

УДК 621.74.045; 62-253; 621.45.01

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

Ионов А.В. Катенин Д.А. Федосеев С.Ю. Попов В.А.

### **Аннотация.**

При проектировании и производстве деталей сложной геометрической формы, таких как центробежные колеса турбомашин, при малых сериях их выпуска сложно добиться невысокой стоимости изделий при высоких требованиях к качеству.

В данной работе изложены способы проектирования и производства центробежных колес, которые позволяют снизить расходы на их изготовление в условиях малого серийного производства.

### **Ключевые слова.**

турбомашины, центробежные колеса, Ресурсный Центр МАИ, нестационарное турбулентное течение, стереолитография, литье по выплавляемым моделям, электронный архив.

### **Введение.**

В конструкции современных турбомашин авиационной, космической и наземной техники широко используются центробежные колеса. В связи со сложной геометрической формой центробежных колес, изготовление высокоточных изделий в единичных экземплярах или при выпуске малой серии трудоемко и дорого. В данной работе предлагается:

- технология оценки на этапе проектирования эффективности центробежных колес;
- технология изготовления малой серии центробежных колес для турбодетандера криорефрижератора.

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. Особенности работы турбодетандера являются: низкие температуры рабочего тела; высокие скорости вращения роторной части – до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту; толщины лопаток, которые не должны превышать 2-3 мм.

Работа по проектированию и производству малых серий центробежных колес для турбодетандера состоит из нескольких основных частей:

1. численное моделирование проточной части детандера и компрессора;
2. проектирование технологического процесса изготовления колес компрессора и турбодетандера;
3. изготовление центробежных колес компрессора и турбодетандера;
4. разработка методик контроля центробежных колес;
5. обеспечение информационной поддержки технологической подготовки производства и производства центробежных колес компрессора и турбодетандера.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

- подтверждение основных характеристик компрессора и турбодетандера численным моделированием с использованием модели трехмерного нестационарного турбулентного течения в проточной части;
- разработана маршрутная технология производства деталей с использованием возможностей РЦ МАИ;
- спроектирована конструкция и разработана технология производства литевых силиконовых форм для изготовления центробежных колес компрессора и турбодетандера;
- предложены режимы литья воска в силиконовые формы для изготовления разнотолщинных деталей на примере центробежных колес компрессора и турбодетандера со сложной геометрией;
- предложены способы и методики контроля изделий сложной геометрической формы;
- разработаны компьютерные модели и технологические процессы для системы электронного документооборота инженерных данных;

- изготовлены алюминиевые центробежные колеса компрессора и турбодетандера, подготовленные к проведению экспериментальных исследований турбодетандера.

## **1. Численное моделирование проточной части детандера и компрессора.**

По заданным начальным условиям (таблица 1) произведен одномерный расчет, в ходе которого определены основные геометрические параметры детандера [1,2,3]. На основе этих данных сформирована твердотельная трехмерная геометрия агрегата, которая в дальнейшем использовалась при определении параметров трехмерного нестационарного течения в проточной части расширительной машины с целью определения, достигается ли заданное понижение температуры в агрегате.

Таблица 1.

Исходные данные одномерного расчета колеса детандера.

Рабочий газ	Неон
Давление на входе	0.34 МПа
Давление на выходе	0.115 МПа
Температура газа на входе	78К
Расход газа	0.39 кг/с
Частота вращения	25200 об/мин

Определение основных параметров потока в детандере производилось при помощи программного комплекса Flow Vision. Сформирована расчетная область, состоящая из трех подобластей (подвод, вращающееся колесо и отвод), соединенных между собой специальным интерфейсом «скользящая поверхность», который позволяет совмещать численные решения в роторе и статоре детандера.

В рабочей области была построена прямоугольная расчетная сетка (рисунки 1 и 2). После чего была произведена адаптация сетки до 1 уровня с целью получения более точной картины течения в подводе и отводе (что позволяет улучшить качество решения в областях близких к стенкам). С той же целью в роторе и на скользящих поверхностях установлен третий уровень адаптации. Общее число расчетных ячеек составило 228 253.

