

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ ПАЙКИ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

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

АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», г. Казань, Россия

zyhra.gabdrakhmanova@niitk.ru

Аннотация: Изготовление газодинамических узлов компрессорной техники является сложной технологической задачей, которая требует поиска новых технологий и подходов для создания высокоэффективного компрессорного оборудования. Представлены результаты работ по разработке технологии изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из аустенитно-мартенситной стали марки 07X16H6 с использованием метода вакуумной пайки. Рекомендован припой на основе никеля для пайки аустенитно-мартенситной стали, обеспечивающий высокую прочность паяного соединения и требуемую структуру основного металла, а также способствует гарантированному заполнению припоем зазоров. Исследовано влияние режимов термической обработки на микроструктуру и прочность паяного шва. Разработана технология пайки стали 07X16H6 припоем на основе никеля. Режим пайки одновременно совмещен с режимом закалки, что позволяет сократить технологический процесс и затраты на изготовление рабочего колеса компрессора. Приведены результаты разгонно-циклических испытаний рабочих колёс, изготовленных по разработанной технологии.

Ключевые слова: аустенитно-мартенситная сталь; вакуумная пайка; никелевые припои; центробежный компрессор; рабочее колесо.

INVESTIGATION OF VACUUM BRAZING WITH NICKEL SOLDERS FOR AUSTENOMARTENSITIC STEEL

Evgeny N. Pomortsev, Dmitry E. Yakimov, Zukhra R. Gabdrakhmanova

JSC NIIturbocompressor n.a. V.B. Shnepp, Kazan, Russia

zyhra.gabdrakhmanova@niitk.ru

Abstract: Fabrication of gas-dynamic units of compressor equipment is a complicated technological task, which requires the search for new technologies and approaches aiming to create highly efficient compressor equipment. The article describes the results of work on the development of technology for fabrication of centrifugal compressor impeller made of austenomartensitic steel 07X16H6 with the vacuum brazing method. The nickel solder is recommended for brazing of austenomartensitic steel, which provides high strength of the brazed joint and the required structure of the base metal, and also promotes guaranteed filling of gaps by the solder. The influence of heat treatment conditions on the microstructure and strength of the solder joint has been investigated. The technology of brazing 07X16H6 steel with nickel solder has been developed. The brazing mode is simultaneously combined with hardening mode, which allows to shorten the technological process and reduce the costs of compressor impeller fabrication. The results are provided for overspeed cyclic tests of impellers fabricated by the developed technology.

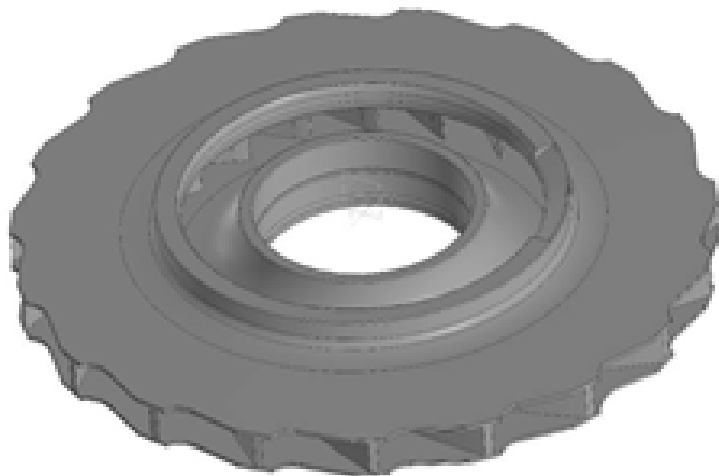
Keywords: austenomartensitic steel; vacuum brazing; nickel solders; centrifugal compressor; impeller.

Введение

В современных условиях наравне с качеством продукции и новыми конструкторскими решениями немаловажную роль играет экономическая эффективность изделия. Повсеместно актуален

вопрос снижения затрат на материалы и технологии, поэтому необходимо разрабатывать и использовать новые технологии и подходы к проектированию и изготовлению эффективного компрессорного оборудования.

Наиболее важными и ответственными узлами центробежного компрессора, независимо от его типа, являются рабочие колеса, которые работают в напряженно-деформированном состоянии. Конструкция закрытых рабочих колес имеет три основных элемента: основной и покровной диски, а также расположенные между ними лопатки (рис. 1). Рабочее колесо подвержено действию сил газового потока, центробежных сил и сил, возникающих в результате горячей посадки на вал. От эффективности рабочих колес зависит общая эффективность центробежного компрессора [



*Рис.1. 3d-модель
рабочего колеса компрессора*

Fig.1. 3D model of the compressor impeller

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.

