

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОГО ЛИТЬЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2021

- А. М. Фарамазян** инженер-конструктор сектора «Анализ конструкций малоразмерных газотурбинных двигателей»;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, Москва;  
[araik.faramazyan@gmail.com](mailto:araik.faramazyan@gmail.com)
- С. С. Ремчуков** начальник сектора «Анализ конструкций малоразмерных газотурбинных двигателей»;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, Москва;  
[ssremchukov@ciam.ru](mailto:ssremchukov@ciam.ru)
- И. В. Демидюк** инженер-конструктор сектора «Анализ конструкций малоразмерных газотурбинных двигателей»;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, Москва;  
[viksikmoy@yandex.ru](mailto:viksikmoy@yandex.ru)

Обосновано применение технологий литья при изготовлении деталей и узлов малоразмерных газотурбинных двигателей. Проведена отработка технологии вакуумного литья в гипсовые формы при изготовлении экспериментального центробежного компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя. По 3D-модели спроектированного центробежного компрессора проведены расчётные исследования вакуумного литья и определены рациональные параметры технологического процесса. Изготовлены опытные образцы разработанного центробежного компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя. Результаты расчётов и проведённого технологического эксперимента подтвердили заполняемость литниковой формы и отсутствие недоливов. Распределение пористости и раковин при усадке соответствует расчётным значениям и концентрируется в центральной части отливки, которая подвергается последующей механической обработке. Область лопаток, диска и втулки формируется без дефектов. Применение технологий литья при изготовлении деталей и узлов малоразмерных газотурбинных двигателей обеспечивает требуемое качество при сравнительно низкой цене готового изделия, чем достигается баланс между ценой технологии и качеством производимого с её помощью продукта.

*Вакуумное литьё; центробежный компрессор; малоразмерный газотурбинный двигатель*

---

**Цитирование:** Фарамазян А.М., Ремчуков С.С., Демидюк И.В. Применение технологии вакуумного литья при изготовлении лопаточных машин малоразмерных газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 152-159. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-152-159

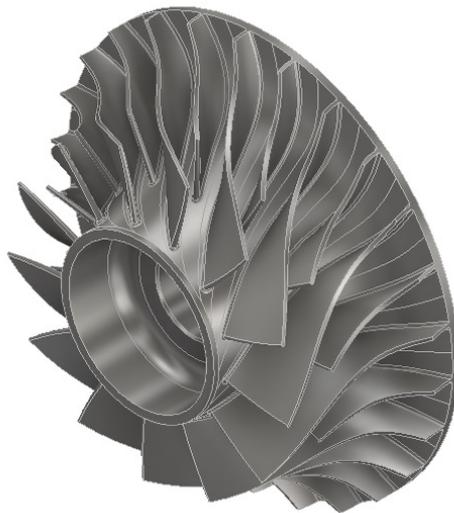
### Введение

В настоящее время наблюдается рост интереса отечественной авиационной промышленности к малоразмерным газотурбинным двигателям (МГТД) различного типа и назначения. Разработка МГТД различного типа и назначения для современных летательных аппаратов (ЛА), в том числе беспилотных (БЛА), невозможна без развития технологической базы [1 – 3]. При этом технологии, применяемые в авиационном двигателестроении малой размерности, должны обеспечивать недорогое и быстрое изготовление деталей и узлов МГТД требуемого качества. Важно отметить, что применяемые технологии должны встраиваться в массовое производство, что позволит облегчить переход от опытного двигателя к серийному выпуску.

Широкая номенклатура деталей МГТД требует применения ряда ключевых технологий, обеспечивающих изготовление как мелких и точных деталей, так и крупных изделий (например, корпусов) [4]. Отдельным вопросом является изготовление лопаточных машин – компрессора и турбины. Одной из наиболее востребованных в этом случае технологий можно считать литьё, позволяющее изготавливать детали сложной геометрии и широкого размерного ряда.

