

Компрессорная техника и пневматика



Compressors & Pneumatics

3/сентябрь
2023

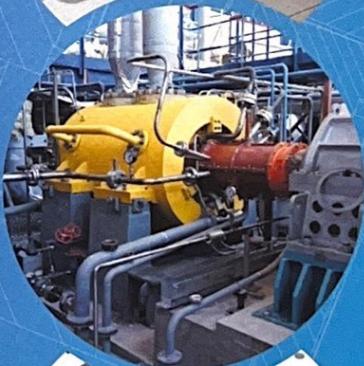


НЕВИНТЕРМАШ

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ
И НАГНЕТАЕЛИ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
ИЗГОТОВЛЕНИЕ, РЕКОНСТРУКЦИЯ
И МОДЕРНИЗАЦИЯ ЦКМ**

Газодинамические испытания,
инженерные услуги, экспертиза
промышленной безопасности,
пусконаладка, поставка
запасных частей.



Санкт-Петербург
пр. Добролюбова,
11Е, пом. 147

+7 812 677 07 71
mail@nimturbo.ru
nimturbo.ru





Научно-технический
и информационный журнал

Журнал зарегистрирован
в Минпечати РФ.
Рег. свид. ПИ №7 – 11904

Учредители

Ассоциация компрессорщиков
и пневматиков.
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет».

АО «НИИтурбокомпрессор
им. В.Б. Шнеппа» (Группа ГМС).

Издатель
ФГБОУ ВО «КНИТУ»

Главный редактор
Хисамеев И.Г.- д.т.н., проф.,
член-корр. АН РТ
Khisameev I.G., d-r of Eng. Sc. Pnot,
Corresponding Member of the AS RT
ikhisameev@mail.ru

Зам. главного редактора
Аляев В.А. - д.т.н., проф.
Alyayev V.A., d-r of Eng. Sc. pnot

Ответственный секретарь
Ханжин А.М. Khanjin70143@mail.ru

Редакционная коллегия

Амин Хаджу – д.т.н. (Германия)
Amin Haghjoo (Germany) PhD Techology
Leader

Бурмистров А.В.- д.т.н., проф.
Burmistrov A.V., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Визгалов С.В.- к.т.н.

Vizgalov S.V., cand. of Eng. Sc.

Галеркин Ю.Б.- д.т.н., проф.

Yu. B.Galerkin - d-r of Eng. Sc. Pnot.

Демихов К.Е.- д.т.н., проф.

Demikhov K.E., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Захаренко В.П.- д.т.н., проф.

Zakharenko V.P., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Игнатьев Д.К.- к.т.н. (США)

Ignatiev D.K (USA), PhD (Eng).

Кузнецов Л.Г.- д.т.н., проф.

Kuznetsov L.G., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Кулагин В.А.- д.т.н., проф.

Kulagin V.A., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Скрынник Ю.Н.- к.т.н.

Skrinik Yu.N., cand. of Eng. Sc.

Сухомлинов И.Я.- д.т.н., проф.

Sukhomlinov I.Ya., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Цыганков А.В.- д.т.н., проф.

Tcigankov A.V., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Шайхутдинов А.З.- к.т.н.

Shaikhutdinov A.Z., cand. of Eng. Sc.

Юша В.Л.- д.т.н., проф.

Yusha V.L., d-r of Eng. Sc. Pnot.

Ян Крысинский – д.т.н., проф. (Польша)

Ian Krysinski (Poland), D.Sc., PhD., D.h.c.

Ян Кеннет Смит – д.т.н., проф. (Англия)

Ian Kenneth Smith (UK), B.Sc (Eng), DIC, PhD

Дизайн и компьютерная верстка

Ханжина М.А.

Адрес редакции

420015, Казань, ул. К.Маркса, 68.

Тел. (843) 231-89-49

Журнал входит в перечень ВАК РФ

Юридическую ответственность
за достоверность рекламы несут
рекламодатели. Полная или частичная
перепечатка материалов допускается только
с письменного разрешения редакции.

© «Компрессорная техника и пневматика», 1991

Сдано в набор 14.09.2023

Подписано в печать 29.09.2023

Формат 60-90/8. Печать офсетная.

