

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА УЗЛОВ КОМПРЕССОРНЫХ МАШИН

А. Ф. Сарманаева, Н. В. Соколов, О. Ю. Паранина,
В. В. Кузовов, Ю. В. Сидорова, И. С. Давлетшин,
И. Н. Лотфуллин, М. В. Коршунов

АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС,
Россия, 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 40

Значительная часть компрессорного парка России состоит из центробежных и винтовых компрессоров иностранного производства, которые с наработкой и амортизацией требуют ремонта согласно регламенту или модернизации из-за изменившихся технологических условий эксплуатации. Поступление запасных частей, необходимых для проведения ремонта, усложнилось из-за удорожания или отсутствия логистики. Это приводит к проблеме поддержания компрессорного оборудования в рабочем состоянии или его простаиванию. Изготовление запасных частей проблематично из-за отсутствия у эксплуатирующих организаций конструкторской документации. Предложение специалистами АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» услуг по реверс-инжинирингу запасных деталей и узлов компрессоров позволяет улучшить и решить проблему поддержания эффективного состояния иностранного оборудования. При этом в статье описаны проблемы, которые возникают при проведении реверс-инжиниринга роторов центробежных и винтовых компрессоров, пространственного профиля рабочих колес и подшипников жидкостного трения. Указаны основные моменты, способствующие успешному выполнению задач по реверс-инжинирингу, определена точность 3D-сканирования, а также представлены способы задания номинальных размеров и допусков отклонения.

Ключевые слова: компрессор, замена оборудования, реверс-инжиниринг, точность 3D-сканирования, ротор компрессора, рабочее колесо, опорный и упорный подшипники скольжения.

Введение

АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС (далее АО НТК) является ведущим отечественным научно-исследовательским и проектно-конструкторским центром в области создания винтовых и центробежных компрессорных установок [1]. Накопленный многолетний опыт научных исследований, проектирования и практических испытаний техники позволяет в последнее время активно развивать услуги реверс-инжиниринга деталей и узлов компрессоров импортного производства. Возможность собственных стендовых испытаний разрабатываемого оборудования расширяет объем научно-исследовательских и проектно-конструкторских знаний. При реверс-инжиниринге перед конструкторами АО НТК ставится задача не только по созданию аналогичных копий запасных частей, но и необходимость анализа рабочих условий эксплуатации компрессоров и их изменение с течением времени при наработке. При этом естественно возникают некоторые сложности с воссозданием геометрических размеров и повторением материалов разрабатываемых узлов, которые должны соответствовать фактическим условиям эксплуатации и рабочим параметрам импортных компрессоров. Описанию подобных проблем посвящена данная статья.

Основная часть

Успешному выполнению поставленных задач по точному воспроизведению деталей и узлов компрессоров способствуют следующие моменты:

- 1) анализ и глубокое изучение эксплуатационной документации об импортозамещаемом изделии;
- 2) разумное сочетание и совместное использование 3D-сканирования и инструментальных замеров. Замеры и сканирование выполняются совместно;
- 3) подбор материалов. При этом используются данные, содержащиеся в эксплуатационной документации: паспорт, формуляр, сборочные чертежи и пр. Если документация отсутствует, то применяется экспресс-метод определения процентного содержания элементов, например, с помощью спектрального анализатора, с последующим подбором наиболее близкого по свойствам отечественного аналога;
- 4) использование в работе собственного опыта проектирования и изготовления подобных деталей и узлов;
- 5) фотофиксация деталей и узлов на всех этапах проведения реверс-инжиниринга сборочного изделия, в процессе разборки и отдельных деталей;
- 6) создание 3D-модели сборки верхнего уровня для контроля и выявления зазоров/наложений.

Таблица 1. Точность разных 3D-сканеров согласно паспортам

Table 1. The accuracy of different 3D-scanners according to the passports

№ п.п.	Сканер	Точность системы, мм	Объемная точность, мм/м
1.	ScanTech KSCAN Magic	0,02	0,015+0,03 (0,015+0,015 с системой фотограмметрии)
2.	Scantech SIMSCAN30	0,02	0,02+0,035
3.	Shining 3D FreeScan UE PRO		0,02+0,03 0,02+0,015 (с системой фотограмметрии)
4.	Shining 3D FreeScan Trio	0,02	0,02+0,03 0,02+0,015 (с системой фотограмметрии)
5.	HandySCAN BLACK	0,035	0,02+0,06
6.	HandySCAN BLACK Elite	0,025	0,02+0,04
7.	ZG AtlaScan	0,02	0,015+0,03 0,015+0,015 (с системой фотограмметрии)
8.	ZG RigelScan	0,01	0,015+0,035