### **Объект исследования**

Отработка технологии вакуумного литья в гипсовые формы проводилась при изготовлении центробежного компрессора разрабатываемого экспериментального МГТД. Внешний вид рабочего колеса центробежного компрессора МГТД представлен на рис. 1.



*Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора МГТД*

Рабочее колесо одноступенчатого центробежного компрессора изготавливается методом литья из алюминия, содержит в себе 13 полноразмерных и 13 укороченных лопаток. На задней поверхности диска расположен прилив, в котором размещаются отверстия для установки цилиндрических штифтов, участвующих в передаче крутящего момента на вал ротора.

### **Изготовление рабочего колеса центробежного компрессора**

Из-за невозможности создания разъёмной пресс-формы для создания выплавляемой модели отливки рабочего колеса компрессора для изготовления применяется технология литья в гипсовые формы в вакууме [5].

С использованием методов компьютерного моделирования и посредством проведения технологических экспериментов были определены параметры процесса заливки и затвердевания отливки в условиях вакуума [6].

Расчёт этих параметров ведётся на основе конечно-элементной сеточной модели, получаемой из 3D-модели отливки с литниковой системой. Решатель использует метод конечных элементов, что обеспечивает высокую точность описания геометрии отливки и формы расчётной модели, учёт большинства процессов теплового, кристаллизационного, металлургического, напряжённо-деформированного характера. Расчёт гидродинамики описывается полным уравнением Навье-Стокса и может проводиться совмест-

но с анализом кристаллизации и напряжений. Гидродинамический решатель учитывает вязкость сплава в зависимости от его температуры. Есть возможность рассчитать пористость и междендритную усадку с учётом растворённых в металле газов. Модуль расчёта микропористости учитывает рост дендритных ветвей первого и второго порядка и определяет подпитку металла в твердожидкой зоне, локализованного дендритным каркасом. Учёт подпитки возможен как в условиях гравитационного питания, так и при дополнительном давлении в системе. В модуле используется модель, основанная на решении уравнения Дарси и микросегрегации газа, которая объединена с моделью микропористости и с прогнозом образования усадочной раковины.

Основные требования к отливкам – отсутствие недоливов, усадочных дефектов и микропористости в теле отливки. С использованием методов компьютерного моделирования был проведён расчёт процессов заливки и затвердевания материала отливки. В результате исследования были скорректированы температура формы и температура заливки (температура перегрева), поскольку при изначально рекомендованных параметрах литья ( $t_{\text{перегрева}} = 80^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{формы}} = 100^{\circ}\text{C}$ ) в теле отливки концентрировались усадочные дефекты (рис. 2), ухудшающие прочностные характеристики материала.

Также была скорректирована форма отливки посредством изменения технологических припусков диска рабочего колеса для смещения зон усадочных дефектов в область отливки, удаляемой при механической обработке.

Параметры заливки методом вакуумного литья в гипсовые формы рабочего колеса компрессора представлены в таблице.