На сегодняшний день на производствах АО «Казанькомпрессормаш» и АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» рабочие колеса центробежных компрессоров в основном изготавливают из аустенитно-мартенситной стали марки 07X16H6, которая отвечает требованиям, предъявляемым к материалу. В зависимости от конструкции рабочие колеса из данной марки изготавливаются при помощи сварки либо пайки в вакуумной печи. В данной работе рассматривается процесс вакуумной пайки как наиболее эффективного способа производства колёс из стали 07X16H6 любой конструкции, в особенности для малорасходных ступеней, где из-за малой высоты и ограниченного доступа к межлопаточному пространству использование других способов изготовления технически затруднительно.

Для пайки колес из стали 07X16H6 применяется припой ПЖК 1000. Несмотря на высокие показатели механических свойств паяных соединений, данный припой имеет высокую стоимость, поскольку основа припоя драгоценный металл – палладий. Существующий технологический процесс вакуумной пайки и последующей термообработки сопряжен со значительными материальными, трудовыми и энергозатратами. Высокотемпературная вакуумная пайка припоем на основе палладия осуществляется при 1250°C, что приводит к сильному росту зерна и образованию карбидной сетки при охлаждении с печью (рис. 2), что в последующем приводит к повышению склонности металла к хрупкости. Для стабилизации структуры стали применяется длительный и трудоёмкий термический цикл обработки после пайки (двухступенчатый отжиг, закалка с быстрым охлаждением в воду, обработка холодом и двухступенчатый отпуск).



Рис.2. Микроструктура образца паяного соединения 07X16H6 припоем марки ПЖК 1000 после пайки (до термообработки)

Fig.2. Microstructure of 07Cr16H6 joint sample soldered with PZhK 1000 solder after soldering (before heat treatment)

Материалы и методы

По результатам проработки справочных данных и консультаций с производителями припоев были определены несколько марок припоев (таблица 1).

Припои на основе никеля

Таблица 1

Припой	Основные элементы
Припой 1	Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn
Припой 2	Ni-Si-B
Припой 3	Ni-Cr-Fe-Si-B-Co
Припой 4	Ni-Cr-Fe-Si-B
Припой 5	Сведений не предоставлено производителем

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.

Для определения свойств паяных соединений изготавливались образцы. Сборка образцов под пайку осуществлялась таким образом, чтобы максимально симитировать реальное паяное соединение и зазор. Величина зазора составляла 50 мкм, равная толщине припойной ленты.

При пайке образцов использовались вакуумные печи на различных производственных площадках 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. Изготавливались образцы для испытаний на растяжение по ГОСТ 28830-90 и образцы для металлографического анализа.

Механические испытания на статическое растяжение проводили по ГОСТ 1497-84 при комнатной температуре на испытательной машине FP-100/1. Испытывали несколько образцов; полученные данные усредняли.

Металлографический анализ проводился с использованием анализатора фрагментов микроструктуры твёрдых тел на базе микроскопа оптического AT30 с системой цифрового изображения SIAMS. Металлографическое исследование образцов стали 07X16H6 проводилось на шлифах после электролитического травления.

Обсуждение результатов

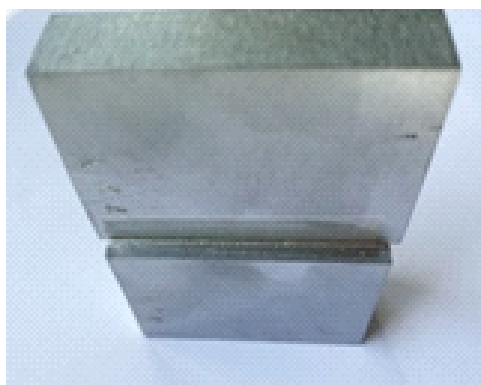
Для выбора марки припоя и определения оптимального режима пайки, обеспечивающих наиболее прочное соединение, проведены исследования прочности паяных соединений, результаты которых представлены в таблице 2.