Рис. 1. Ротор компрессора Elliott на опоре в процессе 3D-сканирования
Fig. 1. Elliott compressor rotor on a support during 3D-scanning

Следовательно, суммарные отклонения 3D-модели, полученной обработкой сканированных данных, от номинальных размеров деталей могут оказаться выше допустимых значений и оказывать существенное влияние на работу изделия. Например, зазор между подшипником и валом может выйти за пределы допустимых значений. В связи с этим нужно дополнительно перепроверять изделие на работоспособность за счет предварительных испытаний на стендах и при необходимости вносить соответствующие корректировки. Если такая возможность имеется, с целью минимизации рисков рекомендуется сначала изготовить опытную партию.

При проведении реверс-инжиниринга роторов центробежных компрессоров (ЦК) необходимо учитывать следующие моменты:

1) габариты ротора. Если позволяют габариты, то ротор можно разместить на станке и, следовательно прокручивая, произвести полное 3D-сканирование всей поверхности. Если этого нельзя выполнить в силу каких-либо причин: большие габариты или если сканирование проводится в плохо оборудованном месте, то допустимо отсканировать лишь верхнюю половину установленного на опоры ротора, охватывая чуть более 180° от оси (рис. 1, 2). Даже при таком методе обработки результатов возможно получить достоверную 3D-модель.

Некоторые затруднения могут возникнуть при сканировании шейки ротора под подшипники скольжения, требующей повышенной точности до 0,01 мм. Может получиться так, что внешняя опора ротора делает доступ к шейке труднодоступным как для сканирования, так и для инструментальных замеров;

2) степень изношенности. Для получения достоверных размеров требуется сканирование нового, не бывшего в эксплуатации оборудования, например, из комплекта ЗИП. На практике же часто приходится сканировать изношенные узлы, что создает некоторые сложности в определении истинного профиля, например, лопатки рабочего колеса или шейки ротора под подшипники.

При проведении реверс-инжиниринга важное значение приобретает точность измерения, влияющая на качество воспроизведения и отражающая близость результатов к истинному значению измеряемой величины. Точность количественно выражается погрешностью, которая в данном случае подразделяется на:

1) инструментальную: определяется основными метрологическими характеристиками средств измерения;

2) методическую: обусловлена несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях.

Результатом сканирования объекта с помощью оборудования является облако точек. Объемная точность полученных сканированных данных указана в табл. 1.

Из облака точек строится сетка, которая может отличаться от фактической формы сканируемого объекта, поскольку при ее построении применяются функции математической аппроксимации, сглаживания и упрощения поверхности. При разработке 3D модели на основе полученной сетки размеры, как правило, усредняют и округляют.

Следственно, погрешность при разработке 3D-модели с помощью 3D-сканирования может достигать 0,04...0,09 мм/м. Исходя из этого, при разработке РКД размеры, к которым предъявляются высокие требования по точности (например, толщина колодки подшипника скольжения), необходимо дополнительно контролировать соответствующими средствами измерений, например, штанген-циркулем.

При реверс-инжиниринге определение номинальных размеров усложняется тем, что к точности измерений добавляются допуски размеров, поскольку сканируется деталь, имеющая действительные размеры, отличающиеся от номинальных.

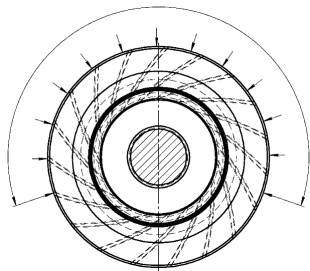


Рис. 2. Угол сканирования больше 180° при 3D-сканировании ротора ЦК
Fig. 2. The scanning angle is greater than 180° during 3D-scanning of the CC rotor

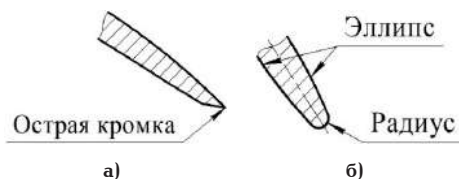


Рис. 3. Отличия входной кромки лопаток РК при заливке межлопаточного канала: после заливки (а) и при расчете (б)
Fig. 3. Differences between the inlet edge of the impeller blades when filling the inter-blade channel: after filling (a) and during calculation (b)

