

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБОПРИВОДОВ

© 2011 Л. С. Шаблий

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

Выполнено исследование возможности применения прототипов, полученных по технологии лазерной стереолитографии, в качестве деталей натурных малоразмерных турбоприводов. Проведено расчётное исследование с применением метода конечных элементов и экспериментальное – на специальном стенде. В результате установлена возможность применения таких прототипов в турбоприводах с ограничением частоты вращения ротора до уровня, при котором эквивалентные напряжения в деталях не превышают 40 МПа.

Турбопривод, колесо рабочее, прототип, стереолитография лазерная, метод конечных элементов, стенд экспериментальный, напряжение эквивалентное.

Технологии быстрого прототипирования (RP-технологии) существенно ускоряют время создания опытных образцов техники, поскольку позволяют пройти путь от чертежа до готового образца за несколько часов. Примером таких технологий является лазерная стереолитография [1]. Суть лазерной стереолитографии состоит в послойном отверждении жидкой олигомерной композиции лазерным лучом УФ-спектра. Отверждаемый слой скрепляется с предыдущим, и набор многочисленных слоёв формирует тело прототипа. Полученные образцы изотропны и по физическим свойствам сходны с изделиями, отлитыми из эпоксидной смолы [2]. Они применяются для визуализации (макетирования) и последующего изготовления литейных форм (как мастер-модель). Однако свойства материала (высокая прочность, низкая плотность) позволяют предположить, что детали, созданные по данной технологии, могут быть применены и в натурных изделиях.

Малоразмерные турбоприводы (МТ) широко применяются в авиационной, космической, автомобильной промышленности, а также медицинской технике [3]. Их стоимость велика в том числе по причине технологических трудностей. Поэтому актуальна задача исследования

применимости дешёвых стереолитографических прототипов в качестве деталей МТ.

На сегодняшний день известны МТ, имеющие неметаллические детали из карболита и стеклотекстолита. Описание же использования стереолитографических деталей отсутствует. Их применение позволило бы быстро изменять конструкцию турбопривода при газодинамических исследованиях, уменьшать массу и стоимость изготовления, что могло бы снизить общую стоимость и время создания МТ.

В качестве объекта исследования было выбрано закрытое рабочее колесо (РК) лабораторного центростремительного малоразмерного турбопривода (ЦСМТП). ЦСМТП с закрытым РК обеспечивают КПД на 4 – 8% больший, чем ЦСМТП с полукрытым РК, а с точки зрения прочности это самый нагруженный элемент конструкции. Поэтому РК закрытого типа подходит для исследований возможности изготовления ЦСМТП по технологии лазерной стереолитографии. Запланированное исследование проводилось двумя способами: расчётным по методу конечных элементов (FEM) и экспериментальным на специально созданном стенде.

Для проведения расчётных FEM-исследований использовался комплекс Ansys Workbench 11-й версии. CAD-модель РК была создана в программе Gambit и затем импортирована в Design Modeler через универсальный формат Parasolid. Во вкладке Simulation на её основе была создана конечно-элементная модель РК (рис. 1).

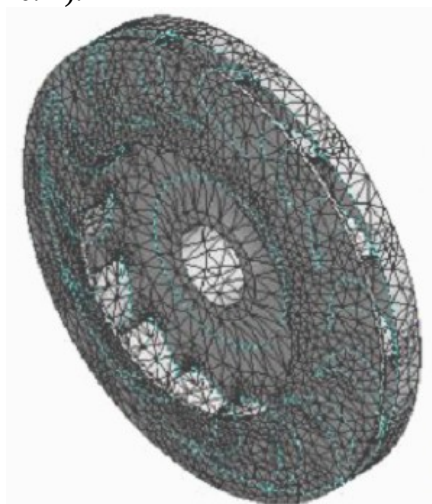


Рис. 1. Конечно-элементная модель РК ЦСМТП

Модель имела закрепление на двух торцевых поверхностях ступицы, поскольку в условиях эксплуатации она фиксируется по ним гайкой. На цилиндрическую поверхность центрального отверстия граничных условий не накладывалось, поскольку обычно РК монтируется на вал по скользящей посадке.