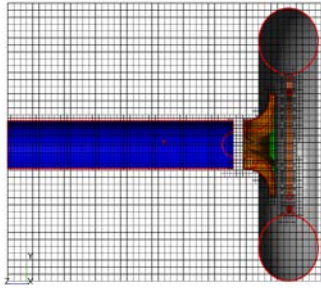


Рисунок 1. Расчетная сетка с адаптацией у стенок (меридиональное сечение).

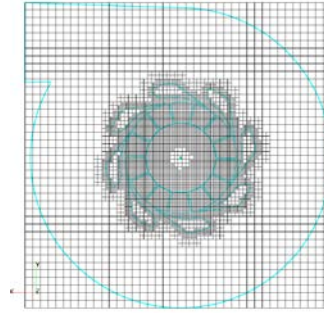


Рисунок 2. Расчетная сетка с адаптацией в районе лопаток (вид в плане).

Для обработки результатов расчета в расчетной области были созданы слои, которые позволяют отслеживать изменение давления, скорости, направление движения потока.

В результате расчета скоростей потока в колесе турбодетандера получены карты векторов абсолютной скорости в меридиональной плоскости (рисунки 3 и 4). Из рисунков видно, что практически полностью отсутствует вихреобразование в меридиональной плоскости.

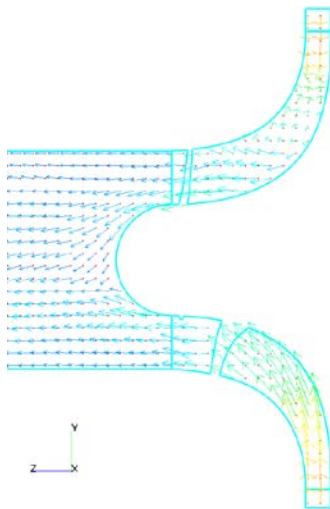


Рисунок 3. Векторы абсолютной скорости в меридиональной плоскости, м/с

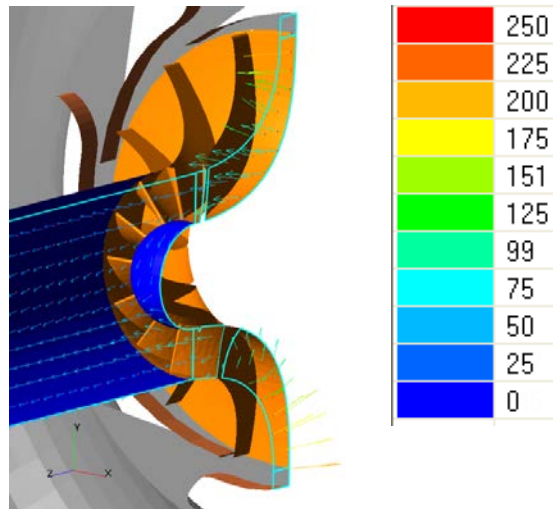


Рисунок 4. Распределение векторов абсолютной скорости в меридиональной плоскости (изометрия).

Для подтверждения характеристик детандерного колеса по давлению рассмотрим карту распределения статического давления – рисунок 5.

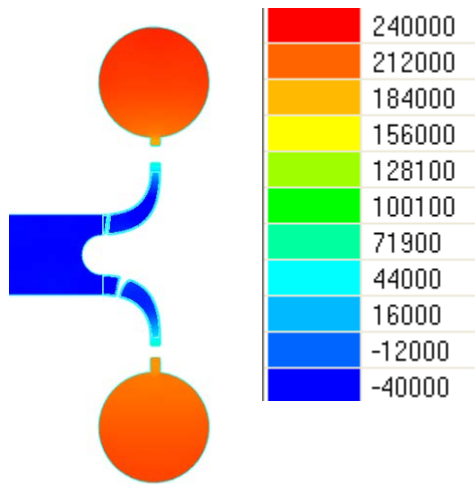


Рисунок 5. Распределение статического давления, Па.