Результаты испытаний паяных образцов

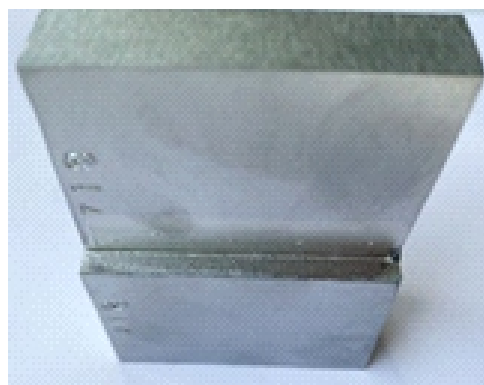
Таблица 2

Марка припоя	Предел прочности паяного соединения σ_b , МПа	Технологические особенности припоя
ПЖК 1000	1212	Хорошая текучесть, внешний вид шва и галтель удовлетворительные
Припой 1	920	Хорошая текучесть, внешний вид шва и галтель удовлетворительные
Припой 2	402	Внешний вид шва и галтель удовлетворительные
Припой 3	907	Хорошая текучесть, внешний вид шва и галтель удовлетворительные
Припой 4	850	Хорошая текучесть, внешний вид шва и галтель удовлетворительные
Припой 5	815	Внешний вид шва и галтель удовлетворительные

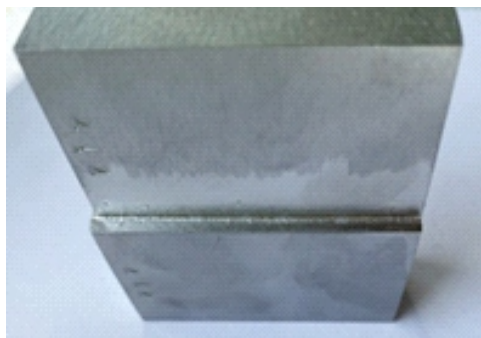
Внешний вид образцов после пайки представлен на рис. 3.



а)



б)



в)



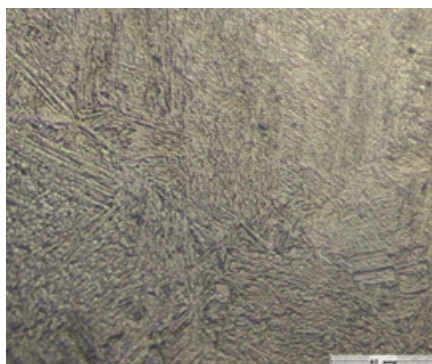
г)

Рис.3. Образцы после пайки различными припоями

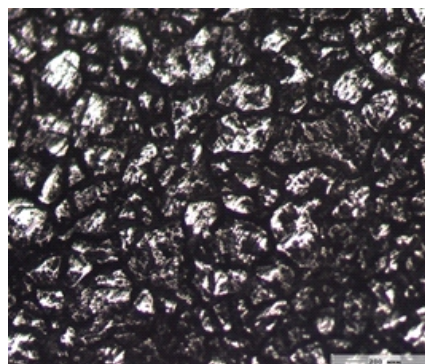
Fig.3. Samples after soldering with different solders

По результатам комплекса экспериментальных исследований образцов установлено, что наиболее стабильные результаты продемонстрировал припой на основе Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn. При визуальном осмотре наблюдалось хорошее смачивание припоем паяемого металла, затекание в капиллярные зазоры и формирование полных галтелей. Анализ механических испытаний паяных образцов показал, что полученные характеристики соответствуют требованиям для их работы в заданных условиях эксплуатации. Прочность паяных соединений достигала значений 920 ± 20 МПа.

Температура пайки данным припоем близка к температуре закалки стали 07X16H6, что позволяет выполнять совместный процесс закалки сплава с процессом пайки, с последующим быстрым охлаждением в газовой среде. Металлографический анализ указал на отсутствие в паяных соединениях дефектов и непропаев. Микроструктурный анализ показал, что в основном металле после пайки с сопутствующей термообработкой карбидная сетка отсутствует (рис. 4а), а величина зерна основного металла соответствует эталонам шкалы G5 - G6 по ГОСТ 5639-82 (рис. 4б).