Усл.-печ. л. 5.0. Заказ 020825

Отпечатано в ООО «ВИЗАРД»
г. Казань, ул. Пр. Победы, д. 78, п. 413

Компрессорная техника и пневматика

Compressors & Pneumatics

3/сентябрь
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Конференция «Компрессорное оборудование
и ГТУ для газотранспортной системы» - восстановление
традиции ежегодного Международного симпозиума «Потребители
компрессоров и компрессорного оборудования» СПбПУ 2

Расчет и проектирование

И.К. Прилуцкий, И.В. Наумчик, М.В. Помощник,
Ю.И. Молодова, Ю.В. Татаренко. Прогноз текущих
и интегральных параметров ступени компрессора с линейным
приводом при переменном ходе поршня и постоянной
теоретической производительности 6

А.Г. Никифоров. Ресурс бессмазочных малорасходных
поршневых компрессоров 13

И.М. Гаязов, Р.Ф. Шарафеев, А.Г. Егоров, И.Р. Сагибиров.
Численный анализ устойчивости штока оппозитного компрессора
при применении газостатических опор скольжения 18

А.М. Ибраев, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев.
Анализ возможности использования одноступенчатого цикла
Карно для оценки эффективности двухступенчатых циклов
парокомпрессионных холодильных машин 23

Техника

И.В. Ворошилов, Д.Н. Копачев, В.В. Грицай, Д.С. Лопатин,
С.А. Шашерина. Освоение морского сегмента азотных станций
как часть стратегии по импортозамещению 26

Эксплуатация

А.Д. Ваняшов, Д.В. Бычков, А.А. Беликов. Анализ фактических
эксплуатационных режимов циркуляционных центробежных
компрессоров водородсодержащего газа 36

Материалы

Р.Г. Сибгатуллин, Ю.А. Абросимов, Е.Н. Поморцев,
А.И. Галимзянов, З.Р. Габдрахманова, М.А. Ишмуратов,
Р.Р. Гараев. Разгонно-циклические испытания рабочих колес
из материала 18ХГТА 42

**XIX МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ** по компрессорной технике, посвященная
100-летию со дня рождения В.Б. Шнеппа (МНТК НТК 2024) 46

Материалы

УДК 621.515:621.45.018.2

Разгонно-циклические испытания рабочих колес из материала 18ХГТА

Р.Г. Сибгатуллин, Ю.А. Абросимов, Е.Н. Поморцев, А.И. Галимзянов,

З.Р. Габдрахманова, М.А. Ишмуратов, Р.Р. Гараев

(АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань)

В данной статье рассматриваются циклические испытания экспериментальных рабочих колес сварной и паяной конструкции, изготовленных из конструкционной стали 18ХГТА для оценки устойчивости материала к нагрузкам в режиме «разгон-останов» и разгонные испытания, вплоть до начала разрушения колес. Основной целью данной работы является разработка рекомендаций по диапазону применения стали типа 18ХГТА со специальным химическим составом для изготовления рабочих колёс центробежного компрессора, в качестве замены стали марки 07Х16Н6, применяемой в настоящее время. Перед началом циклических испытаний были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния рабочего колеса, состоящие из: определение натяга, оценки прочности колеса при различных частотах вращения. Установлено, что предельно допустимой расчетной частотой вращения для стали 18ХГТА являются 10400 об/мин и 11000 об/мин. Перед разгонными испытаниями и после каждого цикла проводились измерения геометрических размеров экспериментальных колес, а также неразрушающий контроль капиллярный, методом проникающими веществами. Показано, что проведенные циклические испытания экспериментальных рабочих колес сварной и паяной конструкции, изготовленных из стали 18ХГТА, подтвердили устойчивость материала к нагрузкам в режиме «разгон-останов». По результатам комплексных исследований по разработке технологии изготовления рабочих колёс сварной и паяной конструкции, было установлено, что сталь 18ХГТА со специальным химическим составом можно применять в компрессорах, которые, работают на воздухе, природном газе и других инертных некоррозионных газах.

Ключевые слова: центробежный компрессор, рабочее колесо, сталь 18ХГТА, разгон, расчет напряженно-деформированного состояния, циклические испытания.

Overspeed and cyclic testing of impellers from the material of 18KhGTA

R.G. Sibgatullin, Yu.A. Abrosimov, E.N. Pomortsev, A.I. Galimzyanov, Z.R. Gabdrakhmanova, M.A. Ishmuratov, R.R. Garaev.