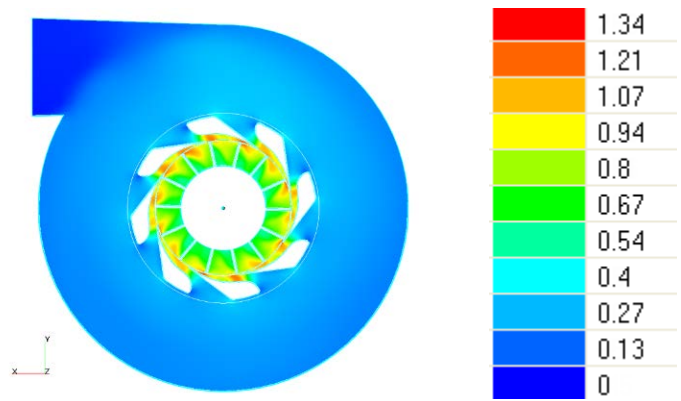


Рисунок 6. Распределение числа Маха на плоскости в плане.

Как видно из рисунка 5, в детандере происходит понижение давления с 240000 Па до -40000 Па (указано избыточное давление), при этом число Маха на входе в ротор равно 1.34 (рисунок 6), и падает к выходу, что соответствует принципам профилирования проточной части турбодетандера и его лопаточных систем, выбранным на этапе одномерного расчета.

В качестве результата расчета построен график понижения температуры на выходе относительно опорного значения 75К (рисунок 7).

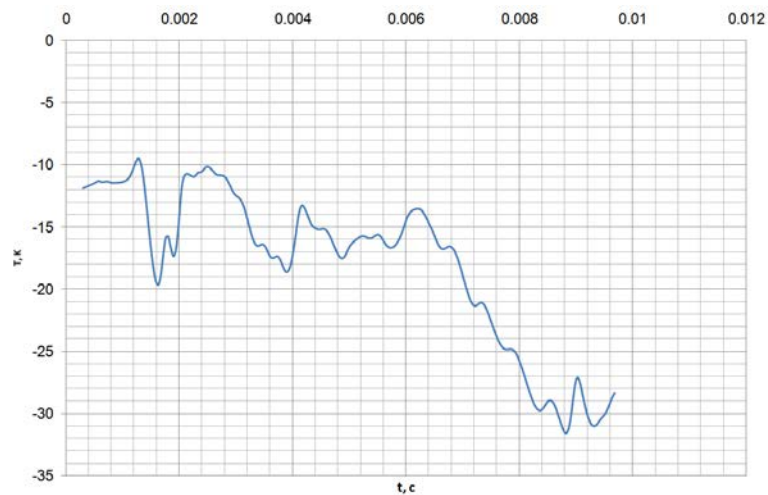


Рисунок 7. Понижение температуры на выходе относительно опорного значения 75К.

Таким образом, на основе расчета колеса детандера в системе FlowVision, подтверждены параметры, полученные в ходе одномерного расчета.

Результаты тепловых расчётов компрессора К1 сведены в таблицы 2,3.

Таблица 2.

Основные газодинамические параметры компрессора К1.

Расход, кг/с	0,400
Давление на входе, Па	105000
Температура на входе, К	290
Частота вращения, об/мин	24338,801
Давление на выходе, Па	116973,578
Температура на выходе, К	321,713
Повышение статического давления	1,114
Повышение полного давления	1,105
Повышение полного давления в РК	1,137
Мощность, Вт	7795,372

Таблица 3.

Основные геометрические параметры компрессора К1.

