

УДК 620.22

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В. С. ЖЕРНАКОВ¹, В. Л. ЮРЬЕВ², А. В. СОЛОВЬЕВА³, С. Н. НИКИТИН⁴

¹zhvs@ugatu.su, ^{2,4}nio-8450@yandex.ru

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^{2,4} АО «Институт технологии и организации производства» (АО НИИТ)

³ АО «ОДК-Климов» г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 05.09.2019

Аннотация. Рассмотрены возможные пути использования полимерного композиционного материала (ПКМ) в конструкции рабочего колеса (РК) компрессора с учетом особенностей механики и технологии изготовления композитных материалов. Приведены результаты расчета МКЭ 3D модели РК из слоистого углепластика на связующем РН-3М с учетом количества слоев и угла выкладки, необходимых для получения требуемых значений прочности при эксплуатационных условиях, включая и температурные условия. Выявлены максимальные напряжения и деформации, а также перемещения узлов конструкции, на основе которых установлены наиболее напряженные зоны лопатки и основания диска в условиях эксплуатации. Представлены рекомендации по созданию РК и показана технологическая возможность его изготовления из композиционного материала.

Ключевые слова: рабочее колесо, композиционные материалы, деформация, связующее, клеевое соединение, углепластик, ПКМ.

ВВЕДЕНИЕ

Стремление снизить массу деталей ГТД заставляет предпринимать попытки по внедрению более легких материалов, не уступающих по своим прочностным характеристикам традиционным материалам (сплавы алюминия, титана). Для решения этой задачи необходимо понимание конструктором, проектирующим изделие, свойств ПКМ, их конструктивно-технологических особенностей и т.д. Использование в конструкциях центробежных компрессоров ГТД современных ПКМ позволяет повысить их эксплуатационные параметры (снизить массу изделия, повысить число оборотов и, соответственно, степень повышения давления в компрессоре).

Реализуя возможности ПКМ, спроектировано и изготовлено РК [1] на основе углеродной ленты УОЛ-300Р-2,5К-130ЭД и связующего РН-3М. Произведен расчет на прочность РК из ПКМ при заданных рабочих параметрах. При создании изделий из ПКМ возникает задача соединения его отдельных частей.

Соединения отвечают за передачу усилий от одного элемента конструкции к другому и решают одну из задач целостности и прочности изделия, но увеличивают массу изделия и являются одним из слабых мест [2, 3].

При изготовлении РК для соединения лопаток и втулки предложен вариант клеевого соединения с использованием технологии ступенчатого отверждения ПКМ

[4–6]. На данную технологию получен патент [6] на изготовление РК из ПКМ со ступенчатым отверждением. Данный способ клеевого соединения позволяет получать сложные конструкции без механических соединительных элементов.

КОНСТРУКЦИЯ, СОСТАВ ПКМ ДЛЯ РК

В ЦИАМ разработано РК [7] на основе КМ, где каждая лопатка изготавливается отдельно, сборка колеса производится с помощью установки силовых колец из композиционного материала. В данной конструкции не применяется клеевое соединение лопаток со втулкой.

Основное отличие предлагаемой нами конструкции и технологии это клеевое соединение всех лопаток между собой и с телом втулки. При этом каждая последующая лопатка укладывается своей корневой частью поверх предыдущей путем клеевого соединения.

Рабочее колесо состоит из вала-сердечника (титановый сплав) и втулочной части в виде намотки углеродного жгута и выкладки углеродной ленты, на поверхности которой приформовывается тело корневой части рабочих лопаток (поз. 2 рис. 1).

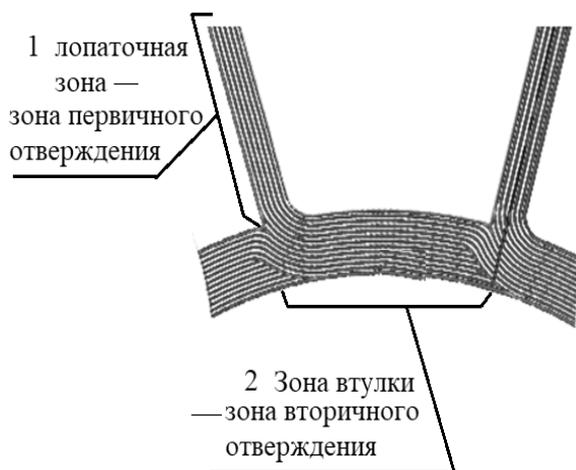


Рис. 1. Схема укладки слоев, расположения зон: 1 – лопатка; 2 – втулка [3]

При проектировании конструкции РК выбран слоистый вариант ПКМ с укладкой зоны втулки по схеме, описанной в патенте [3]. Выбранная технология, простая в исполнении, позволяет сориентировать волокна в направлении действующих главных

напряжений. Волокнистый материал слоями, не прерываясь, переходит из лопаточной зоны 1 в тело втулки 2 (рис. 1), и становится составляющей частью втулки РК.