3) невозможность полной разборки. При сканировании разборных узлов компрессора, например, подшипников скольжения «пакетного» типа или сухих газовых уплотнений, есть возможность произвести подетальное сканирование. В свою очередь, ротор ЦК, как правило, полностью разобрать невозможно, поскольку рабочие колеса часто насаживаются на вал с предварительным натягом [1]. В этом случае анализируется информация о посадочных допусках и диаметрах поверхности ротора ЦК в предоставленных эксплуатационных документах или допуски и диаметры подбираются исходя из собственного опыта АО НТК изготовления подобных узлов [2, 3].

Одна из самых сложных задач при 3D сканировании — воспроизвести профиль лопаток рабочих колес (РК) ЦК [4]. Большая часть профиля скрыта между основным и покрывным дисками и недоступна для сканирования. Специалистами АО НТК применены два метода:

- срезание покрывного диска;
- заливка межлопаточной полости двухкомпонентным компаундом (пластиком/силиконом) с последующим сканированием полученной отливки с целью формирования слепков профилей рабочих лопаток.

Оба способа дают сопоставимую точность, но естественно первый значительно трудозатратен и не всегда выполним из-за потери оригинального РК. Заливка компаундом более проста, хотя и требует совершения большего количества операций при обработке скана: необходимо совместить в CAD-системе отливку и те поверхности лопаток на входе и выходе из РК, которые были «схвачены» 3D-сканером. Еще одним недостатком второго метода является практическая сложность воспроизведения входной кромки лопаток рабочего колеса (рис. 3).

Таблица 2. Сравнение характеристик компаундов
Table 2. Comparison of compound characteristics

Характеристики	Двухкомпонентный пластик (рис. 4а)	Двухкомпонентный силикон (рис. 4б)
Твердость по Шору по DIN 53505	70 D	30 A
Плотность	1,03 г/см ³	1,08 г/см ³
Время полного отверждения (при T = 23...25 °C)	до 24 часов	до 16 часов
Усадка	0,25 %	≤ 0,2 %



Рис. 4. Слепки лопаток РК, полученные из пластика (а) и силикона (б)
Fig. 4. Casts of impeller blades made of plastic (a) and silicone (b)

Отличие входной кромки лопатки на входе в РК от оригинального профиля приводит к снижению заданных газодинамических характеристик [5]. Для устранения погрешности 3D-сканирования дорабатывается обработанный скан отливки в CAD-системе.

Выбор того или иного компаунда обусловлен конфигурацией профиля лопатки (прямой или трехмерный), который влияет на сложность процесса извлечения слепка из полости колеса, условиями окружающей среды, временем отверждения двухкомпонентного компаунда, а также усадкой, коэффициент которой необходимо учитывать при конструировании геометрии профиля лопатки (табл. 2).

При выборе допусков на размеры лопаток РК помимо фактора усадки полученного слепка следует учитывать:

- погрешность при проведении сканирования слепков (настройки сканера);
- условия сканирования (освещенность, окружающая температура, возможная вибрация в помещении при сканировании);
- качество полученных слепков (сохранение геометрии в случае применения силикона и использования в данном случае армирующих осей);
- точность при обработке полученных сканов (облаков точек или полигональных моделей и доведение до твердотельной 3D-модели с округлением размеров до целых значений);
- точность при совмещении со сканом каналов рабочих колес.

Этапы реверс-инжиниринга рабочего колеса на примере центробежного компрессора Demag представлены в табл. 3.

Винтовые компрессоры являются одними из самых надежных видов компрессоров. Однако при длительной эксплуатации без надежного обслуживания и проверок составные части оборудова-

Таблица 3. Этапы реверс-инжиниринга рабочего колеса
 Table 3. Stages of impeller reverse engineering


