



DOI: 10.18721/JEST.25110
УДК 621.514.4

Л.Г. Кузнецов¹, Ю.Л. Кузнецов¹, А.В. Бураков¹, Н.А. Кудла²

1 – АО «Компрессор», Санкт-Петербург, Россия
2 – АО НПО «Компрессор», Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТОРНЫХ КОМПРЕССОРОВ

В статье рассмотрены вопросы цифрового проектирования роторных газовых компрессоров. Выявлены освоенные российскими и зарубежными предприятиями в различных отраслях промышленности (в том числе в авиаракетостроении и энергетике) аддитивные технологии изготовления деталей и сборочных единиц с помощью 3D-печати металлическими и неметаллическими материалами, проанализированы наиболее перспективные материалы, достижения и тенденции развития. Проанализирован опыт применения воздушных и газовых роторных компрессоров, исследованы металлические и неметаллические материалы, применяемые для их изготовления. Выявлены основные факторы, определяющие стоимостные показатели и эффективность роторных компрессоров. Определены оптимальные параметры газовых компрессоров для эффективного решения промышленных задач. Предложены методы проектирования и способы изготовления, обеспечивающие снижение материалоемкости и увеличение прочности деталей и узлов компрессоров.

Ключевые слова: компрессор, роторный, эффективность, аддитивность, 3D-печать.

Ссылка при цитировании:

Л.Г. Кузнецов, Ю.Л. Кузнецов, А.В. Бураков, Н.А. Кудла. Повышение эффективности роторных компрессоров // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 101–110. DOI: 10.18721/JEST.25110.

L.G. Kuznetsov¹, Yu.L. Kuznetsov¹, A.V. Burakov¹, N.A. Kudla²

1 – JSC «Compressor», St. Petersburg, Russia
2 – JSC SPA «Compressor», St. Petersburg, Russia

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF ROTARY COMPRESSORS

The article discusses the issues of digital design of rotary gas compressors, identifies additive technologies for manufacturing parts and assembly units mastered by industrial enterprises abroad and in Russia using 3D printing with metal and non-metallic materials in various industries (including aircraft manufacturing and power engineering). We have analyzed the most promising materials, achievements and development trends, analyzed the experience of using air and gas rotary compressors, investigated metallic and non-metallic materials used for manufacturing rotary compressors. We have identified the main factors determining low cost indicators and efficiency of rotary compressors, determined the optimal parameters of gas compressors to effectively solve industrial problems, proposed design methods and manufacturing techniques reducing material consumption and increasing the strength of parts and components of compressors.

Keywords: compressor, rotary, efficiency, additivity, 3D printing.

Citation:

L.G. Kuznetsov, Yu.L. Kuznetsov, A.V. Burakov, N.A. Kudla, Efficiency improvement of rotary compressors, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 101–110, DOI: 10.18721/JEST.25110.

Введение

В промышленности эксплуатируется большое количество компрессорного оборудования для получения сжатого воздуха, значительная часть которого относится к роторным (винтовым) компрессорам.

В различных технических областях в настоящее время для снижения стоимости изготовления технологически сложных деталей и уменьшения количества сборочных единиц активно внедряется технологии 3D печати.

Применение технологии 3D печати подразумевает использование непосредственно 3D моделей, разработанных методами цифрового проектирования, минуя стадию разработки большого объема классической конструкторской и технологической документации по ЕСКД и ЕСТД, что может сократить сроки и стоимость разработки, изготовления и испытания изделий. Однако при этом в ходе цифрового проектирования каждой детали и изделия в целом необходимо на стадии выпуска их 3D моделей проводить многопараметрическую верификацию и оптимизацию как с позиций массогабаритных характеристик, соответствия техническим параметрам, прочности, долговечности, стойкости к внешним воздействиям, так и с точки зрения аддитивности технологии 3D печати.

Постановка задачи и методы исследования

Задачами нашего исследования являются повышение эффективности компрессоров, снижение капитальных и эксплуатационных расходов.

Для повышения эффективности применяемого парка компрессорного оборудования необходимо тщательно исследовать и внедрять во все элементы компрессорной системы конструктивные мероприятия, обеспечивающие снижение капитальных и эксплуатационных расходов.

К способам снижения капитальных затрат, помимо повышения эффективности приводов (электрического, газотурбинного, дизельного и т. п.), относится снижение стоимости изготовления и применяемых материалов без

ухудшения эксплуатационных характеристик оборудования.