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ 3D-МОДЕЛИ

РК имеет большие и малые лопатки. Рассчитывалось напряженно-деформированное состояние в слоях большой и малой лопатках РК.

Для воспроизведения заданной наружной поверхности лопатки по сечениям определено количество и форма слоев. Количество слоев в лопатках – 20 слоев для большой лопатки, 18 слоев для малой лопатки (0,124 мм, паспортные данные УОЛ-300Р-2,5К-130 ЭД). Слои меньшей площади расположили в центре сечения, слои большей площади – на периферии. Схема укладки симметрична относительно средней линии лопатки, проходящей между центральными слоями в сечении [8].

При расчете учитывались:

- выбранные для изготовления большой лопатки схема армирования и способ соединения слоев с диском рабочего колеса;
- физико-механические свойства КМ слоев лопатки и диска;
- угловая скорость ω вращения рабочего колеса;
- поле давления $p = p(x, y, z)$ воздушного потока в межлопаточном канале РК;
- температурное поле $T = T(x, y, z)$ РК.

Найдены:

- механические характеристики однонаправленного слоя композиционного материала, полученные расчетным путем;
- коэффициент объемного содержания волокон (коэффициент армирования) $\psi_v = 0,6$;
- плотность $\rho_v = 1,55 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- прочность при растяжении вдоль направления армирования $\bar{\sigma}_1^+ = 1400 \text{ МПа}$;
- прочность на растяжение поперек направления армирования $\bar{\sigma}_1^+ = 44 \text{ МПа}$;
- модуль упругости вдоль армирования $E_1 = 127,6 \text{ ГПа}$;
- модуль упругости поперек армирования $E_2 = 5,7 \text{ ГПа}$;
- модуль сдвига $G_{12} = 2,3 \text{ ГПа}$;

- коэффициент Пуассона при нагружении в направлении армирования $\nu_{12}=0,21$;
- коэффициент Пуассона при нагружении поперек направления армирования $\nu_{21}=9,4 \cdot 10^{-3}$.

При проведении детального анализа напряженно-деформированного состояния в большой лопатке РК рассматривались напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , τ_{12} во всех 20-ти слоях большой лопатки и 18-ти слоях малой лопатки. Поля напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , τ_{12} в первом слое большой и малой лопатках представлены в графической форме (рис. 2–9). Установлено, что:

- при выбранной схеме армирования в пере лопатки максимальные значения напряжения σ_{11} вдоль армирующих волокон находятся в пределах 600 МПа для большой и 500 МПа для малой. При пределе прочности композиционного материала в данном направлении $\bar{\sigma}_1^+ = 1400$ МПа это можно считать вполне приемлемым;

- в направлении, перпендикулярном армирующим волокнам, напряжение σ_{22} в пере лопатки находится в пределах 50 и 25 МПа;

- расчетные касательные напряжения τ_{12} в пере большой лопатки достигают 70 и 100 МПа в пере малой лопатки;

- в зоне соединения слоев пера лопатки с диском рабочего колеса наблюдаются более высокие напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , τ_{12} из-за их концентрации на краях укладываемых слоев композита.

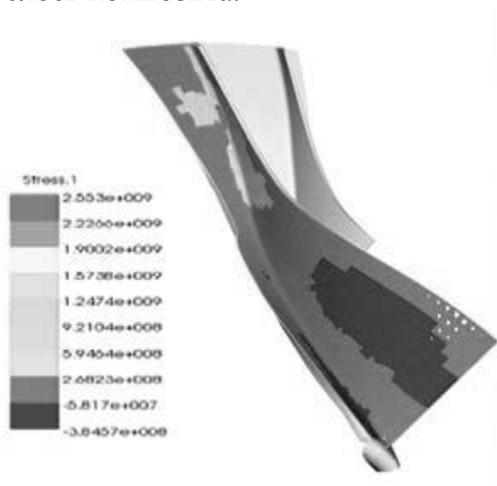


Рис. 2. Напряжения σ_{11} вдоль армирующих волокон в плоскости 1-го слоя большой лопатки рабочего колеса

