

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЛИТЬЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

© 2014 В.Г. Смелов, А.В. Балякин, А.В. Агаповичев, Р.А. Вдовин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Применение технологий быстрого прототипирования предоставляют уникальную возможность применения экономически эффективных методов для производства деталей по выплавляемым моделям. Разработка и исследование технологий быстрого прототипирования позволили перейти на новый уровень оптимизации и внедрения новых технологий в различных отраслях промышленности. На этапе опытного производства, для которого характерно частое изменение конструкции, проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой. Это связано со сложностью и трудоёмкостью изготовления литейной оснастки. Разработки и исследования технологий быстрого прототипирования позволили перейти на новый уровень оптимизации и внедрения новых технологий в литье по выплавляемым моделям. Цель данной работы заключается в определении возможностей и оценки точности получаемых размеров отливки при литье по выплавляемым моделям с использованием технологии быстрого прототипирования. Работа велась с использованием сквозного проектирования в САМ/CAD/CAE системах. Исследование размерно-точных параметров отливки велось на координатно-измерительной машине. В ходе работы была проверена адекватность виртуального моделирования процесса формообразования отливки в системе моделирования литейных процессов ProCAST по полученным отливкам. Исследование показало что применение технологий быстрого прототипирования при литье по выплавляемым моделям позволяет существенно сократить сроки изготовления отливок, снизить затраты на производство и повысить точность размеров отливки.

*Аддитивные технологии, быстрое прототипирование, силиконовая форма, восковая модель, керамическая форма.*

Литейные жаропрочные сплавы на никельхромовой основе в настоящее время широко применяются для деталей газотурбинных двигателей.

Применение технологий быстрого прототипирования позволило перейти на новый уровень проектирования и изготовления деталей различной сложности в различных отраслях промышленности.

Технология литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) позволяет получать из жаропрочных, труднообрабатываемых и не поддающихся механической обработке сплавов детали самой сложной конфигурации с высокой геометрической точностью.

Детали, полученные методом ЛВМ, не нуждаются в последующей механической обработке, за исключением сопрягаемых поверхностей, что позволяет мини-

мизировать механическую обработку и значительно снизить расход материала.

Ко всему вышесказанному метод ЛВМ является одним из самых экономичных при создании сложных деталей, а иногда и единственным возможным методом литья, например, когда детали имеют сложную форму или тонкие стенки.

Всё больше направлений промышленности активно осваивают аддитивные технологии [1].

Отличительной особенностью аддитивных технологий является тот факт, что построение модели происходит путём добавления материала, в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путём удаления материала.

Лаборатория аддитивных технологий является подразделением центра

коллективного пользования «межкафедральный учебный научно-производственный центр САМ – технологий» (ЦКП «САМ-технологий»).

В лаборатории установлено оборудование позволяющее получать прототипы изделий и мастер-модели по имеющимся твёрдотельным моделям построенных в САД системах (3D модели) в минимальные сроки с высокой геометрической точностью. 3D принтер Objet 350 израильской фирмы EDEN имеет поле для печати изделий до 350×350×200мм, точность печати до 16 мкм. Принтер может выращивать модель из десяти различных материалов, имеющих различные физические свойства.

Основными преимуществами технологии быстрого прототипирования являются:

- сокращение длительности технической подготовки производства новой продукции в 2-4 раза;
- снижение себестоимости продукции, особенно в мелкосерийном или единичном производстве, в 2-3 раза;
- значительное повышение гибкости производства;
- сквозное использование компьютерных технологий, интеграция с системами САПР.

Малые размеры стартёра и ротора турбины, наличие сложных, тонкостенных поверхностей (наибольшее сечение пера лопатки стартёра и ротора турбины составляет 0,8 мм) делают их изготовление традиционными методами литья затруднительными и дорогостоящими.

В статье изложен опыт практического применения аддитивных технологий, в частности метода быстрого прототипирования и способа заливки воска в силиконовые формы, для изготовления деталей малоразмерного газотурбинного двигателя (ГТД).

Метод быстрого прототипирования особенно актуален в тех случаях, когда необходимо в короткие сроки изготовить пластиковые прототипы или восковые

модели сложной формы и высокого качества [2].