Для снижения стоимости изделий во многих отраслях промышленности вместо деталей из металлов могут применяться детали из полимерных и композиционных материалов, которые обладают достаточными механическими свойствами, не подвержены коррозии, имеют меньшую массу и низкую себестоимость.

Исследование ведется с помощью численного метода и параметрического анализа.

В мировом опыте турбокомпрессоростроения можно отметить внедрение и использование метода 3D печати применительно как к отдельным частям, так и к компрессору целиком.

Например, в 2015 году компания GE Aviation внедрила в авиационные двигатели такие детали, созданные методом 3D печати, как корпус температурного датчика на входе в компрессор и топливную форсунку. При одинаковой прочности оригинала и модели, выполненной на 3D принтере, последняя оказалась на 25 % легче [1].

В том же году в Австралии на 3D принтере был напечатан первый в мире действующий реактивный двигатель [2].

Немногим позже миниатюрный турбореактивный двигатель был напечатан компанией GE Aviation и представляет собой модифицированную версию силового агрегата, который используется в радиоуправляемых моделях самолетов [3].

В 2017 году компания GE Aviation создала первый в истории коммерческий авиационный двигатель, который более чем на треть состоит из компонентов, напечатанных на 3D принтере. Инженерам удалось снизить количество отдельных деталей с 855 до 12 штук. Данный двигатель был разработан специально для пассажирского одномоторного самолета бизнес-класса. Использование такого двигателя уменьшает вес самолета на 5 %, что, в свою очередь, уменьшает расход топлива при сохранении той же скорости [4].

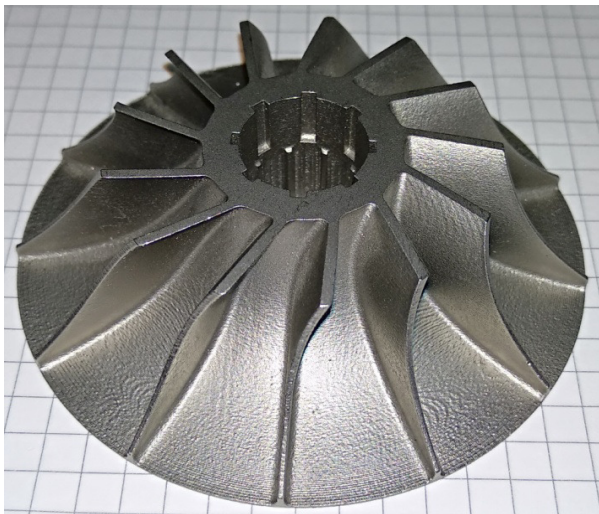


Рис. 1. Пример выполнения на 3D принтере рабочего колеса центробежного компрессора

Fig. 1. A sample run on a 3D printer impeller centrifugal compressor

На отечественных предприятиях авиаракетостроения изучаются вопросы аддитивных технологий изготовления ответственных технологически сложных деталей (рабочие колеса турбонасосных агрегатов, камеры сгорания [5], детали газотурбинного двигателя [6, 7]); в качестве материалов используются как нержавеющая и жаростойкая сталь, так и титан.

Таким образом, можно отметить успешное использование 3D печати отдельных деталей и узлов в авиации и ракетостроении. Подобную технологию целесообразно внедрять в такой обширной отрасли, как компрессоростроение.

АО «Компрессор», лидер отечественного компрессоростроения, проектирует и производит большую номенклатуру блочного компрессорного и газового оборудования, поршневые и винтовые компрессоры, установки подготовки топливного, пускового и импульсного газа. Оборудование установлено и надежно работает на всех надводных кораблях и подводных лодках ВМФ, а также компрессорных станциях магистральных газопроводов «Ухта – Торжок», СМГ «Бованенково – Ухта», Северо-Европейского газопровода, Южного потока.

Предприятие выпускает широкий ассортимент серийной продукции:

компрессоры (роторные, поршневые, мембранные) и компрессорные станции с конечным давлением от 0,2 до 42,0 МПа для сжатия различных газов (воздух, азот, кислород, водород, CO_2 , аргон, природный газ и т. д.);

блочные дожимные компрессорные станции; блочные воздушные компрессорные станции;

холодильные установки и компрессоры.

Одна из актуальных областей применения машин объемного вытеснения с вращающимися рабочими органами, в частности роторных нагнетателей, – получение сжатого газа низкого давления и перекачка различных газов в пищевой, металлургической, атомной и химической промышленности, на пневматическом транспорте, при нагнетании воздуха в печи и для многих других целей [8].