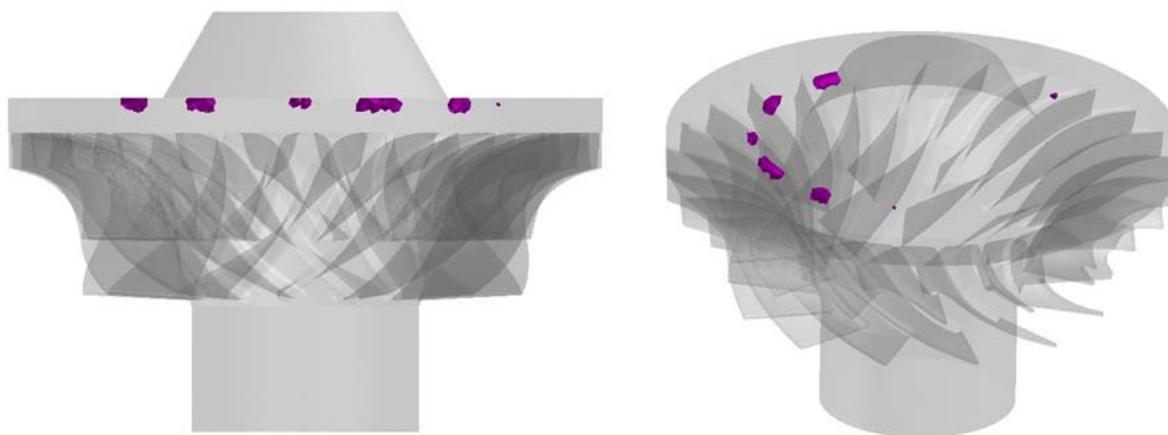


Рис. 2. Компьютерное моделирование концентрации усадочных дефектов в теле отливки после затвердевания

Таблица. Параметры заливки рабочего колеса компрессора

Параметр	Значение
Температура заливки, °C	690
Перегрев, °C	100
Температура формы, °C	290
Скорость заполнения, мм/с	100...120
Охлаждение поверхности формы	Воздушная среда
Суммарный коэффициент объёмной усадки	1,0244

Литая заготовка рабочего колеса имеет технологические припуски на задней и передней торцевых поверхностях диска, а также на периферийной части рабочих лопаток (рис. 3). В литой детали находится отверстие, назначение которого заключается в уменьшении толщины литой детали для снижения концентрации литевых дефектов. Отверстие, как и передняя цилиндрическая втулка, имеет конусность  $1...3^\circ$  для обеспечения извлекаемости литой детали из литейной формы.

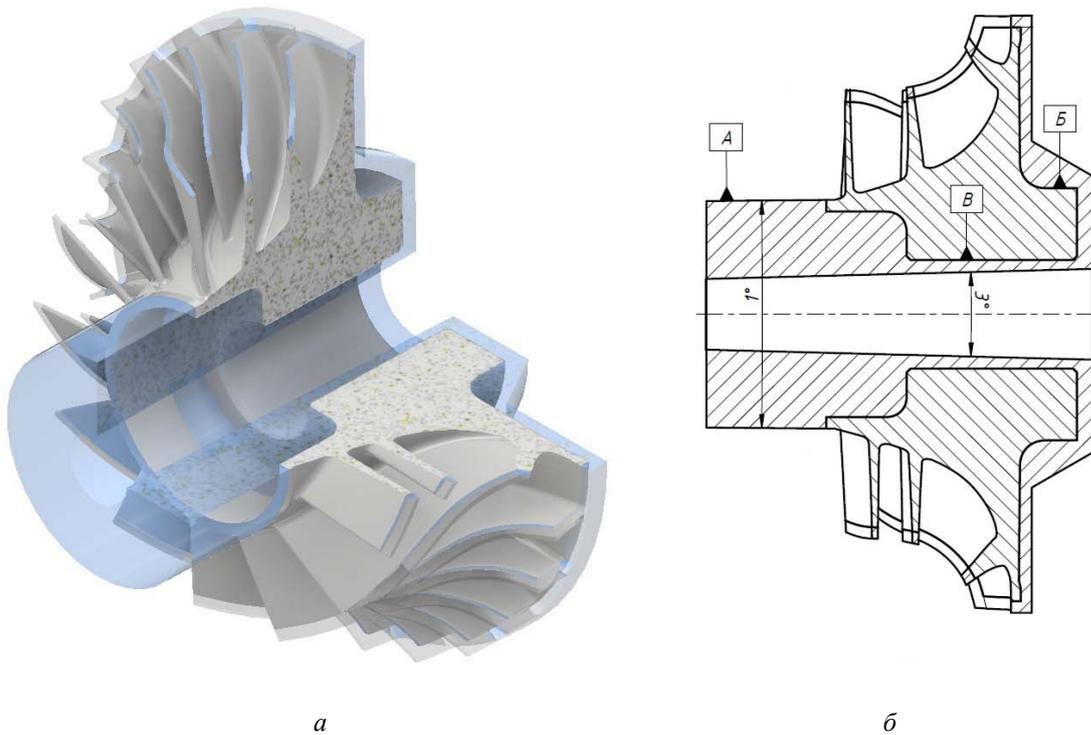


Рис. 3. Технологические припуски, технологические базы и схема балансировки рабочего колеса компрессора:  
 а – припуски литой детали (припуски показаны прозрачным цветом);  
 б – принципиальная схема крепления и обработки литой заготовки