а) ув. x500)



б) ув. x100)

Рис.4. Микроструктура образца паяного соединения 07X16H6 припоем на основе никеля после пайки и изотермической термообработки

Fig.4. Microstructure of 07X16H6 joint sample soldered with nickel solder after soldering and isothermal heat treatment

По результатам экспериментальных исследований образцов для пайки рабочих колес рекомендован припой на основе системы Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn и разработан технологический процесс пайки с последующей термообработкой. По разработанной технологии были изготовлены рабочие колеса центробежного компрессора (рис. 5). Разгонно-циклические испытания рабочих колес проводили в два этапа согласно разработанной программе испытаний с выполнением контрольных замеров основных геометрических размеров и неразрушающего контроля капиллярным методом проникающими веществами до начала и после испытаний. После циклических испытаний паяных рабочих колес изменений геометрических размеров, а также дефектов не обнаружено. Изготовленные рабочие колеса по разработанной технологии были установлены в ротор и в настоящее время находятся в эксплуатации.

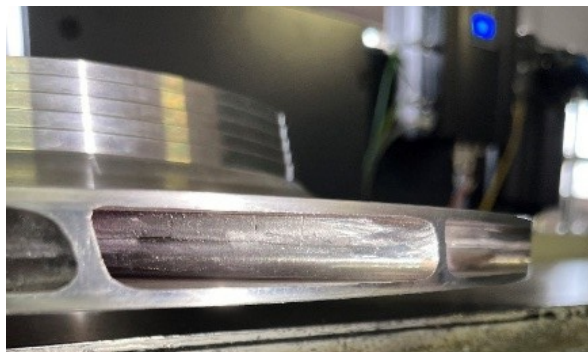


Рис.5. Рабочее колесо из стали 07X16H6, паяное припоем на основе никеля

Fig.5. Impeller made of 07X16H6 steel soldered with nickel solder

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что припой на базе системы Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn обеспечивает оптимальный комплекс механических и технологических характеристик для вакуумной пайки аустенитно-мартенситной стали марки 07X16H6 и способствует формированию качественного паяного соединения.

Установлено, что температура пайки припоем на базе системы Ni-Cr-Fe-Si-B-Mn близка к температуре закалки стали 07X16H6, что позволяет выполнять совместный процесс закалки сплава с процессом пайки. Исследование микроструктуры паяных соединений показало, что после пайки микроструктура основного металла не претерпевает критических структурных изменений. Определение механических свойств паяных соединений стали 07X16H6 показало, что прочность паяных соединений находится в пределах 920 ± 20 МПа, что соответствует требованиям для их работы в заданных условиях эксплуатации.

По результатам проведенных работ изготовлены рабочие колеса центробежного компрессора из аустенитно-мартенситной стали марки 07X16H6. Результаты динамических испытаний рабочих колёс показали работоспособность конструкции.

Разработанная технология пайки с сопутствующей закалкой припоем на основе никеля исключает несколько операций, необходимых при пайке припоем ПЖК 1000, что позволяет сократить технологический процесс и затраты на изготовление, тем самым снизить себестоимость изготовления рабочего колеса на 10-15%.

Данная работа была представлена на V республиканском конкурсе «Инженер года РТ», в котором она стала победителем в номинации «Машиностроение».

Литература

1. Хисамеев, И.Г. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов, Г.С. Баткис, Я.З. Гузельбаев; ЗАО «НИИтурбокомпрессор им.В.Б.Шнеппа», ОАО «Казанькомпрессормаш», Казанский государственный технологический университет, Академия наук Республики Татарстан. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. – 671 с. - ISBN 978-5-9690-0111-4. – Текст: непосредственный.
2. Поморцев, Е.Н. Внедрение припоев на никелевой основе в производство центробежных компрессоров / Е.Н. Поморцев, В.И. Чигарин, А.Н. Липатов, Б.М. Лившиц. – Текст: непосредственный // Компрессорная техника и пневматика. - 2014. - №4. – С. 43-47.
3. Оспенникова, О.Г. Технология высокотемпературной диффузионной пайки конструкции типа «Блиск» из разноименных сплавов / О.Г. Оспенникова, В.И. Лукин, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, И.А. Галушка. – Текст: непосредственный // Труды ВИАМ: Жаропрочные стали и сплавы. - 2019. - №9 (81). – С. 26-37.
4. Столянков, Ю.В. Пайка тонкостенных элементов конструкций аморфным ленточным припоем ВПр51 / Ю.В. Столянков, В.И. Лукин, А.Н. Афанасьев-Ходыкин. – Текст: непосредственный // Труды ВИАМ: Жаропрочные стали и сплавы. - 2018. - №2 (62). – С. 23-29.