Диаметр входа на периферии, мм	0,0904
Диаметр втулки на входе, мм	0,0226
Выходной диаметр РК, мм	0,12
Ширина межлопаточного канала на выходе, мм	0,0154
Ширина канала на входе ЛД, мм	0,0154
Угол потока на входе ЛД, град.	38,25
Диаметр выхода из ЛД, мм	0,1755
Угол потока на выходе ЛД, град.	56,25
Число лопаток РК	12

Важной задачей является обеспечение напорности компрессора К1, так как данный агрегат работает в неоптимальных условиях по расходному параметру. В связи с этим, было произведено трехмерное моделирование потока в проточной части компрессора. На основе твердотельной геометрии сформирована расчетная область (рисунок 8). Связь ротора и статора осуществляется с помощью интерфейса «скользящая поверхность» (аналогично детандеру). Сетка прямоугольная с адаптацией 1 уровня в подводе и отводе, а также 3 уровня в роторе.

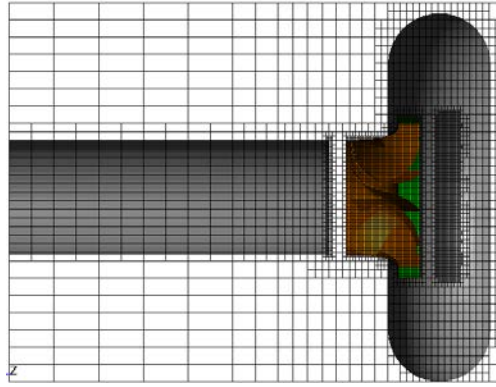


Рисунок 8. Сетка 3-го уровня адаптации (меридиональное сечение).  
Основные результаты расчета представлены на рисунках 9-12.

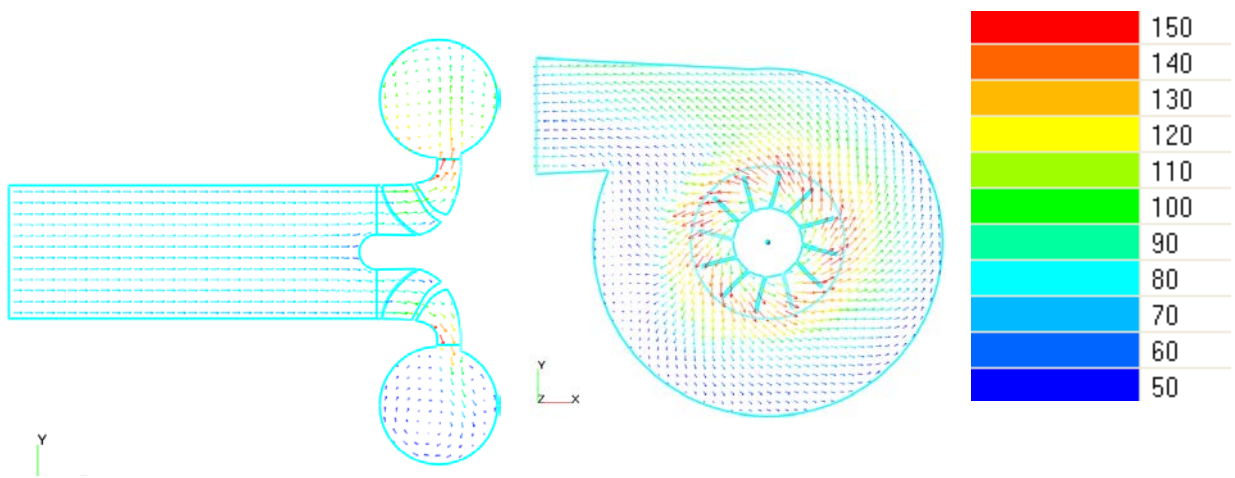


Рисунок 9. Векторы абсолютной скорости, м/с.

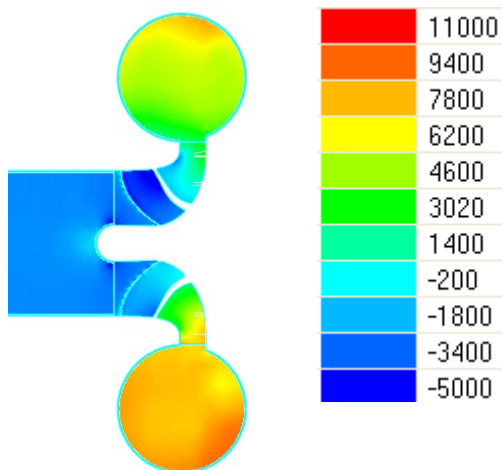


Рисунок 10. Давление, Па.