Модель исследования

Сфера применения нагнетателей – там, где требуется низкое выходное давление и большая производительность. Наиболее распространенный из существующих тип нагнетателя низкого давления – нагнетатель типа Рутс (Roots).

В частности, роторный нагнетатель Рутс (Roots) используется для подачи безмасляного воздуха в атомной, электронной и пищевой промышленности.

Принцип действия нагнетателя типа Рутс: два идентичных ротора, снабженных, как правило, двумя или тремя зубьями, имеющими специальный профиль, синхронно вращаются в нагнетательной полости; при вращении они захватывают входящий поток газа из всасывающего патрубка, постепенно изолируют его в полостях между зубьями, сжимают и перемещают к нагнетательному патрубку, а затем выталкивают через выходное отверстие.

Оси вращения роторов параллельны, а их движение связано посредством синхронизи-

ванной зубчатой передачи с одинаковым количеством зубьев обеих колес. Синхронизованная зубчатая передача обеспечивает бесконтактное управление роторами, роторы вращаются друг против друга, при этом они не соприкасаются ни между собой, ни с корпусом, что обеспечивает отсутствие необходимости в смазке внешних поверхностей зубьев самих роторов. Смазываются только шестерни и подшипники, находящиеся в отдельном смазочном блоке.

Для роторных нагнетателей необходимо иметь зазоры между зубьями роторов при работе по возможности минимальными, чтобы утечка воздуха через них была наименьшей. Для получения наименьшего эксплуатационного зазора между расточкой корпуса и роторами применяют заливку вершин зубьев мягким легкоистирающимся металлом [9]. В то же время должно быть обеспечено отсутствие соприкосновения зубьев роторов друг с другом. Факторами, которые при работе нагнетателя влияют на величину зазоров между роторами, являются:

- тепловое расширение роторов;
- зазоры между зубьями шестерен связи, возрастающие по мере износа последних;
- деформация зубьев роторов от воздействия центробежных сил и давления нагнетаемого воздуха;
- прогибы валов;
- закручивание валов.

Температурное расширение зубьев роторов существенно для эффективной работы нагнетателя, так как в случае использования для изготовления корпуса и роторов материалов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения [11], а также при охлаждении корпуса (например, при изготовлении роторов из алюминия, а корпуса из чугуна в результате охлаждения корпуса окружающим воздухом) может произойти заклинивание [12].

Известен также двухроторный компрессор, содержащий алюминиевый корпус с крышка-

ми подшипников, внутри которого расположены алюминиевые роторы. Недостатки такой конструкции – высокая стоимость изготовления и невысокая прочность*.

Известны различные способы изготовления рабочих колес нагнетателей типа «Рутс», но все они достаточно сложны и трудоемки, а получаемые такими способами рабочие колеса имеют большую металлоемкость и массу [13].

Одним из современных способов формообразования объемных конструкций, позволяющим снизить затраты на материалы, уменьшить стоимость с сохранением механических свойств, является использование в конструкции элементов, выполненных методом 3D печати.

Методика исследования

В 2018 году АО «Компрессор» разработало и изготовило ротационный компрессор РК105/60 с зубчатыми роторами, выполненными на 3D принтере. На данное изобретение был получен патент**.

Роторы выполнены с внутренними полостями, образованными взаимопересекающимися продольными и поперечными ребрами, причем поперечные ребра расположены перпендикулярно к оси ротора или под углом к ней и с шагом не менее пяти толщин ребер, а внутренние полости, образованные продольными ребрами, имеют форму сектора цилиндра либо форму треугольной или шестигранной призмы.

Ребра и наружные стенки зубчатых роторов выполнены толщиной не менее 0,5 мм.

* Пат. на изобретение РФ № 2 307 262 МПК F04C 18/08, Двухроторный компрессор / Кондров А.Ю., Кистенев Г.В., Лернер Е.И. Номер заявки 2006113726/06. Дата подачи заявки: 21.04.2006. Опубликовано: 27.09.2007. Бюл. № 27.

** Пат. на изобретение РФ № 2 660 701 МПК F04C 18/12, Роторный нагнетатель / Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Бураков А.В. Номер заявки 2017135119. Дата подачи заявки: 04.10.2017. Опубликовано: 09.07.2018. Бюл. № 19.

