

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ СЕРИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Ионов А. В., Катенин Д. А., Федосеев С. Ю., Попов В. А.
Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет),
г. Москва, Россия

Развитие технологий передачи энергии на основе эффекта сверхпроводимости проводников и их внедрения в авиационной, космической и оборонной отраслях промышленности требует создания систем криообеспечения. Базовым элементом этих систем является турбодетандерный агрегат, который обеспечивает создание и поддержание низких температур в элементах с высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП). Детандер входит в состав криорефрижератора, который обеспечивает охлаждение конструкции до 65 К. Особенностью работы турбодетандера являются низкие температуры рабочего тела при скоростях вращения роторной части до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту, с лопатками центробежных колес, толщины которых не превышают 2–3 мм.

На первом этапе выполнялось проектирование и газодинамический расчет проточных частей турбины и компрессора детандера. Компрессор и детандер расположены на одном валу. Газодинамические подшипники обеспечивают их вращение до 30 000 об/мин. Давление на входе в турбину двухступенчатым центробежным компрессором.

При разработке конструкции центробежных колес были проведены расчет и профилирование лопастных систем центробежных компрессоров и турбодетандера. В ходе этих работ создавались и оптимизировались твердотельные модели рабочих колес и статорной части турбомашин с последующим численным моделированием трехмерного нестационарного турбулентного течения в проточной части для подтверждения основных характеристик, прежде всего напорности центробежных компрессоров и теплоперепаду турбодетандера. Газодинамическое моделирование проводилось при помощи программного комплекса Flow Vision.

Трехмерная геометрия лопаточной системы детандера (сопловой аппарат и рабочее колесо) спрофилирована на основе исходных данных:

Рабочий газ	неон
Давление на входе	$P_n = 3,4 \text{ бар} = 0,34 \text{ МПа}$
Давление на выходе	$P_n = 1,15 \text{ бар} = 0,115 \text{ МПа}$
Температура газа на входе	$T_n = 78 \text{ К}$
Расход газа	$G = 0,39 \text{ кг/с}$
Частота вращения	30 000 об/мин

Расчеты показали, что в детандере, без учета теплоподвода, достигается снижение температуры на 29 К, что полностью обеспечивает технические потребности системы.

Результатом проектных работ стали трехмерные твердотельные модели центробежных колес компрессора и турбодетандера в системе Unigraphics.

Экспериментальные исследования работы турбодетандера на начальном этапе требуют изготовления 1–2 экземпляров центробежных колес из алюминиевого сплава марки АЛ9Пч.

Второй этап работы заключался в выборе технологии изготовления центробежных колес компрессора и турбодетандера. При создании технологии изготовления центробежных колес компрессора и турбодетандера использовались

возможности Ресурсного Центра МАИ в области авиастроения с последующим литьем металла по выплавляемым моделям в оболочковую форму.

Технологический процесс был разработан и реализован на участке «Сквозная технология» и кафедре 205 МАИ, исходя из возможностей имеющегося оборудования. Маршрутная технология включала в себя:

- получение стереолитографических моделей колес;
- изготовление силиконовых форм;
- производство восковых моделей колес (восковок);
- отливку металла по восковкам и термообработку;
- механообработку.

На каждом этапе выполнялся контроль полученной продукции и при необходимости вносились изменения как в конструкторскую, так и в технологическую документацию на изделие.

В технологическом процессе применялись следующие технологии и оборудование, имеющиеся в МАИ:

- метод стереолитографии (SLA) и установка ViperSi2;
- установка MCP-НЕК С5/01 для литья воска в условиях низкого вакуума;
- лазерный сканер физических объектов Model Maker D на этапе контроля геометрии;
- рентгеновский томограф для исследования внутренней структуры алюминиевых отливок;
- станки и оборудование для термо- и механо-обработки.

Для выбранной маршрутной технологии производства были получены несколько компьютерных моделей: конструкторские модели готовых деталей; модели с учетом литьевых припусков; мастер-модель SLA; облака точек и сравнение готовых деталей и промежуточных заготовок. Эти данные являются основой для разработки модели данных

«сквозного проекта» – от идеи, до продукции в системе управления инженерными данными (PDM\PLM).

В работе рассмотрены особенности производства и контроля качества деталей сложной геометрической формы. Опытным путем подобраны режимы работы оборудования и режимы для отдельных операций, например, оптимальные режимы литья воска в силиконовые формы. Выявлены характерные точки и методы межоперационного и метрологического контроля. Проанализированы виды брака для различных производственных этапов и предложены способы их устранения.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

- конструкция рабочих колес и статорной части турбодетандера подтверждена численным моделированием основных характеристик компрессора и турбодетандера с использованием модели трехмерного нестационарного турбулентного течения в проточной части;

- маршрутная технология производства деталей с использованием возможностей

РЦ МАИ;

- конструкция и технология производства литьевых силиконовых форм для изготовления центробежных колес компрессора и турбодетандера;

- режимы литья воска в силиконовые формы для изготовления разнотолщинных деталей на примере центробежных колес компрессора и турбодетандера со сложной

геометрией;

- способы и методики контроля изделий сложной геометрической формы;
- компьютерные модели и технологические процессы для системы электронного документооборота инженерных данных;
- алюминиевые центробежные колеса компрессора и турбодетандера,

подготовленные к проведению экспериментальных исследований турбодетандера.

Всего, за 7 месяцев работы над проектом было создано несколько десятков файлов инженерных данных - компьютерных моделей, результатов расчетов и измерений, вариантов технологий и т.п. Было выполнено три итерации по изменению конструкции первого колеса, его доработка на технологичность и улучшение прочностных свойств. Разработаны и изготовлены две силиконовые формы для литья воска, в которые отлито более 15 восков. Исследованы свойства алюминиевых сплавов при их обработке, проведено 5 плавов и выполнена механообработка полученных высокоточных заготовок.

В ходе работ проводилась технико-экономическая оценка получаемых промежуточных результатов. Выполнение проекта позволило существенно продвинуться в позиционировании услуг РЦ МАИ, в оценке технологических возможностей, сроков и стоимости выполнения заказов по производству опытных образцов изделий. А так же собрать практический материал для учебного процесса МАИ, в частности, для проведения технологических практик.

В результате выполнения проекта были изготовлены центробежные колеса компрессора и турбодетандера, которые в настоящее время успешно проходят испытания в составе криорефрижератора при следующих условиях: расход газа для компрессора составляет 0,39 кг/с при повышении статического давления 1,114, температура 78K. Скорость вращения – 30 000 об/мин. Ожидаемая наработка на отказ – не менее 30 000 часов.