Процесс производства деталей включает в себя следующие основные стадии:

- разработка 3D модели детали;
- разработка 3D модели отливки;
- изготовление мастер-модели и литниково - питающей системы;
- сборка мастер-модели с литниково-питающей системой;
- изготовление силиконовой формы;
- изготовление восковых моделей;
- изготовление керамических форм;
- заливка материала в керамическую форму;
- контроль полученной отливки.

Для изготовления мастер - моделей или прототипов изделия необходимо иметь её объёмную модель, построенную в САД системе.

Для построения объёмной модели изделия (рис. 1) использовалась система автоматизированного проектирования, производства и инженерного анализа САД/САМ/САЕ NX 8.5 фирмы Siemens PLM Software.

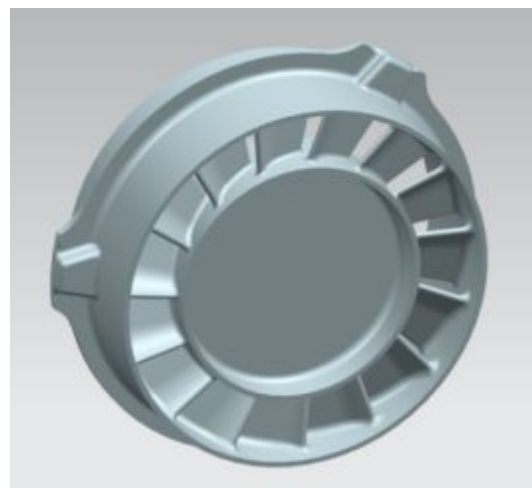


Рис. 1. Модель детали, выполненная в САД/САМ/САЕ системе NX

Затем была построена объёмная модель заготовки путём оптимизации формы детали для возможности получения её методами литья, добавлением припусков на механическую обработку, прибавлением технологических

прибылей, напусков и формированием литниково - питающей системы (рис. 2). Также при создании объёмной модели заготовки учитывалась усадка материала, что в дальнейшем позволило создать деталь, не требующую механической обработки, за исключением сопрягаемых поверхностей.



Рис. 2. 3D модель заготовки ротора турбины

Коэффициент усадки материала определяется по следующим формулам:

$$L_B = L_M - L_M \cdot \beta = L_M(1 - \beta);$$

$$L_L = L_B - L_B \cdot \alpha = L_B(1 - \alpha) = L_M(1 - \alpha)(1 - \beta);$$

$$L_L = L_M - L_M(\alpha + \beta) - L_M \cdot \alpha\beta,$$

где  $\alpha$  – коэффициент усадки металла,  $\beta$  – коэффициент усадки воска,  $L_B$  – габаритный размер восковки,  $L_L$  – габаритный размер отлитой детали,  $L_M$  – габаритный размер фотополимерной модели. Учитывая малые значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , слагаемое  $L_M \cdot \alpha\beta$  можно считать пренебрежимо малым. В случае использования жаростойкого сплава и модельного воска  $\alpha = 1,5\%$ ,  $\beta = 1\%$ . Усадка керамической формы в соответствии со справочными данными составляет 1%. Тогда общий коэффициент усадки равен 3,5%.

Перед изготовлением мастер - модели было произведено виртуальное моделирование процесса формообразования заготовки в САЕ - системе моделирования литейных процессов ProCAST,

что позволило существенно сэкономить время и средства при разработке и оптимизации процесса заливки. В ходе моделирования первоначальная форма литниково - питающей системы заготовки претерпела существенное изменение с целью её оптимизации и улучшения по сравнению с первоначальным вариантом в соответствии с результатами расчёта, произведённого в системе ProCAST.

ProCAST - система моделирования литейных процессов, обеспечивающая совместное решение температурной, гидродинамической и деформационной задач, обладающая уникальными возможностями изучения всех возможных процессов литья из литейных сплавов. Дополнительное преимущество ProCAST состоит в том, что можно провести расчёт напряжений, микроструктуры и моделировать более экзотические процессы литья [3].

Предварительное моделирование в САЕ системе позволяет быстро и недорого оптимизировать литниково - питающую систему, провести виртуальную заливку литникового дерева. Это приводит к минимизации брака при изготовлении отливки и минимизирует, а иногда и устраняет полностью необходимость в пробных заливках [4].