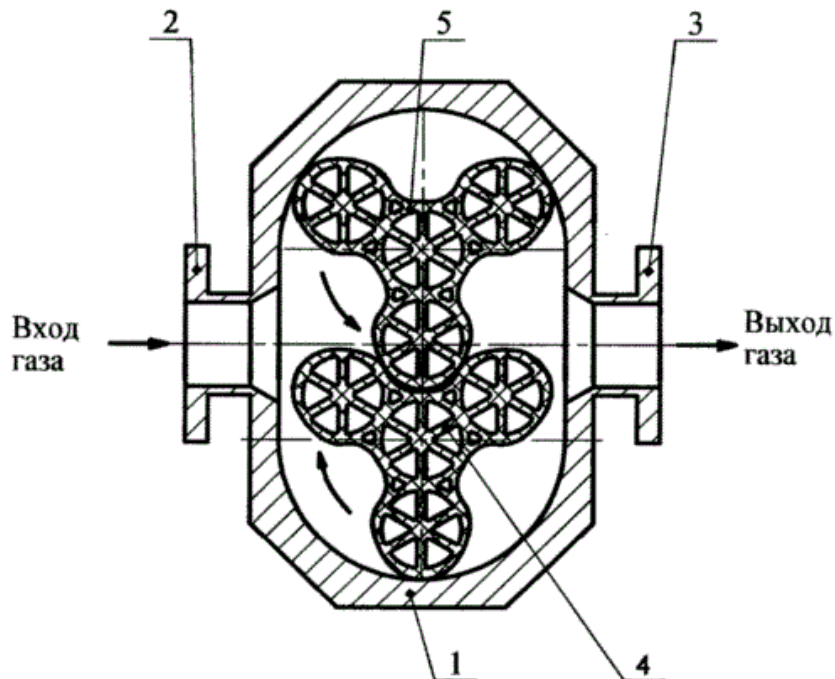


Рис. 2. Схема роторного нагнетателя компрессора РК105/60

Fig. 2. Rotary blower

Роторный нагнетатель (рис. 2) содержит корпус 1 с входным патрубком 2 и выходным патрубком 3. В корпусе 1 размещены ведущий ротор с тремя зубьями 4 и ведомый ротор с тремя зубьями 5. На роторах 4 и 5 установлены синхронизирующие зубчатые шестерни 6, а сами роторы 4 и 5 установлены в подшипниках 7. Синхронизирующие зубчатые шестерни 6 и подшипники 7 изолированы от полости сжатия газа и смазываются маслом. Роторы 4 и 5 имеют гарантированный зазор, не соприкасаются ни друг с другом, ни с корпусом, что обеспечивает отсутствие необходимости в смазке внешних поверхностей зубьев роторов.

Роторы 4, 5 выполнены с внутренними полостями 8, образованными по всей длине роторов взаимопересекающимися продольными 9 и поперечными 10 ребрами и наружными стенками 11. Роторы 4, 5 изготовлены методом трехмерной печати на 3D принтере.

Внутренние полости 8 (рис. 3), образованные продольными ребрами 9 (рис. 4), имеют

форму сектора цилиндра или форму треугольной призмы.

В другом варианте исполнения внутренние полости 8 (рис. 5), образованные продольными ребрами 9, имеют форму шестигранной призмы (иначе говоря, форму сот).

Взаимопересекающиеся продольные и поперечные ребра обеспечивают прочность ротора с зубьями при воздействии изгибающих нагрузок, скручивающих нагрузок, внешнего давления. Толщина ребер и внешней стенки ротора выбирается исходя из соображений технологичности и предотвращения потери устойчивости.

Ребра 9, 10 и внешние стенки 11 роторов выполнены толщиной не менее 0,5 мм.

Поперечные ребра выполнены перпендикулярно к оси ротора или под углом к ней и с шагом не менее пяти толщин ребер. Например, на рис. 5 показаны внутренние поперечные ребра 10 ротора, расположенные с шагом, равным десяти толщинам ребра.

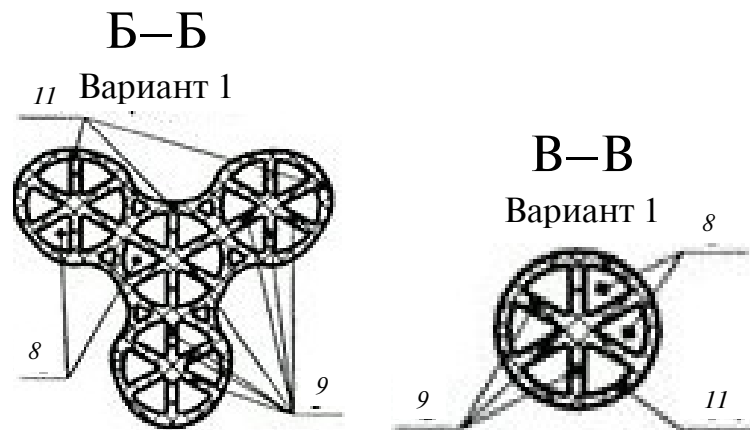


Рис. 3. Внутренние полости ротора в форме сектора цилиндра
Fig. 3. Internal cavities of a rotor in the form of a sector a cylinder