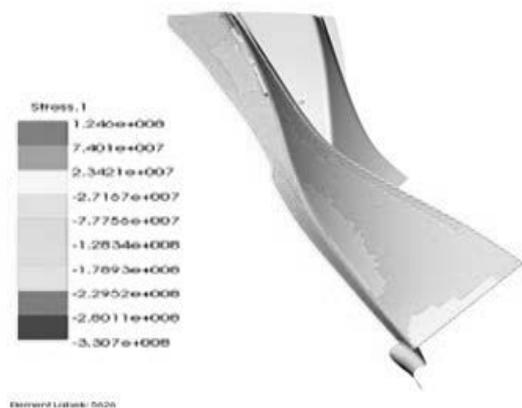


Рис. 3. Напряжения σ_{22} перпендикулярно армирующим волокнам в плоскости 1-го слоя большой лопатки рабочего колеса

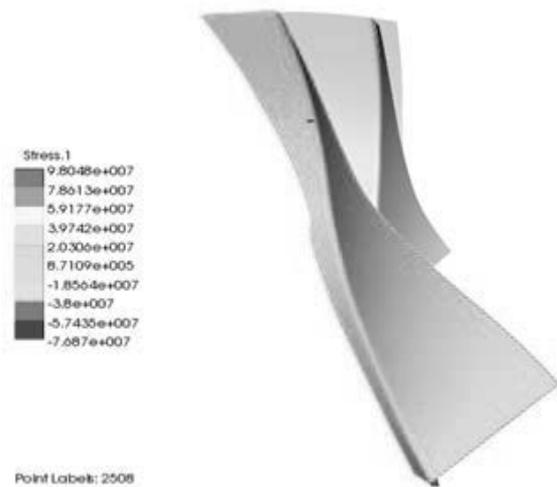


Рис. 4. Напряжения σ_{33} перпендикулярно плоскости 1-го слоя большой лопатки рабочего колеса центробежного компрессора

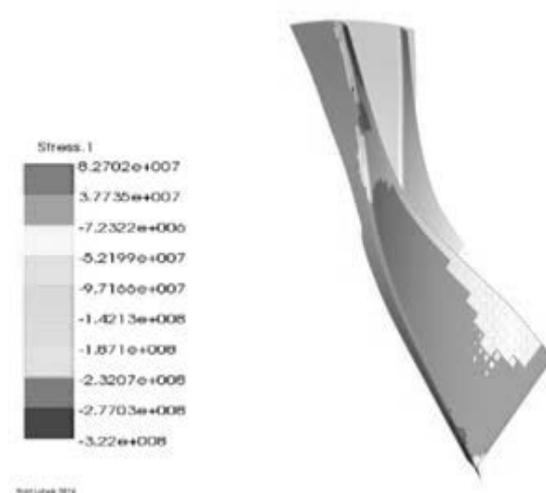


Рис. 5. Напряжения τ_{12} в плоскости 1-го слоя большой лопатки рабочего колеса центробежного компрессора

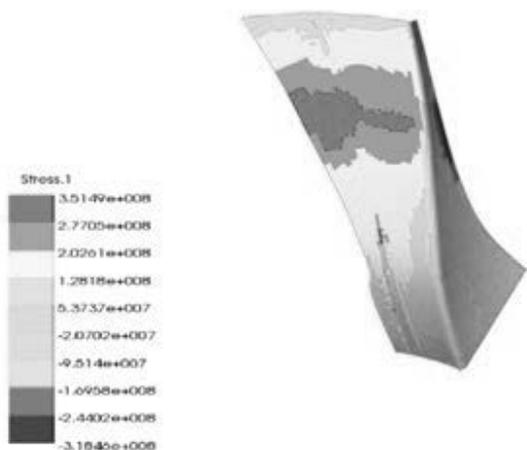


Рис. 6. Результаты расчетов для 1-го слоя малой лопатки, отсчитываемого от спинки лопатки. Напряжения σ_{11} вдоль армирующих волокон в плоскости 1-го слоя малой лопатки рабочего колеса



Рис. 7. Напряжения σ_{22} перпендикулярно армирующим волокнам в плоскости 1-го слоя малой лопатки рабочего колеса



Рис. 8. Напряжения σ_{33} перпендикулярно плоскости 1-го слоя малой лопатки рабочего колеса



Рис. 9. Напряжения τ_{12} в плоскости 1-го слоя малой лопатки рабочего колеса

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РК

Производство РК из ПКМ на основе реактопластичных связующих требует формования отдельных деталей изделия и их последующей сборки.