Технологические припуски удаляются последовательной механической обработкой рабочего колеса. На первом этапе деталь фиксируется по передней цилиндрической втулке литой заготовки (технологическая база А, рис. 3, б), после чего формируется внешняя задняя поверхность диска (технологическая база В, рис. 3, б). Далее деталь фиксируется по заднему цилиндрическому приливу и производится снятие припусков периферии лопаток и переднего торца диска, формируется цилиндрическое осевое отверстие рабочего колеса (технологическая база В, рис. 3, б). Балансировка рабочего колеса выполняется относительно осевого отверстия колеса (технологическая база В, рис. 3, б). Металл для балансировки удаляется с переднего торца и заднего прилива диска, поскольку эти области не являются нагруженными центробежными силами при работе ступени.

Для подтверждения пролива формы, отсутствия усадочных дефектов и повторяемости качества была изготовлена методом лазерного селективного спекания опытная мастер-модель колеса компрессора (рис. 4) и изготовлена опытная партия отливок (рис. 5).



*Рис. 4. Мастер-модель центробежного колеса компрессора*



*Рис. 5. Опытные образцы литых центробежных колёс компрессора*

Результаты расчётов и технологических экспериментов показали, что форма заполняется полностью, недоливы отсутствуют. Дефекты концентрируются в центральной части отливки, которая подвергается механической обработке. Область лопаток, диска и втулки формируется без дефектов.

## Заключение

По результатам проведённой работы сделаны следующие выводы.

1. Разработка МГТД требует соответствующего развития технологической базы. Технологии, применяемые в малоразмерном авиационном двигателестроении, должны обеспечивать требуемое качество деталей и узлов при приемлемых показателях себестоимости, а также допускать возможность перевода в серийное производство.

2. Технология вакуумного литья является одной из наиболее востребованных в малоразмерном авиадвигателестроении. Вакуумное литье применимо при создании таких сложных деталей, как лопаточные машины.

3. Проведена отработка технологии вакуумного литья в гипсовые формы при изготовлении рабочего колеса центробежного компрессора.

4. С применением методов компьютерного моделирования и посредством проведения технологических экспериментов были определены параметры процесса заливки и затвердевания отливки в условиях вакуума. Проведённые исследования позволили добиться наилучших параметров заливки рабочего колеса.

5. Для подтверждения пролива формы, отсутствия усадочных дефектов и повторяемости качества была изготовлена мастер-модель колеса компрессора и опытная партия отливок.

6. Подтверждена экспериментально полная заполняемость формы и отсутствие недоливов. Концентрация дефектов установлена в центральной части отливки, которая подвергается последующей механической обработке. Область лопаток, диска и втулки формируется без дефектов.

## Библиографический список

1. Луковников А.В., Ланшин А.И., Полев А.С. Формирование научно-технического задела по двигателям и силовым установкам летательных аппаратов 2030-х годов как основа успеха их создания // Сборник научных трудов «Авиационные двигатели и энергетические установки». М.: ЦИАМ, 2020. С. 51-59.

2. Осипов И.В., Ремчуков С.С. Малоразмерный газотурбинный двигатель со свободной турбиной и теплообменником системы регенерации тепла в классе мощности 200 л.с. // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 81-90.

3. Ланшин А.И., Полев А.С. Анализ долгосрочных тенденций ключевых научно-технических и технологических проблем и прогноз развития авиационных двигателей для летательных аппаратов 2030...2035 годов // Сборник научных трудов «Авиационные двигатели и энергетические установки». М.: ЦИАМ, 2020. С. 7-21.

4. Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н. Особенности применения лазерных технологий в процессе создания пластинчатых теплообменников для малоразмерных газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 2. С. 90-98. DOI: 10.34759/vst-2020-2-90-98

5. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Технология литейного производства: Специальные виды литья. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 352 с.