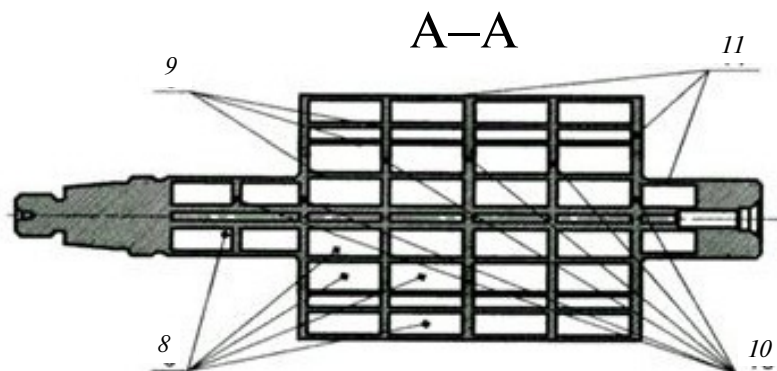


Рис. 4. Продольные ребра
Fig. 4. Longitudinal ribs

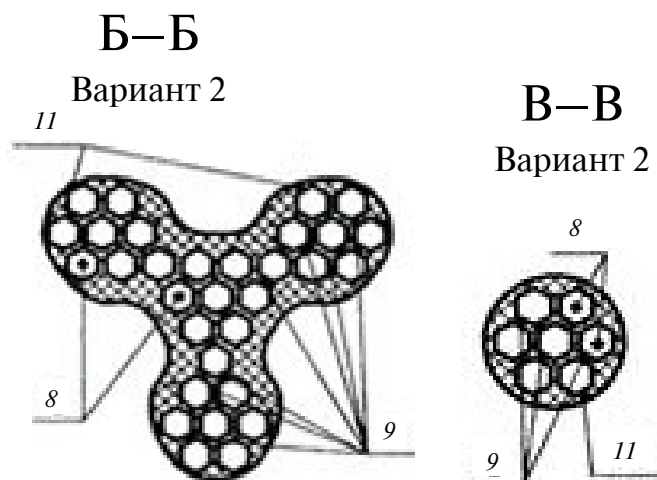


Рис. 5. Внутренние полости ротора в форме сот
Fig. 5. Internal cavities of a rotor in the form of honeycombs

