

УДК 621.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

© 2016 А.В. Балякин, Е.М. Добрышкина, Р.А. Вдовин, В.П. Алексеев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 15.12.2016

Традиционный процесс изготовления турбинных лопаток методом литья по выплавляемым моделям ввиду технологической сложности является дорогостоящим и длительным по времени связанным с заливкой восковок, обеспечивающих получение сложных профилей с высокой геометрической точностью. Ускорение процесса литья по выплавляемым моделям должно повысить производительность процесса изготовления турбинных лопаток, однако, при этом нельзя допустить снижения геометрической точности получаемого изделия. Целью данной статьи является сравнение процессов изготовления лопаток турбины при различных температурных характеристиках с использованием метода быстрого прототипирования (заливка воска в силиконовые формы). Размерный анализ отлитых лопаток показал, что литье в силиконовые формы позволяет достичь требуемой геометрической точности. Таким образом, силиконовые формы могут стать хорошим экономически эффективным решением для мелкосерийного или опытного производства деталей турбинных лопаток газотурбинного двигателя. Данная статья описывает процедуру интегрированного использования аддитивных технологий и термографического анализа для ускорения процесса литья по выплавляемым моделям путем определения оптимальных температур и времени застывания, которые позволят улучшить экономические характеристики при этом сохраняя точность изготовления.

**Ключевые слова:** быстрое прототипирование, восковые модели, литье, организация производства и менеджмент, турбина.

### ВВЕДЕНИЕ

Лопатки являются основным компонентами газотурбинного двигателя (ГТД). Лопатки турбин имеют жесткие требования по точности изготовления, они производятся из жаропрочных сплавов методом литья по выплавляемым моделям. Точность полученных восковок определяет точность последующего получения металлических лопаток. Параметры заливки, такие как время заливки, время выдержки, температура заливки и рабочее давление играют ключевую роль при изготовлении восковой модели. Таким образом, контроль данных параметров позволяет предотвратить появление проблем, связанных с неоднородностью поверхности, пористостью и отклонения от заданных размеров, которые приводят к длительным операциям по исправлению литниково-питающей системы (ЛПС) для заливки металла. Одной из основных проблем литья по выплавляемым моделям является высокая сто-

*Балякин Андрей Владимирович, ассистент кафедры технологий производства двигателей.*

*E-mail: balaykinav@ssau.ru.*

*Добрышкина Елена Михайловна, магистрант кафедры технологий производства двигателей.*

*E-mail: dobryshkina93@mail.ru.*

*Вдовин Роман Александрович, аспирант кафедры технологий производства двигателей.*

*E-mail: vdovin.ssau@gmail.com.*

*Алексеев Вячеслав Петрович, аспирант кафедры технологий производства двигателей.*

*E-mail: alexeev\_v.p@mail.ru*

имость процесса в целом. Это связано с необходимостью использования специализированного оборудования, связующих материалов, устойчивых к высоким температурам, трудоемкостью процесса формирования оболочковой формы и неизбежного появления мелких дефектов, требующих последующего устранения. Кроме того, подготовка формы для заливки восковок так же занимает значительное время.

С учетом всех сложностей производства в данном случае (мелкосерийного производства) изготовления восковых моделей, традиционный процесс изготовления турбинных лопаток является слишком длительным и дорогостоящим. В этом случае идеально подходят технологии быстрого прототипирования, которые позволяют сократить время и стоимость производства в целом.

Главным отличием технологий быстрого изготовления пресс-формы от классического подхода заключаются в следующем:

Стоимость и время подготовки намного ниже, чем при стандартном подходе (обычно меньше в 5 раз).

Геометрическая точность ниже, чем при стандартном подходе.

Количество циклов использования значительно ниже, чем при стандартном подходе.