(NIIturbokompressor named after V.B. Shneppe, HMS Group)

This article discusses cyclic test of experimental impellers of welded and brazed design, made of constructional steel 18KhGTA for assessment the stability of the material to loads in the "overspeed-stop" mode and overspeed test up to the start of wheel failure. The main purpose of this work is to develop recommendations on the range of application of 18KhGTA type steel with a special chemical composition for the production of centrifugal compressor impellers as a replacement for 07Kh16N6 steel grade currently used. Before the start of cyclic test, calculations of the stress-strain state of the impeller were carried out, consisting of: determination of interference, assessment of the strength of the wheel at various speeds. It has been established that the maximum allowable design speed for steel 18KhGTA is 10400 rpm and 11000 rpm. Before the overspeed test and after each cycle, the geometric dimensions of the experimental wheels were measured, as well as non-destructive testing by the capillary method with penetrating substances. It is shown that the carried out cyclic tests of experimental impellers of welded and brazed design, made of steel 18KhGTA, confirmed the resistance of the material to loads in the "overspeed-stop" mode. Based on the results of comprehensive research on the development of technology for the production of welded and brazed impellers, it was found that 18KhGTA steel with a special chemical composition can be used in compressors that operate on air, natural gas and other inert non-corrosive gases.

Keywrds: centrifugal compressor, impeller, steel 18KHGTA, overspeed, stress-strain analysis, cyclic test.

Центробежный компрессор является одним из основных типов установок в компрессоростроении, который обеспечивает успешное развитие и стабильную работу нефтегазовой, нефтехимической, машиностроительной и других отраслей [1]. К числу наиболее ответственных деталей компрессора относятся рабочие колёса (рисунок 1), которые работают в напряженно-деформированном состоянии. Рабочее колесо подвержено действию значительных сил

реакции газового потока, действию центробежных сил и действию сил в месте посадки на вал. Выбор материала колёс осуществляется, исходя из свойств материала в рабочих условиях эксплуатации. 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.





Рисунок 1 – 3d-модель рабочего колеса компрессора

В настоящее время одним из основных материалов, применяемых для рабочих колес центробежных компрессоров, изготавливаемых на базе АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» и ОАО «Казанькомпрессормаш», является коррозионно-стойкая сталь аустенитно-мартенситного класса марки 07Х16Н6. Несмотря на высокие показатели механических свойств и коррозионной стойкости данной стали, производственный процесс отличается высокой трудоемкостью, ввиду длинного технологического цикла термической обработки. Также нецелесообразно использование данной марки стали для рабочих колес центробежных компрессоров, компримирующих некоррозионные газы.

Эффективной заменой стали 07Х16Н6 для рабочих колес центробежных компрессоров может стать конструкционная легированная сталь 18ХГТА. Химический состав и механические свойства сталей для рабочих колёс представлены в таблицах 1-2 [2].

Химический состав марок сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	B
07Х16Н6	0,05-0,09	<0,8	<0,8	15,5-17,5	5,0-8,0	-	-	-	-	-
18ХГТА	0,17-0,23	0,8-0,1	0,17-0,37	1,0-1,3	0,1-0,3	0,05-0,15	0,02-0,05	0,03-0,09	-	0,002-0,005

Механические свойства сталей после термообработки

Марка материала	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость KСU, Дж/см ²	Твердость HB
	Не менее					
07Х16Н6	880	1078	12	45	78	341-415
18ХГТА	800	930	9	45	78	277-331

Но применение новых материалов требует проведения обширных научных исследований, включая разработку методики расчета напряженно-деформированного состояния рабочего колеса компрессора из стали 18ХГТА, дающей объективную оценку прочности рабочего колеса при разнообразных внешних нагрузках.

Поэтому целью данной работы является рассмотрение, с точки зрения прочности, возможности замены стали 07Х16Н6 на конструкционную легированную сталь 18ХГТА со специальным химическим составом для изготовления рабочих колёс центробежных компрессоров.

В качестве объектов исследований были выбраны экспериментальные рабочие колеса, выполненные аргонно-дуговой сваркой и пайкой.

Перед началом циклических испытаний были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния экспериментальных рабочих колес, включающие следующие этапы [3, 4]:

- 1) определение натяга из условия прочности ступичной части колеса;
- 2) оценка прочности колеса по программе ANSYS при частоте разгона $n_p = 10400$ об/мин;
- 3) оценка прочности колеса по программе ANSYS с натягом при частоте $n_p = 11000$ об/мин;
- 4) определение частоты вращения по программе ANSYS, при которой максимальная интенсивность напряжений в лопаточной части не будет превышать $1,3\sigma_b = 1218$ МПа;
- 5) определение частоты вращения по программе ANSYS, при которой происходит освобождение двух поясков;
- 6) оценка прочности колеса по программе ANSYS с натягом при частоте $n_p = 16700$ об/мин.