Маркова, И.И. Киселев, А.Г. Николаев, В.С. Новосадов, В.В. Орлова, А.Н. Парфенов, И.Н. Пашков, В.Н. Семенов, В.П. Фролов, Ю.Ф. Шейн; под ред. Е.И. Петрунина. - [3-е изд., перераб. и доп.] – Москва: Машиностроение, 2003. – 480 с.: ил. - ISBN 5-217-03167-0, 5-94275-047-5. – Текст: непосредственный.

6. Лашко, С.В. Пайка металлов / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. - [4-е изд., перераб. и доп.] – Москва: Машиностроение, 1988 – 376 с.: ил. – ISBN 5-217-00268-9. – Текст: непосредственный.

References

1. Hisameev, I.G. Proektirovanie i ekspluatatsiya promyshlennykh centrobezhnykh kompressorov / I.G. Hisameev, V.A. Maksimov, G.S. Batkis, Ya.Z. Guzel'baev; ZAO «NII turbokompressor im. V.B. Shneppa», OAO «Kazan' kompressormash», Kazanskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, Akademiya nauk Respubliki Tatarstan. – Kazan': Izd-vo «FON», 2010. – 671 s. - ISBN 978-5-9690-0111-4. – Текст: непосредственный.

2. Pomortsev, E.N. Vnedrenie pripoev na nikel'noj osnove v proizvodstvo centrobezhnykh kompressorov / E.N. Pomortsev, V.I. Chigarin, A.N. Lipatov, B.M. Livshic. – Текст: непосредственный // Компрессорная техника и пневматика. - 2014. - №4. – С. 43-47.

3. Ospennikova, O.G. Tekhnologiya vysokotemperaturnoj diffuzionnoj pajki konstrukcii tipa «Blisk» iz raznoimennykh splavov / O.G. Ospennikova, V.I. Lukin, A.N. Afanas'ev-Hodykin, I.A. Galushka. – Текст: непосредственный // Trudy VIAM: Zharoprochnye stali i splavy. - 2019. - №9 (81). – С. 26-37.

4. Stolyankov, Yu.V. Pajka tonkostennykh elementov konstrukcij amorfnykh lentochnykh pripoem VPr51 / Yu. V. Stolyankov, V.I. Lukin, A.N. Afanas'ev-Hodykin. – Текст: непосредственный // Trudy VIAM: Zharoprochnye stali i splavy. - 2018. - №2 (62). – С. 23-29.

5. Petrunin, I.E. Spravochnik po pajke / I.E. Petrunin, Yu.I. Bereznikov, R.R. Bun'kina, I.I. Il'ina, I.Yu. Markova, I.I. Kiselev, A.G. Nikolaev, V.S. Novosadov, V.V. Orlova, A.N. Parfenov, I.N. Pashkov, V.N. Semenov, V.P. Frolov, Yu.F. Shejn; pod red. E.I. Petrunina. - [3-е изд., перераб. и доп.] – Москва: Mashinostroyeniye, 2003. – 480 с.: ил. - ISBN 5-217-03167-0, 5-94275-047-5. – Текст: непосредственный.

6. Lashko, S.V. Pajka metallov / N.F. Lashko, S.V. Lashko. - [4-е изд., перераб. и доп.] – Москва: Mashinostroyeniye, 1988 – 376 с.: ил. – ISBN 5-217-00268-9. – Текст: непосредственный.

Авторы публикации

Поморцев Евгений Николаевич – начальник отдела перспективных материалов и технологий АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: evgeniy.pomortsev@mail.ru

Якимов Дмитрий Евгеньевич – первый заместитель управляющего директора АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: dmitriy.yakimov@niitk.ru

Габдрахманова Зухра Равкатовна – канд. техн. наук, начальник бюро отдела перспективных материалов и технологий АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», 420029, Российская Федерация, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д.40; e-mail: zyhra.gabdrakhmanova@niitk.ru

Authors of the publication

Evgeny N. Pomortsev, Head of Advanced Materials and Technologies Department, JSC NIITurbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: evgeniy.pomortsev@mail.ru

Dmitry E. Yakimov, First Deputy Managing Director, JSC NIITurbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: dmitriy.yakimov@niitk.ru

Zukhra R. Gabdrakhmanova, PhD in Engineering, Head of Bureau, Advanced Materials and Technologies Department, JSC NIITurbocompressor n.a. V.B. Shnepp, address: 40, Sibirsky Trakt str., Kazan, 420029, Russian Federation; e-mail: zyhra.gabdrakhmanova@niitk.ru

Поступила в редакцию: 10.02.2025

Принята в печать: 03.03.2025