Технологии быстрого прототипирования – это наиболее экономически эффективное решение для производства мелких партий турбинных лопаток методами литья по выплавляемым моделям. Для изготовления силиконовой форм

используют выращенную на 3D принтере мастер-модель. Данная статья описывает разработку и применение данных технологий для новой области производства. Полученный метод может быть использован для изготовления силиконовой формы при литье восковых моделей в условиях изготовления турбинных лопаток, который применяется вместо традиционного производства металлической формы на станке с ЧПУ. Главная цель данного исследования – проанализировать вышеуказанные методы с точки зрения точности получаемых отливок.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования была выбрана лопатка турбины ГТД.

Данная лопатка изготавливается из жаропрочного сплава ЖС6К-ВИ на никелевой основе и весит 321 грамм. Процесс производства состоит из следующих стадий:

- построение 3D модели в CAD системе Siemens NX;
- выращивание мастер-модели лопатки
- изготовление силиконовой формы;
- заливка воска в силиконовую форму;
- покрытие восковок керамикой и удаление воска;
- заливка металла в керамическую оболочку.

### 1.1. Построение 3D модели

Компьютерная мастер-модель лопатки турбины строилась по чертежам, использовали средства поверхностного моделирования CAD/CAM/CAE системы Siemens NX. В начале формировались 2D профили сечений, после чего производилось соответствующее построение поверхностей, проходящих через созданные профили. При ее создании был заложен усадочный коэффициент, учитывающий следующие аспекты:

- усадка восковой отливки после заливки в силиконовую и эпоксидную формы, зависящие от температурного расширения используемого воска;
- усадка жаропрочного сплава после отверждения в керамической форме;
- усадка керамической формы.

Необходимый коэффициент усадки был определен согласно 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 лопатки,  $L_M$  – габаритный размер стереолитографической модели.

Учитывая малые значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , слагаемое  $L_M \cdot \alpha\beta$  можно считать пренебрежимо малым. Таким образом, поправочный коэффициент к стереолитографической мастер-модели представляет собой сумму коэффициентов усадки воска и металла. В случае использования жаростойкого сплава ЖС6К-ВИ и модельного воска,  $\alpha = 1,5\%$  а  $\beta = 1\%$ . Следует помнить, что полученная формула не учитывает усадку керамической формы, которая составляет примерно 1%. Таким образом, общий коэффициент усадки будет равен 3,5%.

### 1.2. Получение мастер-модели

Технологии быстрого прототипирования, позволяют быстро и легко получить трехмерный физический объект по объемной модели детали в CAD системе. Установка 3D принтера Objet 350 обладает высочайшим качеством печати, который позволяет создавать прототипы и модели с высокой детализацией и гладкой поверхностью. Мастер модели лопатки были изготовлены с использованием установки 3D принтера Objet350. Толщина слоя составляет 16 мкм.

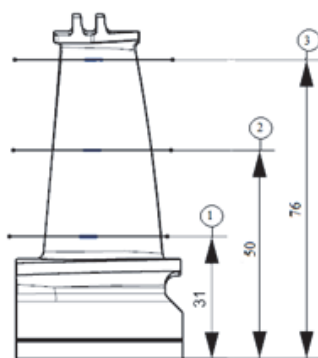
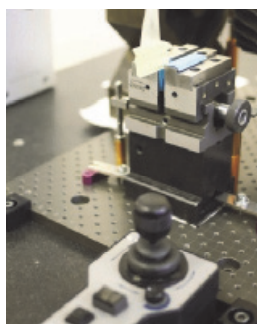
Перед созданием силиконовой формы, для исключения брака на этапе создания и выращивания мастер-модели, полученная мастер-модель была проконтролирована на координатно-измерительной машине (КИМ) DEA GLOBAL Performance 07.10.07 при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажности 80%. При контроле геометрических параметров лопатки использовалось специализированное программное обеспечение PC-DMIS CAD ++ Ver. 4.3 MR1.

Крепления лопатки на координатно-измерительной машине для проведения процесса измерения осуществлялось по поверхностям технологической прибыли в тисках (рис. 2а). Базирование лопатки осуществлялось по поверхностям замка, согласно рис. 2а. Расположение системы координат согласно 3D модели заготовки. Измерение пера лопатки мастер-модели детали «Лопатка СТ» осуществлялось в трех сечениях № 1, 2, 3 согласно карте замера (рис. 2б), на соответствие представленной 3D модели заготовки.