Формование лопаток осуществляется отдельно в пресс-формах для большой и малой лопатки. Пресс-форма с уложенным собранным слоистым пакетом заготовки предварительно разогревалась, вакуумировалась. Пропитка велась расплавом связующего при температуре 150 °С. После формования в размер производится ступенчатое отверждение детали. Часть детали охлаждалась до комнатной температуры, другая часть детали нагревалась и отверждалась по режиму отверждения производителя связующего.

Для соединения лопаток в монолитное колесо часть лопатки (область соединения во втулку) принудительно полностью не отверждается, находясь в пропитанном, не полимеризованном состоянии. Это достигается путем установки теплового барьера в виде теплоизолирующего материала и охлаждения по линии, разделяющей лопатку на зону первичного отверждения поз. 1 (см. рис. 1) и зону вторичного отверждения поз. 2. После сборки лопаток в оснастке производится нагрев и совместное отверждение деталей в монолитное колесо [5].

Необходимость двухстадийности отверждения определяется клеевым способом соединения лопаток в теле втулки. Это позволяет применить то же связующее в качестве клея, что более технологично, и снижает концентрацию напряжений в материале на границе перехода от зоны поз. 1 (см. рис. 1) к области заделки – зона втулки поз. 2. Фактически производится склеивание двух деталей, изготовленных в разные периоды времени.

Для нагрева пресс-формы использовались малогабаритные нагреватели. Управление нагревом велось с помощью программного измеритель-регулятора «Овен» тип ТРМ-500 (ТРМ-251) и преобразователей термоэлектрических типа ДТПК.

Изготовление соединения лопатки и втулки по схеме патента РФ №2432502 [1] позволило усовершенствовать способ клеевого соединения, что стало основанием к созданию нового патента РФ № 2652269 «Способ изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из композиционного материала и способ его изготовления» [5].

Схема происходящего процесса представлена на рис. 10. Первая ступень отверждения (рис. 10, а) зона отверждения – зона, представляющая собой часть детали ПКМ, пропитанная связующим, где прошло или производится отверждение (полимеризация).

Часть детали имеет стабильные размеры, твердую поверхность. Пограничная и неотвержденная зона (место клеевого соединения) также представляют собой части детали, где не прошло отверждение, имеют не стабильные размеры, менее твердая поверхность в пограничной зоне и исходное состояние связующего в зоне будущего клеевого соединения. Вторая стадия отверждения – это клеевое соединение отформованных деталей. Соединение (формование изделия) производится в сборочной пресс-форме. Детали устанавливаются в сборочную пресс-форму, позиционируются в рабочем положении с помощью механических поддержек. Далее специальным пуансоном (в зависимости от конструкции изделия) создается механическое давление на соединяемые детали и производится отверждение по технологическим режимам производителя связующего.

Приостановка отверждения позволяет использовать единую матрицу для клеевого соединения. Таким образом, имея детали из ПКМ, где состояние связующего не полностью отверждено или находится в исходном состоянии [5, 6], в процессе второй ступени отверждения появляется возможность их встраивания в интегральные конструкции с помощью клеевого соединения (стадийное формообразование геометрически сложных поверхностей на основе одного типа матриц в монолитное изделие без границ полимеризации).



Рис. 10. Схема процесса ступенчатого отверждения клеевого соединения ПКМ:
 а – первая ступень отверждения. Формование детали с отвержденной частью ПКМ;
 б – вторая ступень отверждения. Формование клеевого соединения в пресс-форме

Ступенчатое отверждение позволяет готовить монолитные геометрически сложные изделия с единой матрицей в несколько стадий формования. Например, лопатки рабочего колеса компрессора (см. рис. 1) из волокнистого материала или

изделий типа направляющий аппарат газотурбинного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Способ** изготовления рабочего колеса компрессора из композиционного материала и способ его изготовления / В. А. Грибановский и др. // Патент РФ № 2432502, 27.10.2011. Бюл. № 30. [V. A. Gribanovskij et. al., "Method of manufacturing the impeller of a centrifugal compressor of a composite material and method of its manufacture", Patent RF 2532502, 2011.]

2. **Царахов Ю. С.** Конструирование соединений элементов летательных аппаратов из композиционных материалов: учеб. пособие. М.: МФТИ, 1980. 81 с. [Y. S. Carehow, *Design of connections of elements of aircrafts made of composite materials*, (in Russian). Moscow: MFTI, 1980.]

3. **Карпов Я. С., Кривенда С. П., Рябков В. И.** Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию. Харьков: ХАИ, 1997. 200 с. [Y. S. Karpov, S. P. Krivenda, V. I. Ryabkov, *Design and construction of joints of parts made of composite materials*, (in Russian). Kharkov: HAI, 1997.]