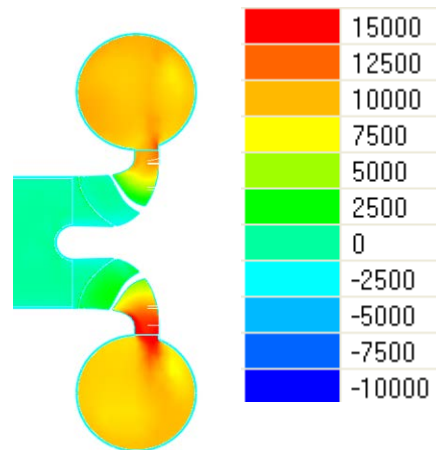


Рисунок 11. Полное давление, Па.

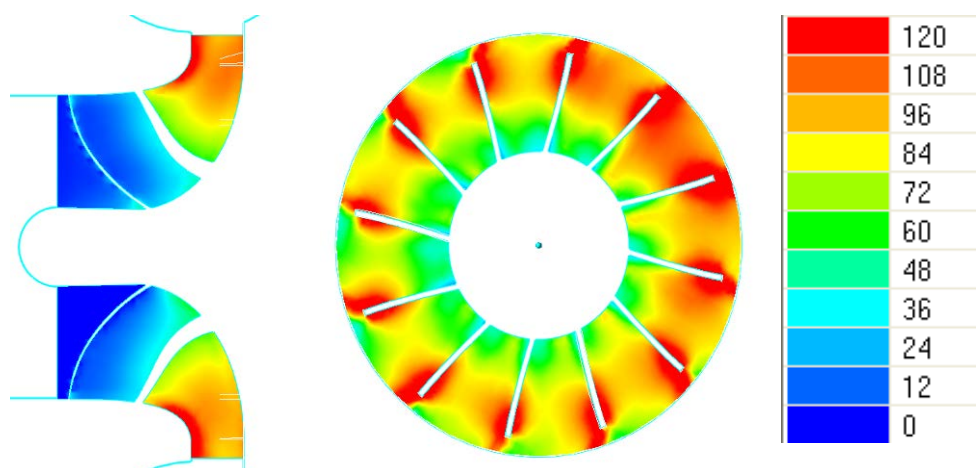


Рисунок 11. Окружная компонента абсолютной скорости, м/с

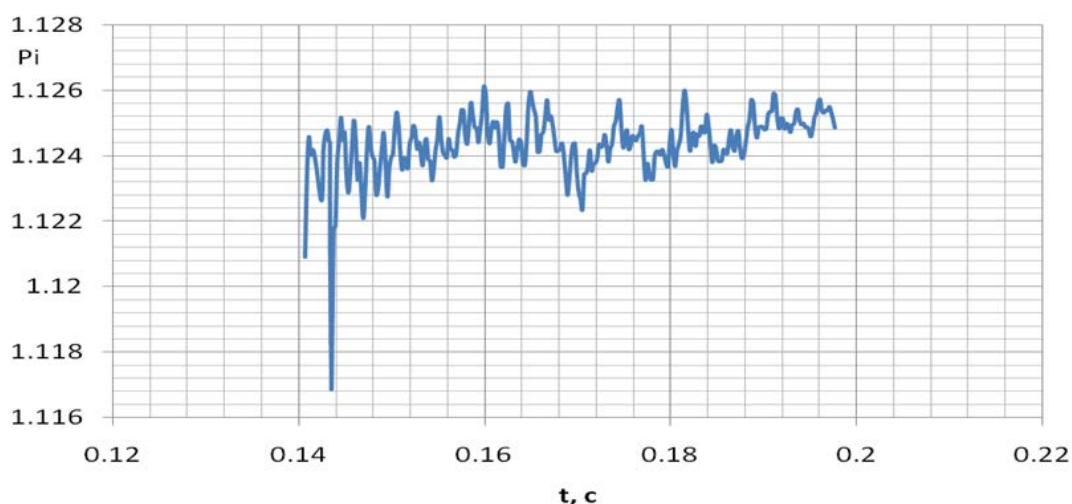


Рисунок 12. Степень повышения полного давления в рабочем колесе К1.