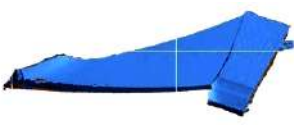
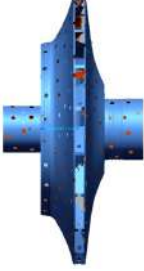
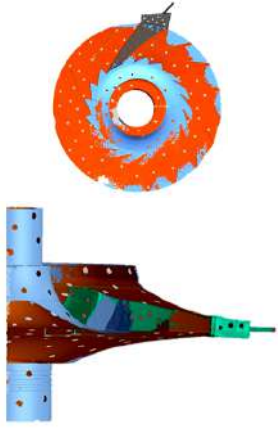
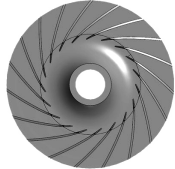
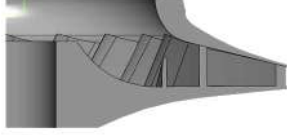
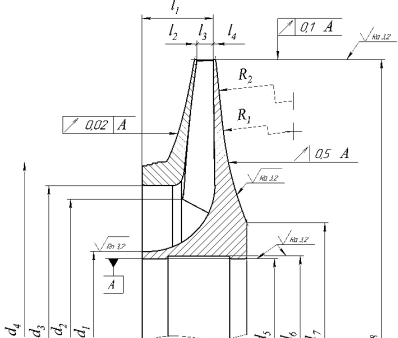
№ п.п.	Описание	Визуальное изображение
1.	Изготовление слепка профиля лопатки РК из силикона, подготовленного для 3D сканирования со светоотражающими метками и с армирующей осью	
2.	Построение полигональной модели слепка профиля лопатки РК из силикона	
3.	Построение полигональной модели РК	
4.	Совмещение полигональных моделей РК и слепка профиля лопатки (в разрезе)	
5.	Построение 3D-модели основного диска РК закрытого типа (модель STP), выполненная по результатам 3D сканирования РК и слепка профиля лопатки	
6.	Построение 3D-модели сборки РК закрытого типа (модель STP, в разрезе)	
7.	Получение конечного чертежа РК по построенной 3D-модели (в разрезе)	



Рис. 5. Внешний вид КИМ Zeiss Accura 12/30/10
Fig. 5. Appearance of the Zeiss Accura coordinate measuring machine 12/30/10

ния начнут выходить из строя. Роторы винтовых компрессоров наиболее часто подвержены износу рабочей поверхности. При этом значительное негативное влияние на качество роторов при работе компрессора оказывает попадание в камеру сжатия производственной пыли, металлической стружки, а также несоблюдение эксплуатационных норм и сроков проведения технического обслуживания.

Существует два пути реверс-инжиниринга роторов винтового компрессора:

1) на основании замеров профиля на координатно-измерительной машине (КИМ) Zeiss Accura 12/30/10 и его воспроизведения;

2) на основании новой разработки и изготовления профиля.

Реверс-инжиниринг с применением КИМ (рис. 5) на основании САД-модели исследуемых роторов используется в случае воспроизведения нового профиля. КИМ позволяет произвести быстрое и точное измерение с дальнейшим применением принципов систем автоматизированного проектирования и автоматизированного программирования для описания формы ротора.

Форму ротора удобно описывать его профилем — линией пересечения винтовой поверхности ротора какой-либо плоскостью. Чаще всего используется профиль торцевого сечения — сечения ротора плоскостью, перпендикулярной его оси. На основании полученных замеров КИМ позволяет получать координаты профиля в требуемом сечении. При этом КИМ оснащен активными сканирующими головками с наборами щупов различной формы и длины, чтобы обеспечить высокую точность проведения замеров для соблюдения формы размеров роторов и зазоров в компрессоре для сохранения его производительности и энергоэффективности.

Вначале проводятся замеры роторов, данные поступают в виде массива точек, на основании которых формируется сеточная, поверхностная или твердотельная модель роторов. Далее сканирован-



а)



б)

Рис. 6. Ротор винтового компрессора марки Aerzen, $Z_1/Z_2 = 3/4$:

а — внешний вид, б — 3D-модель ведущего ротора
Fig. 6. Rotor of Aerzen screw compressor, $Z_1/Z_2 = 3/4$:
a — appearance, б — 3D-model of the drive rotor

ные данные преобразовываются в модель в форматах STL или DMT и передаются на обработку в САМ-систему, которая позволяет подготовить управляющую программу для оборудования с числовым программным управлением, а далее — осуществить обработку на станке с ЧПУ.