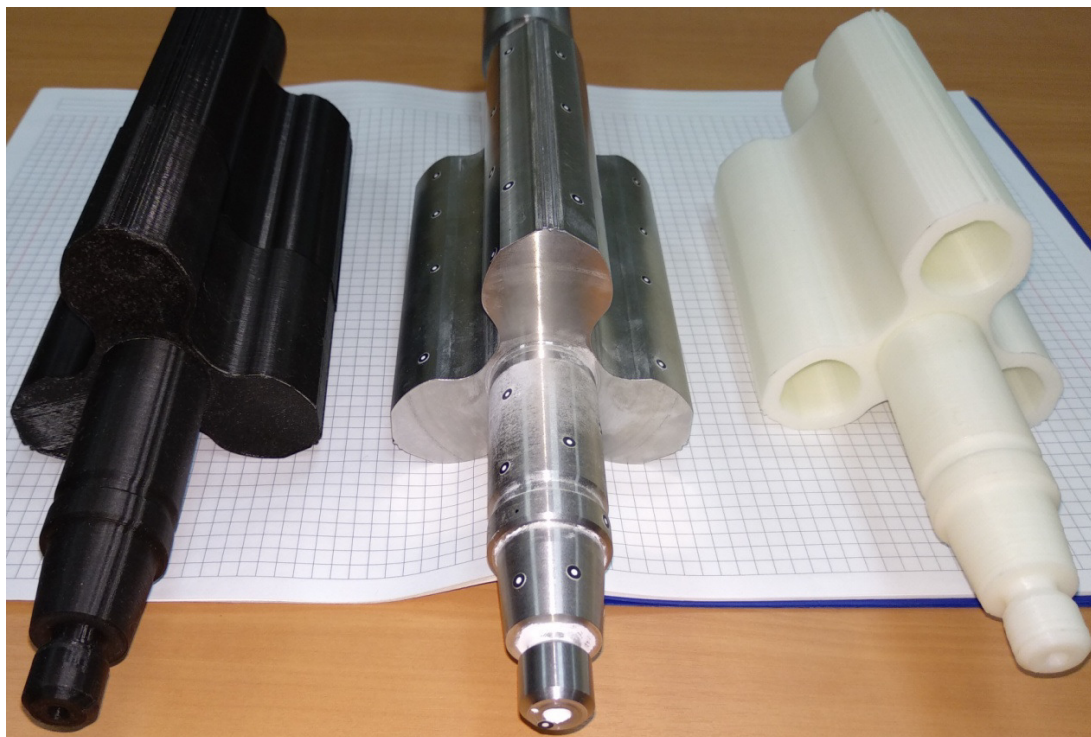


Рис. 6. Роторы, выполненные на 3D принтере (слева направо: полиамид, металл, АБС-пластик)
 Fig. 6. Rotors made on a 3D printer (from left to right: polyamide, metal, ABS- plastic)

Нагнетатель работает следующим образом. Нагнетатель (см. рис. 2) приводится в действие вращением конца вала ведущего ротора 4, например от электродвигателя (не показан). Ведущий ротор с зубьями 4 вращается и через синхронизирующие шестерни 6, насаженные на роторы 4 и 5, передает вращение ведомому ротору 5. Роторы 4 и 5 синхронно вращаются. Роторы 4 и 5 снабжены идентичными зубьями, имеющими специальный профиль, гарантирующий минимальный зазор между роторами и корпусом 1. Частота вращения роторов может составлять от 500 до 6000 об/мин. Газ поступает на вход в корпус нагнетателя через патрубок 2. При вращении роторы 4 и 5 захватывают входящий поток газа из всасывающего патрубка 2, постепенно изолируют его в полостях между зубьями, сжимают, перемещают и выталкивают к нагнетательному патрубку 3. Действующие на ротор с зубьями при работе нагнетателя изгибающие силы воспринимаются продольными ребрами, скручивающие силы воспринимаются поперечными ребрами, силы от внешнего давления газа вос-

принимаются стенкой с развитым внутренним оребрением. Толщина ребер, их количество и схема расположения рассчитаны исходя из требуемых параметров нагнетателя.

За счет производства зубчатых роторов методом трехмерной печати на 3D принтерах достигается упрощение технологии изготовления.

Могут быть использованы следующие технологии трехмерной печати:

- моделирование методом наплавления;
- лазерная стереолитография;
- селективное лазерное спекание;
- электронно-лучевая плавка.

При выборе материала роторов имеют в виду следующие соображения: обеспечение надежной работы; наименьшую стоимость материала; наилучшие условия обработки; физические свойства сжимаемой среды.

Зубчатые роторы нагнетателя могут быть созданы из пластика, металла или иного материала, пригодного для трехмерной печати (см. рис. 6). Основным же материалом для изготовления роторов винтовых компрессоров служат



Рис. 7. Фото разреза ротора, выполненный на 3D принтере
 Fig. 7. Photo of the rotor section made on a 3D printer

различные марки стали. Применяются, кроме того, чугун и пластмассы, а также специальные марки графитов для роторов, работающих в области высоких температур. При этом, даже если используемый материал печати имеет низкие механические свойства (как, например, у пластика), по расчету подбирают необходимый размер, количество и конфигурацию внутренних ребер. Из всех полимеров наиболее подходит по физическим свойствам полиамид П-66, который имеет наиболее высокую температуру плавления [14], что позволяет использовать его для изготовления деталей, устойчивых к высоким температурам. Разработана также конструкция ротора с пластиковым покрытием [15].

Основные результаты

Предложенное техническое решение позволяет обеспечить требуемые рабочие параметры нагнетателя при снижении массы его зубчатых роторов, низкую стоимость изготовления, избавиться от подгонки зубчатых роторов друг к другу, гарантировать стабильность размеров и параметров зубчатых роторов и их полную взаимозаменяемость.

За счет использования эффективного внутреннего оребрения взаимопересекающимися

продольными и поперечными ребрами обеспечивается прочность зубчатых роторов при воздействии изгибающих нагрузок, скручивающих нагрузок, внешнего давления, а также позволяет исключить возможность заклинивания роторов в корпусе благодаря точности предлагаемого метода изготовления роторов с заданными размерами и гарантированным зазором.