На лопатки РК действовали силы от набегающего газового потока, выходящего из соплового аппарата. На модели эти силы были заданы в разделе нагрузок (Loads) в виде равномерно распределённого на корытце лопаток давления (Pressure) при отсутствии давления на спинке. Величина давления была рассчитана, исходя из следующих соображений. Крутящий момент, развиваемый на колесе исследуемого лабораторного ЦСМТП, $M_{кр} = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, число лопаток $n = 14$, диаметр на входе в РК $D_{вх} = 50 \text{ мм}$, диаметр на выходе из РК $D_{вых} = 30 \text{ мм}$. Радиус середины лопатки r_l (плечо газовой силы) равен

$$r_l = \frac{D_{вх}}{2} - \frac{D_{вх} - D_{вых}}{4} = \frac{50}{2} - \frac{50 - 30}{4} = 20 \text{ мм}.$$

Газовая сила на одну лопатку F_l равна

$$F_l = \frac{M_{кр}}{r_l \cdot n} = \frac{0,5}{0,02 \cdot 14} = 1,786 \text{ Н}.$$

При площади корытца лопатки $A_{кор} = 38,9 \text{ мм}^2$ расчётное усилие соответствует избыточному давлению на корытце p , равному

$$p = \frac{F_l}{A_{кор}} = \frac{1,786}{38,9 \cdot 10^{-6}} = 45,9 \text{ кПа}.$$

Инерционная нагрузка была задана с помощью объекта Rotational Velocity вкладки Inertial. В качестве оси (Axis) была задана ось цилиндрической поверхности центрального отверстия РК в режиме Direction. Частота вращения задавалась 50000 мин^{-1} как предельная на лабораторном стенде.

Поскольку в библиотеке материалов Ansys отсутствовал исследуемый акриловый фотополимер, его свойства были заданы вручную, модификацией свойств полиэтилена. Материал «полиэтилен» (Polyethylene) был импортирован в проект (Engineering Data → Import Material), переименован (Rename) в Epoxy, и его свойства были отредактированы (таб. 1).

Таблица 1. Свойства исследуемого материала

Параметр	Значение
Модуль Юнга (Young's Modulus)	1070 МПа
Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,4
Плотность (Density)	1,1 г/см ³
Предел прочности на растяжение (Tensile Ultimate Strength)	87 МПа

Для того, чтобы оценить, какую часть нагрузки создают газовые и инерционные силы, сначала был произведен расчёт с нагружением только газовыми силами, а затем – только инерционными. И, наконец, был произведен третий расчёт при нагружении обеими силами. При проведении расчётов с одной нагрузкой, вторая не удалялась из модели, а только «отключалась» с использованием опции Suppressed. Полученные в результате расчёта эквивалентные напряжения по-Мизесу (Equivalent (von-Mises) Stress) от газовых

сил оказались меньше инерционных более чем на порядок (43,6 МПа против 1,7 МПа). Поэтому сделанные упрощения по их условному приложению обоснованы. В результате расчёта было установлено, что самое нагруженное сечение – вту-

лочное сечение лопатки – имеет запас прочности 1,95. Следовательно, РК с большой вероятностью выдержит усилия, возникающие при работе ЦСМТП. Для проверки этой гипотезы был проведён эксперимент.

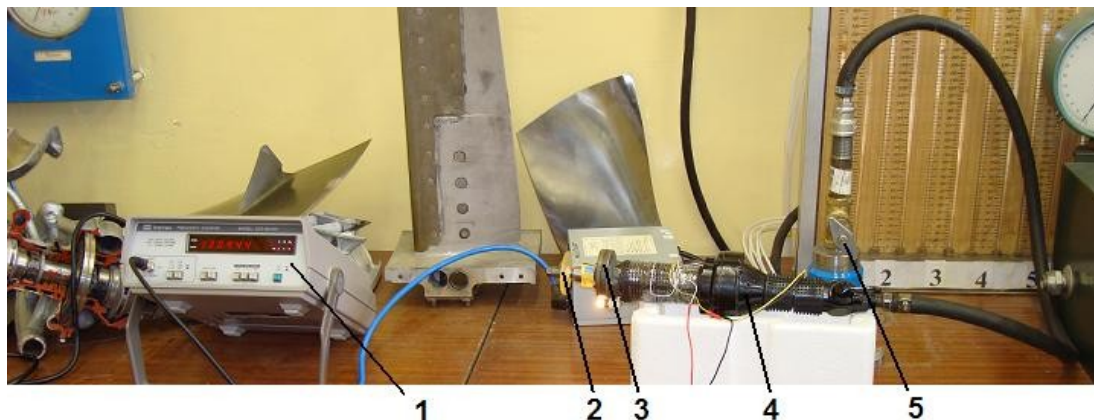


Рис. 2. Экспериментальный стенд: 1-частотомер, 2-испытываемый образец, 3-датчик частоты вращения, 4-пневмошлифовальная машина, 5-регулирующий кран

Поскольку согласно расчёту газовая нагрузка формирует только 4% от общего максимального напряжения, экспериментальное исследование было сосредоточено на инерциальной нагрузке.

Для её создания был разработан инерционный разрывной стенд (рис. 2). Его основой является промышленная пневмошлифовальная машинка 4 с отключённым регулятором частоты вращения. Частота вращения ротора регулируется вручную подачей воздуха краном 5 и регистрируется частотомером 1, подключённым к оптическому датчику частоты вращения 3 через усилитель.