6. Литьё по выплавляемым моделям / под ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.

## APPLICATION OF THE VACUUM CASTING TECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF SMALL-SIZE GAS TURBINE ENGINE BLADE MACHINES

© 2021

- A. M. Faramazyan** Design Engineer of the Department “Analysis of small-size gas turbine engine designs”;  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
[araik.faramazyan@gmail.com](mailto:araik.faramazyan@gmail.com)
- S. S. Remchukov** Head of the Department “Analysis of small-size gas turbine engine designs”;  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
[ssremchukov@ciam.ru](mailto:ssremchukov@ciam.ru)
- I. V. Demidyuk** Design Engineer of the Department “Analysis of small-size gas turbine engine designs”;  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
[viksikmoy@yandex.ru](mailto:viksikmoy@yandex.ru)

The application of casting technologies in the production of parts and assemblies of small-size gas turbine engines is justified in the paper. The technology of vacuum casting in gypsum molds was tested during the production of an experimental centrifugal compressor of a small-size gas turbine engine. On the basis of a 3D model of the designed centrifugal compressor, computational studies of vacuum casting were carried out and rational parameters of the technological process were determined. Prototypes of the developed centrifugal compressor of a small-size gas turbine engine were made. The results of calculations and the performed technological experiment confirmed the fill rate of the gating form and the absence of short pour. The distribution of shrinkage porosity and cavities corresponds to the design values and is concentrated in the central part of the casting that is subjected to subsequent machining. The area of the blades, disc and sleeve is formed without defects. The use of casting technologies in the production of parts and assemblies of small-size gas turbine engines assures the required quality with a comparatively low price of the finished product, making it possible to achieve the balance between the cost of the technology and the quality of the product made according to this technology.

*Vacuum casting; centrifugal compressor; small-size gas turbine engine*

---

**Citation:** Faramazyan A.M., Remchukov S.S., Demidyuk I.V. Application of the vacuum casting technology in the production of small-size gas turbine engine blade machines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 152-159. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-152-159

### References

1. Lukovnikov A.V., Lanshin A.I., Polev A.S. Formirovanie nauchno-tehnicheskogo zadela po dvigatelyam i silovym ustanovkam letatel'nykh apparatov 2030-kh godov kak osnova uspekha ikh sozdaniya. *Sbornik nauchnykh trudov «Aviatsionnye dvigateli i energeticheskie ustanovki»*. Moscow: Central Institute of Aviation Motors Publ., 2020. P. 51-59. (In Russ.)
2. Osipov I.V., Remchukov S.S. Small-size gas turbine engine with free turbine and heat recovery system heat exchanger within the 200 HP power class. *Aerospace MAI Journal*. 2019. V. 26, no. 2. P. 81-90. (In Russ.)
3. Lanshin A.I., Polev A.S. Analiz dolgosrochnykh tendentsiy klyuchevykh nauchno-tehnicheskikh i tekhnologicheskikh problem i prognoz razvitiya aviatsionnykh dvigateley dlya letatel'nykh apparatov 2030...2035 godov. *Sbornik nauchnykh trudov «Aviatsionnye dvigateli i energeticheskie ustanovki»*. Moscow: Central Institute of Aviation Motors Publ., 2020. P. 7-21. (In Russ.)
4. Remchukov S.S., Lebedinskii R.N. Laser technologies application specifics while plate heat exchangers developing for small-size gas turbine engines. *Aerospace MAI Journal*. 2020. V. 27, no. 2. P. 90-98. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-2-90-98

5. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Tekhnologiya liteynogo proizvodstva: Spetsial'nye vidy lit'ya* [The process of casthouse production: Special kinds of casting]. Moscow: Izdatel'skiy Tsentr «Akademiya» Publ., 2005. 352 p.

6. *Lit'e po vyplavlyаемым modelyam / pod red. Ya.I. Shklennika, V.A. Ozerova* [Investment casting / ed. by Ya.I. Shklennik, V.A. Oserov]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984. 408 p.