В АО НТК с помощью реверс-инжиниринга роторов винтовых компрессоров (ВК) реализуются проекты по компрессорам следующих марок: Kobelco, Aerzen, Man Diesel & Turbo Se [2]. Например, выполнен замер пары импортных роторов марки Aerzen с соотношением зубьев ведущего и ведомого роторов: $Z_1/Z_2 = 3/4$, поврежденных в процессе эксплуатации (рис. 6а). Ввиду того, что данный профиль имеет нестандартные форму и соотношения зубьев роторов [6], было принято решение проводить воспроизведение профиля на основании замеров с применением КИМ Zeiss Accura 12/30/10. На основании полученных замеров на КИМ построены 3D-модели роторов винтового компрессора (рис. 6б), после чего осуществлялось их изготовление на специализированных станках с ЧПУ. В рамках данной работы была проведена дефектация, 3D-сканирование и образмеривание ведущего и ведомого роторов, проведен замер роторов на КИМ, получены координаты роторов и разработана РКД и технология изготовления винтовой части роторов.

В случае реверс-инжиниринга рациональнее заменять роторы импортных компрессоров роторами собственной разработки. Как правило, импортные винтовые компрессоры оснащены роторными элементами асимметричного профиля. При изготовлении роторов АО НТК занимается разработкой собственного запатентованного асимметричного высокоэффективного профиля роторов [7]. Как правило, применяются компрессоры с соотношением зубьев ведущего и ведомого роторов соответственно $Z_1/Z_2 = 4/6$.

Винтовые профильные поверхности ротора являются главными деталями двухвинтового компрессора. В настоящее время АО НТК для расчета профилей роторов используют специальные программы собственной разработки, основанные на методах теории зубчатого зацепления [6, 8]. Результатом расчета в данной программе являются координаты профиля ведущего и ведомого роторов в виде отдельных файлов.

При проведении реверс-инжиниринга *подшипников скольжения* ЦК и ВК особое внимание необходимо уделять величине рабочего зазора, который фактически определяет условия работы узла трения [9]. Размер зазора может быть указан на сборочном чертеже корпуса компрессора, в формуляре (паспорте) или др. отгрузочных документах

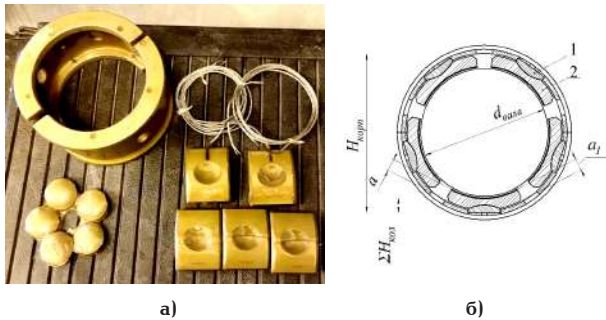


Рис. 7. Опорный подшипник со сферической опорой: перед 3D-сканированием (а) и в процессе проведения инструментальных замеров (б)

Fig. 7. Journal bearing with spherical support: before 3D-scanning (a) and during instrumental measurements (b)

иностранным компрессора. В случае же отсутствия подобных данных фактический рабочий зазор рассчитывается за счет разницы между неповрежденными статорными и роторными элементами подшипника скольжения. Например, для опорного подшипника с самоустанавливающимися колодками такой диаметральный зазор может быть вычислен по формуле [10]:

$$(D_{\text{корпуса}} - d_{\text{вала}} - d_{\text{зазора}}) = 2H_{\text{колодки}} \quad (1)$$

Следственно, при снятии размеров с оригинальных подшипников скольжения производится поддетальное 3D-сканирование (рис. 7а). При этом выполняются инструментальные замеры микрометром, штангенциркулем и нутромером с точностью до 0,01 мм размеров, определяющих рабочий зазор: шейки вала ротора $d_{\text{вала}}$, суммарной толщины колодки $\sum H_{\text{колодки}}$ и внутреннего диаметра корпуса $D_{\text{корпуса}}$ (рис. 7б). Измеряются несколько одинаковых деталей (минимум три) или в двух/трех разных местах одинаковой детали, например, расточки цилиндрического подшипника. Проведение нескольких замеров позволяет получить ряд числовых значений, на основе которых вычисляется разброс размеров от минимального до максимального. На основе этой информации позже назначаются предельные отклонения от номинального размера. Важное значение имеет измерение толщины колодки на входе и на выходе из смазочного слоя a, a_1 для определения коэффициента предварительного поджатия m_0 (см. рис. 7б) [11]. В случае применения составной колодки необходимо измерить точный единый размер толщины для подстановки в формулу (1). При применении колодки, состоящей из сферического основания 1 и собственно рабочего сегмента 2 [12], сферу необходимо дополнительно азотировать, в результате чего поверхностный слой основания получает высокую твердость и износоустойчивость с сохранением геометрического профиля, что важно для сферического соединения.