В ходе контроля было выявлено, что мастер-модель детали «Лопатка СТ» соответствуют требованиям по отклонениям геометрии поверхности пера. Величина отклонения не превысила допуска профиля +0,2 мм -0,15 мм.

### 1.3. Изготовление силиконовой формы

Формирование силиконовой формы проходит при комнатной температуре – это достаточно простой и проверенный способ изготовления. В таких условиях форма затвердевает благодаря химической реакции компонентов. Сначала мастер-модель погружается в контейнер из орг-



а б  
Рис. 1. Измерение мастер-модели на КИМ

стекла, после чего все содержимое заполняется силиконовой смесью и затвердевает. Когда форма окончательно застыла, она разрезается и модель извлекается. При последующей сборке силиконовой формы, между частями получается полость, которая полностью повторяет геометрию мастер-модели. После заполнения данной полости соответствующим воском в условиях вакуума, получается точная копия модели. Силиконовая форма может выдержать около 80-100 отливок. Этот процесс намного дешевле, по сравнению с традиционным изготовлением пресс-форм.

В данной работе, для изготовления силиконовой формы была использована модель лопатки, полученная с применением 3D принтера Objet EDEN 350.

Параметры заливки воска в силиконовую модель, такие как температура плавления, давление заливки, время выдержки и температура формы существенно влияют на точности получаемой восковки. Среди этих параметров, важнейшую роль в получении точных размеров играют температура заливки и время выдержки. Выбор времени выдержки главным образом зависит от скорости охлаждения, формы восковки и температуры плавления. Таким образом, после изготовления силиконовой формы, влияние времени выдержки на конечную точность восковки было проверено путем проведения термографического эксперимента, с целью определить наиболее подходящие условия заливки. Были проведены серии тестовых заливок воска с применением принудительного охлаждения путем обдува форм и без него. Следовательно, полученные результаты представлены на рисунке 2. Можно заметить, что с использованием принудительного обдува силиконовая форма остывает за 2 часа 30 минут, а время выдержки силиконовой формы при комнатной температуре составляет 4 часа. С экономической точки зрения лучше применять первый вариант с принудительным обдувом, т.к. в этом случае мы экономим время и получаем больше восковых моделей.

Заливки воска в силиконовую форму проходила при различных температурах плавления (95°C, 100°C, 105°C, 110°C). Далее с применением КИМ проводили измерение аэродинамических

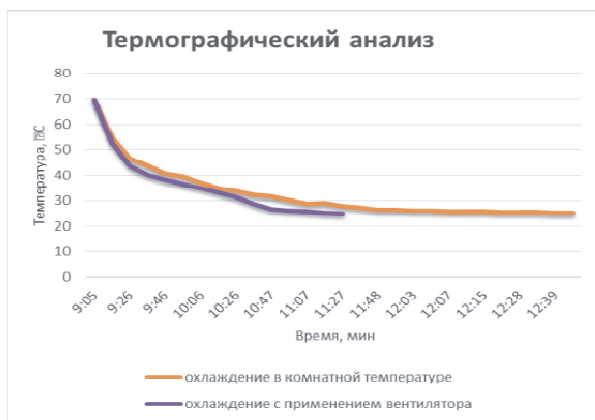


Рис. 2. Термографический анализ охлаждения силиконовой формы

профилей полученных восковок по схеме представленной выше. Модель контролировалась по двум основным критериям – форма и расположение поверхности относительно замковой части лопатки турбины.

Рис. 3 и рис. 4 показывают выбранные для контроля сечения лопаток и величину усадки профилей восковой модели относительно профилей мастер модели лопатки.