Поскольку экспериментальный образец 2 при испытаниях может разрушиться, а разрыв маховиков происходит чаще всего на три части [4], то каждая часть массой приблизительно 3 грамма будет обладать скоростью порядка 130 м/с (скорость колеса на окружности), а его энергия в 25 Дж будет эквивалентна энергии тела массой 1 кг, упавшего с высоты 2,5 метра:

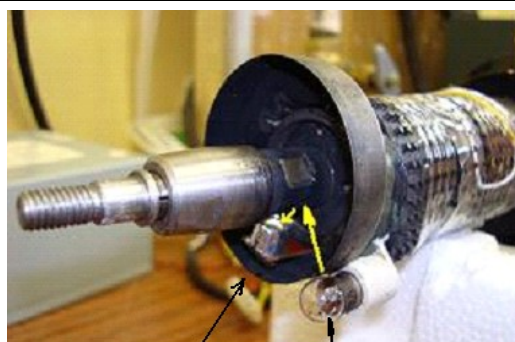
$$V = \frac{2p \cdot n \cdot r}{60} = \frac{2p \cdot 50000 \cdot 0,025}{60} = 130 \text{ м/с};$$

$$E = \frac{mV^2}{2} = \frac{0,003 \cdot 130^2}{2} = 25 \text{ Дж};$$

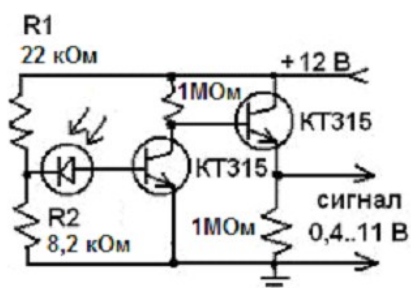
$$h = \frac{E}{m_0 g} = \frac{25}{1 \cdot 9,81} = 2,5 \text{ м}.$$

Поэтому во избежание травм и разрушения стенда последний был снабжён защитным кожухом.

Оптический датчик частоты вращения (рис. 3, а) работает следующим образом. Лампа 2 посылает внутрь корпуса через специальную щель узкий пучок света, попадающий на вал машинки. В этом месте вал имеет две плоские технологические лыски. Луч, отражаясь от полированной лыски, попадает на фотодиодный элемент 1. Чтобы снизить фоновую засветку и чётче выделить полезный сигнал, вся поверхность вала, кроме лысок, а также внутренняя поверхность корпуса датчика зачернены сажей, а фотодиод оклеен с боков светонепроницаемой фольгой. Это позволяет создать зону приёма сигнала, расположенную строго перпендикулярно световому лучу.



а



б

Рис. 3. Датчик частоты вращения:
а - внешний вид, б - схема усилителя

При освещении фотодиода на его контактах возникает гальваническое напряжение 200 мВ. Этого недостаточно для регистрации частотомером, нижний порог чувствительности которого составляет 10 В. Поэтому применён двухкаскадный усилитель напряжения (рис. 3, б). Фотодиод включен в фоторезисторном режиме в цепь коллектора транзистора первого каскада. Для регулировки порога чувствительности, который определяется разницей темного и светового токов фотодиода, применён делитель напряжения на резисторах R1–R2.

На стенде были испытаны два образца (рис. 4), полученные с помощью технологии лазерной стереолитографии различными способами: один, выраженный вверх спинкой, а второй – вверх крышкой. Дело в том, что рост SLA-деталей начинается с так называемых подпорок – технологических элементов, на которых затем формируется основная деталь. По окончании процесса подпорки отламываются от детали, а оставшиеся корешки подпорок сошли-

фовываются. При этом возможно появление концентраторов напряжений.

Сначала было проведено испытание на усталостное разрушение. Образцы были подвержены вращению при частоте 37 000 мин⁻¹ в течение 10 минут, что сопоставимо со временем работы лабораторного стенда. Образцы выдержали инерционные нагрузки и нагрузки, возникающие при вращении вибрации без появления визуальных признаков разрушения (трещин, сколов).