Стоит отметить, что не обязательно воспроизводить все конструктивные элементы с оригинальной детали. Так, например, можно не применять дюймовую резьбу, если это никак не влияет на механическую прочность конструкции узла (крепление внутренних деталей), в том числе из-за неточного определения фактической резьбы 3D-сканером. Вместо дюймовой применяется метрическая резьба по отечественным стандартам. Это же относится к штифтам крепления половин корпуса конструктивного узла по отечественным стандартам.

Заключение

Таким образом, выполненные проекты по проведению реверс-инжиниринговых работ компрессорного оборудования иностранных фирм: роторов центробежных и винтовых компрессоров, рабочих колес с профилем внутренних лопаток, подшипников скольжения различной конструкции и пр. узлов компрессоров характеризуют компетенции специалистов АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» выполнять на высоком уровне разработку конструкторской документации, обеспечивать требуемую технологию производства и выполнять поставку высокотехнологичной компрессорной техники, деталей и конструкционных узлов в рамках программ по импортозамещению, реализуемых предприятиями топливно-энергетического комплекса РФ.

Список источников

1. Хисамеев И. Г., Максимов В. А., Баткис Г. С. [и др.] Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров: моногр. Казань: ФЭН, 2010. 671 с. ISBN 978-5-9690-0165-7. EDN: QMLCZX.
2. Сарманаева А. Ф., Соколов Н. В., Паранина О. Ю. [и др.]. Комплексный подход для обеспечения качества продукции, разрабатываемой с применением методов реверс-инжиниринга // Компрессорная техника и пневматика. 2023. № 4. С. 42–45. EDN: UEBLPD.
3. Бикбулатова Д. Р., Бусарев Е. А., Родионов В. Д. [и др.] Модернизация и замена компрессорного оборудования на газоперерабатывающих комплексах компании ОАО «Сибур» // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 2–5. EDN: RCSEnz.
4. Ден Г. Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Термогазодинамические расчеты. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 232 с.
5. Селезнев К. П., Галеркин Ю. Б. Центробежные компрессоры. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. 271 с.
6. Хисамеев И. Г., Максимов В. А. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчет и проектирование. Казань: Фэн, 2000. 638 с. ISBN 5-7544-0153-1.
7. Пат. 2494286 Российская Федерация, МПК F 04 C 18/16. Зацепление винтовой машины / Налимов В. Н., Паранина Ю. А., Хисамеев И. Г., Якупов Р. Р. № 2012116857/06; заявл. 26.04.2012; опубл. 27.09.2013. Бюл. № 27.
8. Сакун И. А. Винтовые компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1970. 400 с.
9. Хадиев М. Б., Хамидуллин И. В. Компрессоры в технологических процессах. Расчет подшипников скольжения центробежных и винтовых компрессоров: моногр. Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. 260 с. ISBN 978-5-7882-3004-7.
10. Соколов Н. В., Байбеков Р. Р., Егоров А. Г. Основные моменты реинжиниринга подшипниковых узлов динамического оборудования // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы. 2022. Т. 2. С. 124–129. EDN: GDQWQJ.
11. Dmochowski W. M., Dadouche A., Fillon M. [et al.] Hydrodynamic tilting-pad journal bearings // Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA. 2013. P. 1749–1757. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_46.
12. Nicholas J. C. Tilting-pad journal bearings with spray-bar blockers and by-pass cooling for high speed, high load applications // Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium. 2003. P. 27–37.

САРМАНАЕВА Альбина Фаридовна, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора

ЦКУ — начальник отдела технологических инноваций и импортозамещения АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань.

Адрес для переписки: albina.sarmanaeva@niitk.ru

СОКОЛОВ Николай Викторович, кандидат технических наук, главный специалист АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань; доцент кафедры компрессорных машин и установок Института химического и нефтяного машиностроения Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), г. Казань.

SPIN-код: 7462-0713

AuthorID (РИНЦ): 871154

AuthorID (SCOPUS): 57194337606

ORCID: 0009-0001-2657-9503

Адрес для переписки: nikolay.sokolov@niitk.ru

ПАРАНИНА Ольга Юрьевна, начальник бюро АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань; аспирант кафедры холодильной техники и технологии Института химического и нефтяного машиностроения КНИТУ, г. Казань.

Адрес для переписки: olga.paranina@niitk.ru

КУЗОВОВ Владимир Вячеславович, главный специалист АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань.