Таблица 1



Результаты расчета напряженного состояния колеса показали, что максимальная интенсивность напряжений, наблюдается на входе в рабочее колесо, в месте стыка основного диска и лопатки. Было установлено, что предельно допустимой расчетной частотой вращения для стали 18ХГТА являются 10400 об/мин и 11000 об/мин. Изолинии интенсивности напряжений при данных частотах приведены на рисунке 2.

Циклические испытания экспериментальных рабочих колес в режиме «разгон-останов» были выполнены при следующих условиях:

1) для сварного колеса при частотах вращения: 11000 об/мин; 13000 об/мин; 14000 об/мин; 14600 об/мин;

2) для паяного колеса при частотах вращения: 11000 об/мин; 13000 об/мин; 14600 об/мин; 16700 об/мин.

До начала испытаний и после каждого цикла разгона проводился неразрушающий контроль рабочих колес методом ПВК (капиллярный метод проникающими веществами), а также проводились измерения геометрических размеров.

На разгонной частоте вращения 14300 об/мин произошли изменения геометрических размеров на периферии основного и покрышного дисков свар-

ного колеса. На частоте вращения 16700 об/мин произошло резкое увеличение температуры масла и вибрации в подшипниках стенда разгона. После выемки колеса из стенда был проведен неразрушающий контроль колеса методом ПВК, дефектов не обнаружено, однако, измерительный контроль показал значительное изменение геометрических параметров колеса, что свидетельствует о пластических деформациях колеса от центробежных сил. Поверхности покрышного и основного дисков сварного колеса приняли волнообразную форму (рисунок 3). Максимальные расчетные напряжения в колесе на частоте вращения 16700 об/мин достигают значения 2321 МПа, что в 2,5 раза превышает предел прочности материала 18ХГТА (рисунок 4).

Для паяного рабочего колеса на максимальной разгонной частоте вращения 14600 об/мин изменений геометрических размеров не произошло.

Таким образом, проведенные циклические испытания на разгонном стенде экспериментальных рабочих колес сварной и паяной конструкции, изготовленных из стали типа 18ХГТА, подтвердили устойчивость материала к нагрузкам в режиме «разгон-останов». По результатам расчета напряженного состояния колеса, а также циклических испытаний, принимаем частоту вращения 11000 об/мин пре-