4. **Способ** изготовления рабочего колеса компрессора из композиционного материала / С. Н. Никитин и др. // Патент РФ № 2652269, 25.04.2018. [S. N. Nikitin et. al., "Method of manufacturing the impeller of centrifugal compressor from composite material", Patent RF №. 2652269, 2018.]

5. **Сварка** полимерных материалов: справочник / К. И. Зайцев и др. М.: Машиностроение, 1988. 312 с. [K. I. Zaytsev et. al., *Welding of polymeric materials*, (in Russian). Moscow: Mashinostroyeniye, 1988.]

6. **Шишкин В. А., Тростянская Е. Б., Гончаренко В. А.** Применение химической сварки для отверждения изделий из полимерных материалов: материалы семинара «Сварка полимерных материалов». М.: Общество Знание, Московский Дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, 1974. 206 с. [V. A. Shishkin, E. B. Trostyanskaya, V. A. Goncharenko, *The use of chemical welding for curing products from polymeric materials*, (in Russian). Materialy seminar "Svarka polimernyh materialov". Moscow: Obshchestvo Znanie, Moskovskij Dom nauchno-tekhnicheskoy propagandy im. F. E. Dzerzhinskogo, 1974.]

7. **Каримбаев Т. Д., Даньшин К. А.** Рабочее колесо компрессора. Патент РФ № 2382910 С1. Опубл. 27.02.2010. Бюл. № 6. [T. D. Karimbaev, K. A. Dan'shin K. A., "Compressor impeller", Patent № 2382910, 2010.]

8. **Соловьёв П. В.** Прочность стержневых элементов конструкций из слоистых композитов с учетом их структуры. Специальность 01.02.06. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Уфа, УГАТУ, 2016. 16 с. [P. V. Solovyov, *Strength of stem elements of constructions from layered composites taking into account their structure*. PhD. Ufa: USATU, 2016.]

ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательных аппаратов (УГАТУ, 1992). засл. деят. науки РФ. Академик

АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

ЮРЬЕВ Виктор Леонидович, проф. Дипл. инж. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. комплексной технологии сложнофасонных деталей ГТД, АО НИИТ.

СОЛОВЬЕВА Анастасия Валерьевна, директор программы ПДВ – Главный конструктор АО «ОДК–Климов».

НИКИТИН Сергей Николаевич, соискатель каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1996). АО НИИТ. Иссл. в обл. композиционных материалов.

METADATA

Title: Designing and manufacturing the working wheel from composition material

Authors: V. S. Zhernakov¹, V. L. Yuriev², A. V. Solovyova³, S. N. Nikitin⁴

Affiliation:

¹ Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

^{2,4} Ufa Institute of Technology and the organization of production (NIIT), Russia

³ St. Petersburg, JSC "ODK–Klimov"

Email: ¹ zhvs@ugatu.su, ^{2,4} nio-8450@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 3 (85), pp. 13-18, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The possible ways of using the polymer composite material (PCM) in the design of the impeller (RK) of the compressor are considered, taking into account the peculiarities of mechanics and manufacturing technology of composite materials. The results of the calculation of the FEM 3D model of RK from laminated carbon fiber on the PN-3M binder are given, taking into account the number of layers and the angle of exposure required to obtain the required strength values under operating conditions, including temperature conditions. The maximum stresses and deformations, as well as the displacements of the construction nodes, on the basis of which the most intense zones of the blade and the base of the disk were established under operating conditions, were identified. Recommendations for the creation of the Republic of Kazakhstan are presented and the technological possibility of its manufacture from a composite material is shown.

Key words: impeller, composite materials, deformation, binder, adhesive bonding, carbon fiber, PCM.

About authors:

ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich, prof., Head. kaf Resistance of materials. Dipl. mechanical engineer (UAI, 1967). Dr. tech. Sciences on heat engines aerial. devices (USATU, 1992). merits activities science of the Russian Federation. Corresponding Member of the Academy of Sciences of RB. Ex. In the region mechanics of a deformable solid.

YURIEV, Viktor Leonidovich, Prof., Dept. of Mechanical Engineering.(UAI, 1973) Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2000). JSC NIIT.

SOLOVYOVA, Anastasia Valerievna, director of the PDV program – Chief designer, JSC «ODK–KLIMOV».

NIKITIN, Sergey Nikolaevich, Postgrad. of UGATU. Ingenier. of Tech. (UGATU, 1996), research in the field of composite materials. JSC NIIT.