Адрес для переписки: kuzovov.vladimir@niitk.ru

СИДОРОВА Юлия Владимировна, ведущий инженер-конструктор АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань.

Адрес для переписки: yuliya.sidorova@niitk.ru

ДАВЛЕТШИН Ильдар Салихзянович, кандидат технических наук, главный специалист АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань.

Адрес для переписки: ildar.davletshin@niitk.ru

ЛОТФУЛЛИН Ильмир Наилевич, главный специалист АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань.

Адрес для переписки: ilmir.lotfullin@niitk.ru

КОРШУНОВ Максим Витальевич, кандидат химических наук, главный специалист АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань.

Адрес для переписки: maksim.korshunov@niitk.ru

Для цитирования

Сарманаева А. Ф., Соколов Н. В., Паранина О. Ю., Кузовов В. В., Сидорова Ю. В., Давлетшин И. С., Лотфуллин И. Н., Коршунов М. В. Проблемные вопросы и пути их решения при проведении реверс-инжиниринга узлов компрессорных машин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 53–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-53-60.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024 г.

© А. Ф. Сарманаева, Н. В. Соколов, О. Ю. Паранина, В. В. Кузовов, Ю. В. Сидорова, И. С. Давлетшин, И. Н. Лотфуллин, М. В. Коршунов

UDC 621.51

DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-53-60

EDN: BUMOUY

PROBLEMATIC ISSUES AND WAYS TO SOLVE THEM DURING REVERSE ENGINEERING OF COMPRESSOR DESIGN UNITS

A. F. Sarmanaeva, N. V. Sokolov, O. Yu. Parana, V. V. Kuzovov, Yu. V. Sidorova, I. S. Davletshin, I. N. Lotfullin, M. V. Korshunov

JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group,
Russia, Kazan, Sibirskiy trakt str., 40, 420029

A significant part of the compressor fleet in Russia consists of foreign-made centrifugal and screw compressors, which, with operating time and depreciation, require repair according to regulations or modernization due to changed technological operating conditions. The supply of spare parts needed for repairs has become more complicated due to the rise in cost or lack of logistics. This leads to the problem of maintaining the compressor equipment in working order or its downtime. The manufacture of spare parts is problematic due to the lack of design documentation from operating organizations. The offer of reverse engineering services for spare parts and compressor assemblies by specialists of JSC «NIIturbocompressor n. a. V. B. Shnepp» makes it possible to improve and solve the problem of maintaining the effective condition of foreign equipment. At the same time, the article describes the problems that arise during reverse engineering of rotors of centrifugal and screw compressors, the spatial profile of impellers and fluid film bearings. The main points contributing to the successful completion of reverse engineering tasks are indicated, the accuracy of 3D scanning is determined, and methods for setting nominal dimensions and deviation tolerances are presented.

Keywords: compressor, equipment replacement, reverse engineering, 3D-scanning accuracy, compressor rotor, impeller, journal and thrust plain bearings.

References

1. Khisameev I. G., Maksimov V. A., Batkis G. S. [et al.] *Proyektirovaniye i ekspluatatsiya promyshlennykh tsentrobezhnykh kompressorov* [Design and operation of industrial centrifugal compressors]. Kazan, 2010. 671 p. ISBN 978-5-9690-0165-7. EDN: QMLCZX. (In Russ.).

2. Sarmanaeva A. F., Sokolov N. V., Paranina O. Yu. [et al.] *Kompleksnyy podkhod dlya obespecheniya kachestva produktsii, razrabatyvayemoy s primeneniym metodov revers-inzhiniringa* [An integrated approach to ensuring the quality of products developed using reverse engineering methods] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors and Pneumatics*. 2023. No. 4. P. 42 – 45. EDN: UEBLPD. (In Russ.).

3. Bikbulatova D. R., Busarev E. A., Rodionov V. D. [i dr.] *Modernizatsiya i zamena kompressornogo oborudovaniya na gazopererabatyvayushchikh kompleksakh kompanii OAO «Sibur»* [Modernization and replacement of compressor units of gasrefineries of OJSC «Sibur»] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors and Pneumatics*. 2013. No. 4. P. 2–5. EDN: RCSEnz. (In Russ.).

4. Den G. N. *Proyektirovaniye protochnoy chasti tsentrobezhnykh kompressorov: Termogazodinamicheskiye raschety* [Design of the flow part of centrifugal compressors: Thermogasdynamical calculations]. Leningrad, 1980. 232 p. (In Russ.).