Заключение

Для изготовления зубчатых роторов могут применяться полимерные и композиционные материалы с самосмазывающимися свойствами, так как при уменьшении зазора, например при повышении температуры и линейном расширении деталей, происходит приработка полимерных деталей без заклинивания.

Помимо этого, масса роторов может быть снижена в 4–6 раз, что уменьшит массу всего компрессора на 5–15 %.

Таким образом, предложенное эффективное использование 3D печати для изготовления деталей может применяться не только в роторных нагнетателях низкого давления, но и при изготовлении других, более сложных элементов компрессорного оборудования, что позволит уменьшить эксплуатационные затраты и снизить стоимость компрессоров.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лав Радис.** GE Aviation получает сертификат FAA на первую 3D печатную часть реактивного двигателя. [Электр. ресурс]. URL: <https://3dprinting.com/news/ge-aviation-gets-faa-certification-for-first-3d-printed-jet-engine-part/> (дата обращения: 22.09.2018).
2. На 3D-принтере впервые напечатали реактивный двигатель. [Электр. ресурс] URL: <https://lenta.ru/news/2015/02/26/jetprinted/> (дата обращения: 22.09.2018).
3. В США реактивный двигатель «напечатали» на 3D-принтере. [Электр. ресурс] URL: https://www.dialog.ua/news/55451_1431709113 (дата обращения: 22.09.2018).
4. **Мэтью Ван Дюсен.** 3D-печатный самолетный двигатель GE будет запущен в этом году. [Электр. ресурс] URL: <https://www.ge.com/reports/madprops-3d-printed-airplane-engine-will-run-year/> (дата обращения: 22.09.2018).
5. **Каминский Я.В., Левихин А.А.** Разработка камеры сгорания ЖРД малой тяги с применением аддитивных технологий // В сборнике: Молодежь. Техника. Космос труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». 2018. № 49. С. 218–222.
6. **Побелянский А.В., Мустейкис А.И., Галаджун А.А., Круглов Д.С.** Исследование возможности применения деталей из термостойких пластиков и их испытание в составе малоразмерного газотурбинного двигателя // Исследования наукограда. 2017. Т. 1. № 2 (20). С. 76–81.
7. **Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Михеенков М.Ю., Мустейкис А.И.** Обеспечение заданного уровня свойств полученных послойным лазерным сплавлением деталей из жаропрочных никелевых сплавов // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды десятой общероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 45–48.
8. **Хлумский В.** Ротационные компрессоры и вакуум-насосы. М.: Машиностроение, 1971. 127 с.
9. **Андреев П.А.** Винтовые компрессорные машины. М.: Судпромгиз, 1961. 251 с.
10. **Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Преображенская М.А., Галаджун А.А.** Материаловедческие аспекты повышения прочностных свойств полученных послойным лазерным сплавлением деталей из жаропрочных никелевых сплавов // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды десятой общероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 53–57.
11. Lutos Стандартные нагнетательные агрегаты с ротационным нагнетателем. [Электр. ресурс] URL: <http://www.lutos.cz/inc/getfile.php?file=44857f26e4d6b83ccc91c7368239d5ce5734f9cf> (дата обращения: 22.09.2018).
12. **Кац А.М.** Расчет, конструкция и испытание воздуходувок типа Рутс, М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1946. 30 с.
13. **Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Галинская О.О., Михайлов К.Н.** Точность размеров и шероховатость поверхностей полученных послойным лазерным сплавлением деталей из жаропрочных никелевых сплавов // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды десятой общероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 48–53.
14. **Николаев А.Ф.** Технология пластических масс. М.: Химия, 1977. 367 с.
15. **Хисамеев И.Г., Максимов В.А.** Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчет и проектирование. М.: Фен, 2000. 638 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЗНЕЦОВ Леонид Григорьевич — доктор технических наук генеральный конструктор АО «Компрессор»

E-mail: office@compressor.spb.ru

КУЗНЕЦОВ Юрий Леонидович — кандидат технических наук заместитель генерального директора по науке АО «Компрессор»

E-mail: yuriy_spb@mail.ru

БУРАКОВ Александр Васильевич — начальник ЦКБ АО «Компрессор»

E-mail: 47otdel@compressor.spb.ru

КУДЛА Наталия Александровна — ведущий инженер АО НПО «Компрессор»

E-mail: graf_fi@rambler.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.01.2019