Следующим этапом явилось изготовление с помощью 3D принтера мастер - модели (рис. 3), которая в дальнейшем используется для получения эластичных форм из силиконового компаунда.



Рис. 3. Мастер – модель статора турбины малоразмерного газотурбинного двигателя

Изготовленная мастер - модель проверяется на отсутствие брака (царапин, скола). Перед изготовлением эластичных форм геометрию мастер - модели проверяли на контрольно-измерительной машине.

Основным принципом изготовления восковых моделей, по технологии литья в эластичные формы, является точное копирование мастер - модели. Форма изготавливается заливкой полимеризующегося силикона со всех сторон мастер - модели.

В ЦКП разработана методика проектирования и изготовления силиконовых форм (рис. 4) с использованием различных методов формирования поверхностей разъёма, формирования внутренних полостей и центровки различных знаков.



*Рис. 4. Силиконовая форма ротора турбины*

Дегазация силикона перед заливкой формы, проводимая при помощи 5/04 Vacuum casting system позволяет исключить поверхностные дефекты и пористость структуры.

Максимальные габариты изготавливаемых деталей (отливок) составляют 800×500×400 мм, максимальная масса деталей - 4...5 кг.

Силиконовая форма может быть использована для изготовления литейной модели на небольшое количество деталей (около 100 штук).

Литьё восковых моделей в эластичные формы в вакууме позволяет получать опытные образцы и небольшие партии

деталей из воска без применения сложной и дорогостоящей оснастки.

Применяемые в настоящее время современные материалы позволяют создавать керамические формы высокого качества, с минимальным припуском и высоким качеством поверхности изделия.

Для предотвращения образования трещин в оболочке керамической формы в процессе «нагревание – охлаждение – отжиг» применялась специальная технология, позволяющая достичь наилучшего результата.

Получение керамической формы - это сложный и длительный по времени процесс. Сначала наносят и затем высушивают в специальной сушильной камере в течение 4 ... 5 часов первый слой керамики. Затем наносят второй слой и последующие слои. Для получения нужной прочности формы наносят 15 - 20 слоев (рис. 5).

Затем из полученных керамических форм при температуре 100...120°C выплавляют восковую копию, после чего внутри керамической формы образуются внутренние полости, являющиеся литниковой системой и оболочкой получаемой детали. Процесс выплавления воска должен происходить как можно быстрее, иначе керамическая форма может быть испорчена.



*Рис. 5. Керамическая форма*

Восковую модель выплавляют при температуре 900...950°C в течение 2 часов, затем температуру в печи понижают и выдерживают форму ещё в течение 2 часов. Оставшийся шлак из формы удаляют механическим путём. После этого керамическая форма становится пригодной для заливки в неё металла.

Металл в форму заливают с использованием индукционной печи. Заливку металла производят в вакууме, что в сочетании со специальной выдержкой при температуре 1500...1600°C позволяет минимизировать количество нежелательных примесей и уменьшить, а в некоторых случаях и совсем устранить образование шлаковой плёнки, образующейся при расплавлении металла. После заливки и остывания материала керамическую форму разрушают и получают готовое изделие.

Таким образом были отлиты статор (рис. 6) и ротор турбины малоразмерного газотурбинного двигателя.

Был проведён анализ микроструктуры полученных деталей. Анализ показал соответствие микроструктуры отливок техническим требованиям. Показатели твёрдости также соответствуют техническим требованиям.



Рис. 6. Статор турбины малоразмерного газотурбинного двигателя с литниково – питающей системой

Применение технологии быстрого прототипирования совместно с методом литья по выплавляемым моделям позволило получить годные и качественные отливки статора и ротора турбины малоразмерного ГТД.

Описанная в данной статье технология производства деталей методом литья по выплавляемым моделям с применением технологии быстрого прототипирования позволяет в короткие сроки отрабатывать технологии производства деталей различной сложности, изготавливать тонкостенные детали сложной формы без применения сложной оснастки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777).

### Библиографический список

1. Зыбанов С.В., Смелов В.Г., Проничев Н.Д., Сурков О.С. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе сквозного использования информационных технологий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2009. № 3(34), ч. 3. С. 127-131.

2. Балякин А.В., Смелов В.Г., Чемпинский Н.Д. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета

имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), ч. 2. С. 47-52.