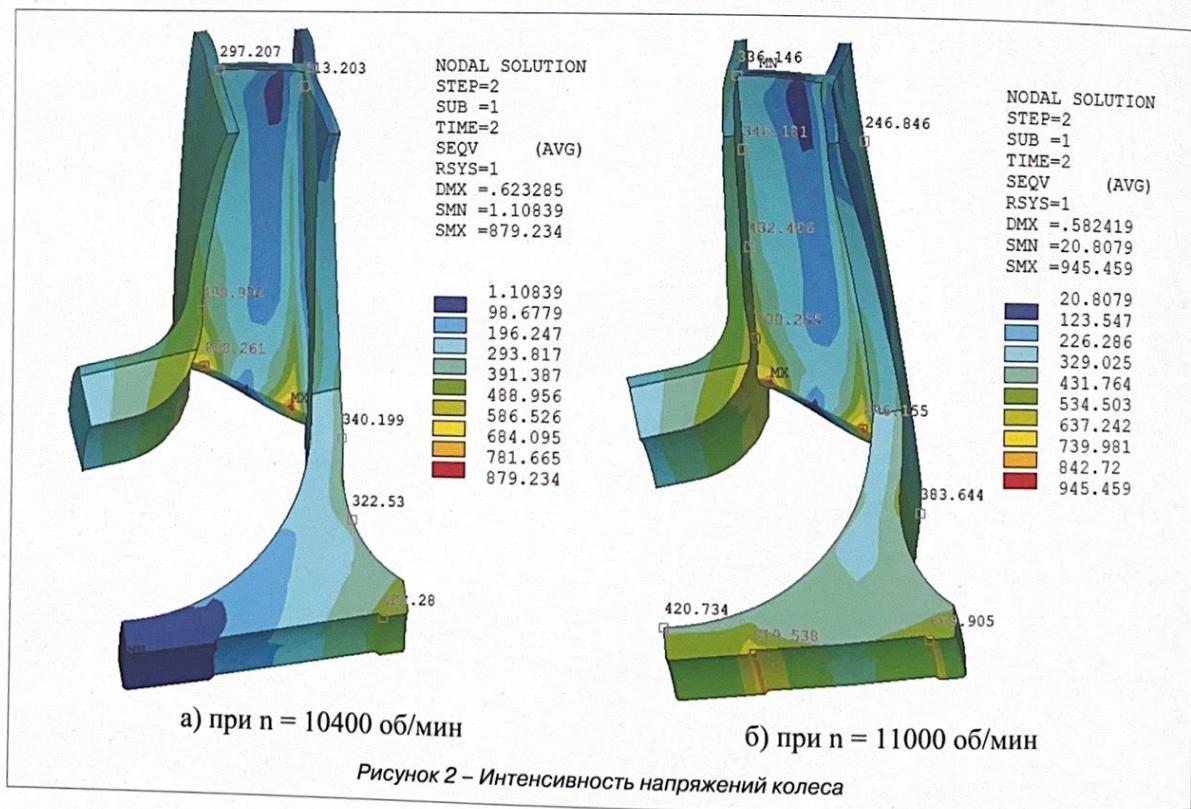




Рисунок 3 – Сварное рабочее колесо после проведения разгонных испытаний при частоте вращения 16700 об/мин

дельно допустимой частотой вращения колеса из стали 18ХГТА.

Результатом комплекса экспериментальных работ по разработке технологии изготовления рабочих колёс центробежного компрессора из стали 18ХГТА со специальным химическим составом паяной и сварной конструкции стала технологическая инструкция «Термическая обработка и требования к качеству материала сварных и полуоткрытых рабочих колёс центробежных компрессорных машин из стали

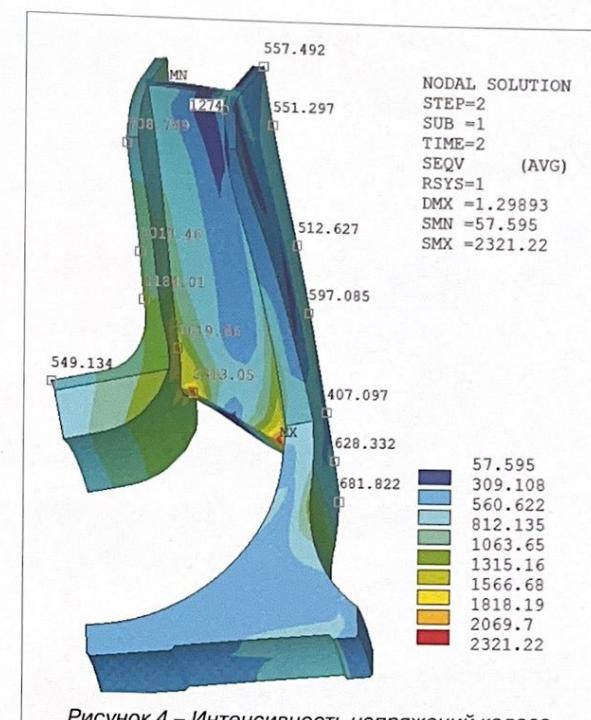


Рисунок 4 – Интенсивность напряжений колеса при $n = 16700$ об/мин

18ХГТА». Сталь 18ХГТА предполагается применять в компрессорах, работающих на природном газе, воздухе, азоте и других некоррозионных газах [5].

Список литературы

1. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов, Г.С. Баткис, Я.З. Гузельбаев – Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. – 671 с.
2. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
4. Программный комплекс ANSYS. Версия 5.2., ANSYS Revision 5.2 SAS IP August 31, 1995. ANSYS, Inc. Is a UL registered ISO 9001: 1994 Company.
5. Технология изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из стали 18ХГТА / Е.Н. Поморцев, В.И. Чигарин, З.Р. Габдрахманова // Труды XVIII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. – Казань: Изд-во «Слово», 2019. – С. 314-320.

A poster for the All-Russian Festival 'SCIENCE+'. The main title 'ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКА +' is written in large white letters. Below it, the dates '6-8 ОКТЯБРЯ' and location 'В МОСКВЕ' are listed. The background is blue with a grid of various scientific and technical icons, including a microscope, a speech bubble, a person silhouette, a microphone, and a atomic symbol. The bottom left corner has the word 'Реклама' and the bottom right corner has the page number '45'.

