H6	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
	Ni-Si-B	774
Сталь 18ХГТА	Ni-Cr-Si	823
	Ni-Co-Fe	715
	Ni-Cr-Fe	735
	Ni-Cr-Si-B-Fe	943
	Ni-Si-B	915
Никелевый сплав 718 (N07718)	Ni-Cr-Si-Fe-B	856
	Ni-Co-Fe-Si-B	995
	На основе Ni	955
	Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn	1012
Type 630 (17400)	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 «ФЭН», 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.