Рис. 4. Образцы РК ЦСМТП

Далее были проведены разрывные испытания. Для регистрации частоты вращения разрыва кроме вышеописанной схемы измерения применялась высокоскоростная камера Photron SA-3. Видеозапись на скорости 15000 кадров в секунду позволила зафиксировать момент, непосредственно предшествующий разрушению, и определить частоту вращения по соотношению

$$n = \frac{t_{\text{кадра}} N_{\text{кадров}}}{N_{\text{оборотов}}},$$

где

$N_{\text{кадров}}$ – число снятых кадров,

$t_{\text{кадра}}$ – длительность одного кадра,

$N_{\text{оборотов}}$ – количество оборотов вала за всё время съёмки. Погрешность определения частоты вращения оценивается как

$$dn = k \sqrt{d^2 t_{\text{кадра}} + d^2 N_{\text{кадров}} + d^2 N_{\text{оборотов}}}.$$

Число кадров – величина дискретная, определяется с абсолютной точностью. Погрешность определения времени одного кадра для высокоскоростной камеры с пределом частоты съёмки 120'000 кадров в секунду при работе на режиме 15'000 кадров в секунду незначительна. Поэтому погрешность определения частоты вращения вычисляется, в основном, путём учёта погрешности визуального наблюдения числа оборотов вала:

$$dn \approx dN = \frac{\Delta N}{N} \cdot 100\%.$$

На РК были нанесены четыре метки, позволяющие определить положение РК с точностью до 1/8 оборота, при этом абсолютная погрешность составляет 1/8 оборота. Для того, чтобы уменьшить относительную погрешность, необходимо увеличить количество оборотов. Чтобы погрешность была менее 1%, было решено производить замеры не менее 20-ти оборотов. При этом погрешность определения частоты вращения составила:

$$dn = \frac{1/8}{20} \cdot 100\% = 0,6\%.$$

Полученные частоты разрыва (54000 мин⁻¹ для РК, выращенного вверх крышкой, и 45000 мин⁻¹ – вверх спинкой) соответствуют максимальным расчётным напряжениям 48 и 40 МПа. Разрушающие напряжения оказались почти вдвое меньше, чем предел прочности. Причиной этого могут быть различные факторы, как-то: изменение механических свойств материала из-за его старения, отсутствие учёта в расчёте вибрационных нагрузок, наличие дефектов в образцах. Однако целью данного исследования было не прочностное исследование стереолитографического материала, а определение применимости лазерной стереолитографии к изготовлению деталей турбоприводов в эксплуатационных условиях. Данная цель была достигнута с положительным результатом: стереолитографические прототипы могут успешно применяться как детали ЦСМТП с ограничением частоты их вращения до уровня, при котором эквивалентные напряжения в деталях не превышают 40 МПа.

Таким образом, в ходе данной работы была расчётным и экспериментальным путем изучена возможность

применения прототипов, полученных с помощью технологии лазерной стереолитографии, в ЦСМТП.

Поскольку вращающееся РК является самым нагруженным элементом ЦСМТП и стереолитографическая деталь выдерживает длительную работу на пониженной частоте вращения, то изготовление неподвижных стереолитографических деталей ЦСМТП возможно без ограничений. Это открывает широкие возможности для экспериментальных исследований новых малоразмерных лопаточных машин ввиду высокой скорости и низкой стоимости изготовления. Кроме того, при производстве закрытых РК лазерная стереолитография оказывается менее затратной, чем традиционные методы даже в мелкосерийном производстве. Однако шероховатость таких деталей существенно выше, и для определения влияния повышенной шероховатости на КПД ЦСМТП необходимо провести отдельное исследование.

Библиографический список

1. Евсеев, А. В. Лазерная стереолитография // Сборник трудов ИПЛИТ РАН [Текст] / А. В. Евсеев, В. С. Камаев, Е. В. Коцюба, М. А. Марков, М. М. Новиков, В. Я. Панченко. - Шатура: Ингерконтакт- Наука, 2005. - С. 40 – 42.
2. Панченко, В. Я. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок [Текст] // монография под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
3. Наталевич, А.С. Воздушные микро-турбины [Текст] / А. С. Наталевич. – Куйбышевск. авиац. ин-т. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
4. Гулиа, Н. В. Удивительная механика: в поисках «энергетической капсулы» [Текст] / Н. В. Гулиа. – М.: Издательская группа "ЭНАС", 2006.–175 с.

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF LASER STEREOLITHOGRAPHY TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF TURBODRIVES

© 2011 L. S. Shabliy

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The possibility of using prototypes produced by laser stereolithography as parts of small-sized turbodrives is analysed. Both calculation analysis using the finite element method and an experimental one – on a special test-bed-have been carried out. As a result, the possibility of using such prototypes in turbodrives with the rotor speed limitation up to the level at which equivalent stresses in the parts do not exceed 40 MPa was established.

Turbodrives, impeller, prototype, laser stereolithography, finite element method, test-bed, equivalent stress.

Информация об авторах

Шаблий Леонид Сергеевич, аспирант, инженер кафедры теории двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы и их выходные устройства, численные методы расчёта, гидрогазодинамика, программирование. E-mail: afroaero@hotmail.ru.

Shabliy Leonid Sergeevitch, engineer of the aircraft engine theory department, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), shelbi-gt500@mail.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, turbo-machine nozzles, hydro-gas-dynamics, numerical calculations, programming.