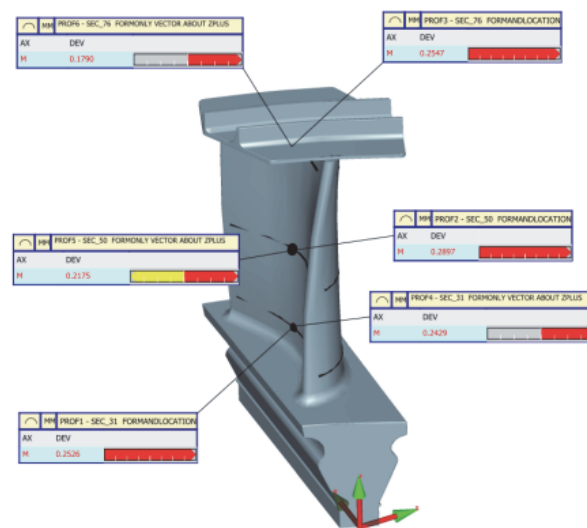


Рис. 3. Выбранные контрольные сечения и максимальные отклонения



**Таблица 1.** Стоимость и время подготовки литья лопаток по выплавляемым моделям различными методами

	Силиконовая форма	Обычный метод
Моделирование	7 дней	7 дней
Подготовка модели	2 дня	2 дня
Изготовления формы	1 день	4 недели
Количество мест	1	1
Общее время	10 дней	30 дней
Общая стоимость	24 000 руб.	61 000 руб.

Для анализа стоимости и сравнения времени подготовки при производстве лопаток методами быстрого прототипирования (силиконовые формы) и традиционного метода изготовления металлической литейной формы на обрабатывающем центре с ЧПУ была проведена экономическая оценка, результаты приведены в табл. 1.

### 3. ВЫВОДЫ

Экспериментальный анализ двух различных технологий быстрого прототипирования показал, что данные способы обеспечивают экономически эффективное решение при производстве малых партий лопаток газотурбинных двигателей. У силиконовой формы есть ряд преимуществ перед традиционным методом, заключающиеся главным образом в меньшем времени подготовки

и более низкой стоимостью, однако требует больше ручной работы. Практические эксперименты показали, что силиконовые формы подходят для изготовления лопаток, т.к. обеспечивают заданные точностные характеристики. Однако, для массового производства, традиционный метод литья по выплавляемым моделям обеспечивает большую прочность конечной детали и более длительный срок службы, поэтому остается наиболее предпочтительным методом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балякин А.В., Смелов В.Г., Чемпинский Л.А.* Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 3-2 (34). С. 47-52.

## RESEARCH OF RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY APPLICATION FOR GAS TURBINE ENGINE'S TURBINE BLADES MANUFACTURING

© 2016 A.V. Balyakin., E.M. Dobryshkina, R.A. Vdovin, V.P. Alekseev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

As traditional process of turbine blade manufacturing by investment casting is technologically complicated, it is expensive and time-consuming, what is connected with sealing of wax models, which allow us produce complicated profiles with high geometrical accuracy. Investment casting acceleration should raise the performance of the turbine blades manufacturing, however, it is prohibitive to let geometrical accuracy of the product fall. The aim of the article is to compare processes of turbine blades manufacturing at different temperature characteristic using rapid prototyping (wax sealing into silicone cast). Dimensional analysis of cast blades revealed that sealing into silicone casts allows having the required geometrical accuracy. Therefore, silicone casts may be a good cost-effective decision for job lot and pilot production of turbine blades of a gas-turbine engine. The article describes the procedure of an integrated application of additive technology and thermographic analysis for investment casting acceleration by determination of the most suitable temperatures and setting time, which will let economic features improve keeping the accuracy of production.

*Keywords:* rapid prototyping, wax models, casting, manufacturing process management, turbine.

*Andrey Balyakin, Assistant Lecturer at the Engine Production Technology Department. E-mail: balaykinav@ssau.ru*

*Elena Dobryshkina, Master's Degree Student at the Engine Production Technology Department.*

*E-mail: dobryshkina93@mail.ru*

*Roman Vdovin, Post-Graduate Student at the Engine Production Technology Department.*

*E-mail: vdovin.ssau@gmail.com*

*Vyacheslav Alekseev, Post-Graduate Student at the Engine Production Technology Department.*

*E-mail: alexeev\_v.p@mail.ru*