REFERENCES

- [1] **Lav Radis.** GE Aviation poluchaet sertifikat FAA na pervuyu 3D pechatnuyu chast' reaktivnogo dvigatelya. [Elektr. resurs]. URL: <https://3dprinting.com/news/ge-aviation-gets-faa-certification-for-first-3d-printed-jet-engine-part/> (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [2] Na 3D-printere vperve napechatali reaktivnyy dvigatel'. [Elektr. resurs] URL: <https://lenta.ru/news/2015/02/26/jetprinted/> (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [3] V SSHA reaktivnyy dvigatel' «napechatali» na 3D-printere. [Elektr. resurs] URL: https://www.dialog.ua/news/55451_1431709113 (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [4] **Meht'yu Van Dyusen.** 3D-pechatnyy samoletnyy dvigatel' GE budet zapushchen v ehtom godu. [Elektr. resurs] URL: <https://www.ge.com/reports/mad-props-3d-printed-airplane-engine-will-run-year/> (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [5] **Kaminskiy Ya.V., Levikhin A.A.** Razrabotka kamery sgoraniya ZHRD maloy tyagi s primeneniem additivnykh tekhnologiy // V sbornike: Molodezh'. Tekhnika. Kosmos trudy X Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ser. «Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGTU». 2018. № 49. S. 218–222. (rus.)
- [6] **Pobelyanskiy A.V., Musteykis A.I., Galadzhun A.A., Kruglov D.S.** Issledovanie vozmozhnosti primeneniya detaley iz termostoykikh plastikov i ikh ispytanie v sostave malorazmernogo gazoturbinnoy dvigatelya. *Issledovaniya naukograda*. 2017. T. 1. № 2 (20). S. 76–81. (rus.)
- [7] **Andryushkin A.Yu., Levikhin A.A., Mikheenkoy M.Yu., Musteykis A.I.** Obespechenie zadannogo urovnya svoystv poluchennykh posloynym lazernym splavleniem detaley iz zharoprochnykh nikelovykh splavov. *V sbornike: Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya. Trudy desyatoy obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018. S. 45–48. (rus.)
- [8] **Khlumskiy V.** Rotatsionnye kompressory i vakuum-nasosy. M.: Mashinostroenie, 1971. 127 s. (rus.)
- [9] **Andreev P.A.** Vintovye kompressornye mashiny. M.: Sudpromgiz, 1961. 251 s. (rus.)
- [10] **Andryushkin A.Yu., Levikhin A.A., Preobrazhenskaya M.A., Galadzhun A.A.** Materialovedcheskie aspekty povysheniya prochnostnykh svoystv poluchennykh posloynym lazernym splavleniem detaley iz zharoprochnykh nikelovykh splavov. *V sbornike: Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya. Trudy desyatoy obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018. S. 53–57. (rus.)
- [11] Lutos. Standartnye magnetatel'nye agregaty s rotatsionnym magnetatelem. [Elektr. resurs] URL: <http://www.lutos.cz/inc/getfile.php?file=44857f26e4d6b83ccc91c7368239d5ce5734f9cf> (data obrashcheniya: 22.09.2018).
- [12] **Kats A.M.** Raschet, konstruktsiya i ispytanie vozdukhoduvok tipa Ruts, M.: GNTI Mashinostroi-tel'noy literatury, 1946. 30 s. (rus.)
- [13] **Andryushkin A.Yu., Levikhin A.A., Galinskaya O.O., Mikhaylov K.N.** Tochnost' razmerov i sherokhovatost' poverkhnostey poluchennykh posloynym lazernym splavleniem detaley iz zharoprochnykh nikelovykh splavov. *V sbornike: Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya. Trudy desyatoy obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018. S. 48–53. (rus.)
- [14] **Nikolaev A.F.** Tekhnologiya plasticheskikh mass. M.: Khimiya, 1977. 367 s. (rus.)
- [15] **Khisameev I.G., Maksimov V.A.** Dvukhrotornyye vintovye i pryamozubyye kompressory: teoriya, raschet i proektirovanie. M.: Fen, 2000. 638 s. (rus.)

THE AUTHORS

KUZNETSOV Leonid G. – JSC «Compressor»

E-mail: office@compressor.spb.ru

KUZNETSOV Yuriy L. – JSC «Compressor»

E-mail: yuriy_spb@mail.ru

BURAKOV Aleksandr V. – JSC «Compressor»

E-mail: 47otdel@compressor.spb.ru

KUDLA Nataliia A. – JSC SPA «Compressor»

E-mail: graf_fi@rambler.ru

Received: 21.01.2019