3. Вдовин Р.А. 3D виртуальное моделирование и оптимизация технологического процесса литья детали «завихритель II контура» ГТД с использованием компьютерных технологий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), ч. 3. С. 115-120.

4. Cheah C.M., Chua C.K., Lee C.W., Feng C., Totong K. Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications

for rapid investment casting // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005. V. 25, no. 3-4. P. 308-320.

### **Сведения об авторах**

**Агаповичев Антон Васильевич**, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Область научных интересов: использование CAD / CAM / CAE / CAPP систем в опытных и аддитивных технологиях, используемых в производстве деталей.

**Балякин Андрей Владимирович**, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [a\\_balik@mail.ru](mailto:a_balik@mail.ru). Область научных интересов: высокоскоростная обработка, использование CAD/CAM/CAPP систем.

**Смелов Виталий Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении деталей.

**Вдовин Роман Александрович**, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vdovin.ssau@gmail.com](mailto:vdovin.ssau@gmail.com). Область научных интересов: виртуальное CAD/CAE компьютерное моделирование технологических процессов литья деталей аэрокосмической отрасли.

## **DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE OF MOLDING SMALL COMPLEX PARTS OF GAS TURBINE ENGINES FROM HIGH-TEMPERATURE ALLOYS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES**

© 2014 A.V. Agapovichev, A.V. Balaykin, V.G. Smelov, R.A. Vdovin

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Rapid prototyping technologies provide a unique opportunity to receive cost-effective solutions for the production of parts by investment casting. Research and development of rapid prototyping technologies allowed to move to a next level of optimization and the introduction of new processes in various areas of industry. At the stage of pilot production, which is characterized by frequent changes in design, the problem of the rapid production of cast components becomes crucial. This is mainly due to the complexity and the complexity of manufacturing foundry equipment. In turn, the research and development of rapid prototyping technologies have allowed a new level of optimization and the introduction of new technologies in the investment casting. The aim of this work is to identify opportunities and evaluate accuracy of the size of the casting during investment casting using rapid prototyping technology. The work was conducted with the use of cross-cutting design in CAM / CAD / CAE systems. The study size and precision parameters of the casting was conducted in coordinate measuring machine. The work has been verified the adequacy of the virtual simulation of the process of forming a casting in the casting simulation ProCAST, in comparison with those obtained castings. The study showed that the use of rapid prototyping technologies with investment casting can significantly reduce the time for making castings, reduce production costs and improve the accuracy of the size of the casting.

*Additive technology, rapid prototyping, silicone mold, wax model, ceramic form.*

## References

1. Zybanov S.V., Smelov V.G., Pronichev N.D., Surkov O.S. Increase of efficiency of technological preparation of manufacture on the basis of through use of the information technology // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2009. No. 3(34), part 3. P. 127-131. (In Russ.)
2. Balyakin A.V., Smelov V.G., Chempinsky L.A. Additive technology application details of combustion // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 2. P. 47-52. (In Russ.)
3. Vdovin R.A. 3D virtual simulation and casting process optimization of part GTE "swirler of II duct" with using computer technologies // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 3. P. 115-120. (In Russ.)
4. Cheah C.M., Chua C.K., Lee C.W., Feng C., Totong K. Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005. V. 25, no. 3-4. P. 308-320.

## About the authors

**Agapovichev Anton Vasilevich**, post-graduate student of the aircraft engine production department. Samara State Aerospace University. E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Area of Research: The use of CAD / CAM / CAE / CAPP systems in pre-production and additive technologies used in the manufacture of parts.

**Balaykin Andrey Vladimirovich**, post-graduate student of the aircraft engine production department. Samara State Aerospace University. E-mail: [a\\_balik@mail.ru](mailto:a_balik@mail.ru). Area of Research: High-speed processing, the use of CAD / CAM / CAPP systems training.

**Smelov Vitaly Gennadievich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the aircraft engine production department. Samara State Aerospace University. E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Area of Research: the use of additive technology in the manufacture of parts.

**Vdovin Roman. Alexandrovich**, engineer of aircraft engines production department of Samara State Aerospace University. E-mail: [vdovin.ssau@gmail.com](mailto:vdovin.ssau@gmail.com). Area of Research: CAD/CAE computer modeling of process casting in aerospace.