5. Seleznev K. P., Galerkin Yu. B. *Tsentrobezhnyye kompressory* [Centrifugal compressors]. Leningrad, 1982. 271 p. (In Russ.).

6. Khisameev I. G., Maksimov V. A. *Dvukhrotornyye vintovyye i pryamozubyye kompressory: teoriya, raschet i proyektirovaniye* [Two-rotor screw and straight-tooth compressors: theory, calculation and design]. Kazan, 2000. 638 p. ISBN 5-7544-0153-1. (In Russ.).

7. Patent 2494286 Russian Federation, IPC F 04 S 18/16. *Zatsepleniye vintovoy mashiny* [Engagement of screw-type machine] / Nalimov V. N., Paranin Yu. A., Khisameev I. G., Yakupov R. R. No. 2012116857/06. (In Russ.).

8. Sakun I. A. *Vintovyye kompressory* [Screw compressors]. Leningrad, 1970. 400 p. (In Russ.).

9. Khadiev M. B., Khamidullin I. V. *Kompressory v tekhnologicheskikh protsessakh. Raschet podshpnikov skol'zheniya tsentrobezhnykh i vintovykh kompressorov* [Compressors in technological processes. Calculation of sliding bearings of centrifugal and screw compressors]. Kazan, 2021. 260 p. ISBN 978-5-7882-3004-7. (In Russ.).

10. Sokolov N. V., Baibekov R. R., Egorov A. G. *Osnovnyye momenty reinzhiniringa podshpnikovykh uzlov dinamicheskogo oborudovaniya* [The main points of reengineering bearing assemblies of dynamic equipment] // *Innovatsionnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i materialy. Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials*. 2022. Vol. 2. P. 124–129. EDN: GDQWQJ. (In Russ.).

11. Dmochowski W. M., Dadouche A., Fillon M. [et al.] *Hydrodynamic tilting-pad journal bearings* // *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. 2013. P. 1749–1757. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_46. (In Engl.).

12. Nicholas J. C. *Tilting-pad journal bearings with spray-bar blockers and by-pass cooling for high speed, high load applications* // *Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium*. 2003. P. 27–37. (In Engl.).

SARMANAEVA Albina Faridovna, Candidate of Technical Sciences, Deputy Chief Designer of Central Design Committee – Head of Technological Innovations and Import Substitution Department, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan.

Correspondence address: albina.sarmanaeva@niitk.ru
SOKOLOV Nikolay Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan; Associate Professor of Compressor Machines and Installations Department at the Institute of Chemical and Petroleum Engineering, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan.

SPIN-code: 7462-0713

AuthorID (RSCI): 871154

AuthorID (SCOPUS): 57194337606

ORCID: 0009-0001-2657-9503

Correspondence address: nikolay.sokolov@niitk.ru

PARANINA Olga Yuryevna, Head of Bureau, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan; Graduate Student of Refrigeration Engineering and Technology Department at the Institute of Chemical and Petroleum Engineering, KNRTU, Kazan.

Correspondence address: olga.paranina@niitk.ru
KUZOVOV Vladimir Vyacheslavovich, Chief Specialist, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan.

Correspondence address: kuzovov.vladimir@niitk.ru
SIDOROVA Yulia Vladimirovna, Leading Design Engineer, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan.

Correspondence address: yuliya.sidorova@niitk.ru
DAVLETSHIN Ildar Salikhzyanovich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan.

Correspondence address: ildar.davletshin@niitk.ru
LOTFULLIN Ilmir Nailevich, Chief Specialist, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan.

Correspondence address: ilmir.lotfullin@niitk.ru
KORSHUNOV Maksim Vitalievich, Candidate of Chemical Sciences, Chief Specialist, JSC «NIIturbocompressor n.a. V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan.

Correspondence address: maksim.korshunov@niitk.ru

For citations

Sarmanaeva A. F., Sokolov N. V., Paranina O. Yu., Kuzovov V. V., Sidorova Yu. V., Davletshin I. S., Lotfullin I. N., Korshunov M. V. *Problematic issues and ways to solve them during reverse engineering of compressor design units* // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 53–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-53-60.

Received June 03, 2024.

© A. F. Sarmanaeva, N. V. Sokolov, O. Yu. Paranina, V. V. Kuzovov, Yu. V. Sidorova, I. S. Davletshin, I. N. Lotfullin, M. V. Korshunov