Спроектированное рабочее колесо обеспечивает существенно меньшие углы атаки на входе и степень повышения полного давления более 1.2.

В ходе расчетов исследовались разные варианты граничных условий и расчетной сетки, шаг по времени выбирается из условия Куранта.

В конечном итоге был выбран вариант расчетной модели с расширенными граничными условиями, неравномерной начальной сеткой и постоянным шагом по времени  $1e^{-6}$  с.

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.

## 2. Проектирование технологического процесса производства.

В ходе технологической проработки сложная геометрия лопаток колес компрессора и детандера (рисунок 13 и 14) и малая серийность их производства ограничили выбор способа изготовления деталей с использованием одной из двух технологий – фрезерования на многокоординатном обрабатывающем центре или литье. Конструктивные особенности центробежных колес в случае получения профилированной части фрезерованием требует оборудования не менее чем с 5 координатами перемещения и специального инструмента с большим вылетом (более 35 мм) и малым диаметром (менее 2 мм, сферической формы) фрезы даже при черновом фрезеровании. При этом режимы обработки потребовали бы частой смены инструмента в связи с его износом.

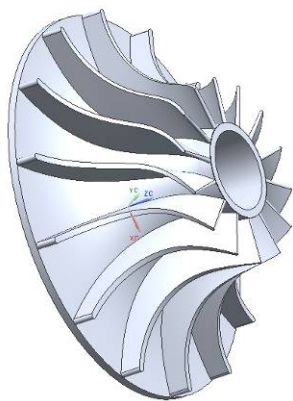


Рисунок 13. Колесо детандера

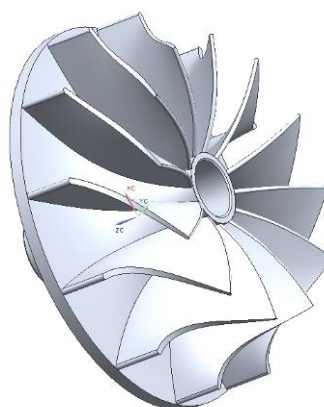


Рисунок 14. Колесо компрессора

Для изготовления детали был выбран метод литья деталей из алюминиевых сплавов по выплавляемым моделям. Обычно для деталей столь сложной геометрии как центробежные колеса применяется изготовление восковок (выплавляемая модель) литьем воска в песчаные формы (для крупногабаритных деталей, с низкими требованиями по точности) или в многоразовые разборные металлические формы (позволяет получать высокоточные восковки). Литье воска в песчаные формы не удовлетворяет требованиям по технологическим параметрам (точность, шероховатость), а литье в металлическую форму по экономическим соображениям (стоимость одной формы может достигать миллиона рублей, что рассчитано на очень крупные серии) и срокам (одна форма производится не менее полугода).

В ходе выполнения работ был разработан технологический процесс изготовления центробежных колес. Основой для него послужили типовые технологии процессов: стереолитографии и литья в силиконовые формы. В процессе выполнения работ эти технологии были дополнены и приведены в соответствие с задачей литья центробежных колес. Кратко технологический процесс изготовления центробежных колес можно представить в виде маршрутной технологии следующим образом:

1. Изготовление мастер-модели методом стереолитографии;
  - a. Промывка мастер-модели;
  - b. Доотверждение мастер-модели;
  - c. Слесарная обработка мастер-модели;
2. Контроль геометрии мастер-модели;
3. Изготовление силиконовой формы;
  - a. Сборка литьевой оснастки для литья силикона;
  - b. Заливка силикона в форму;
  - c. Разборка силиконовой формы и извлечение мастер-модели;
4. Контроль силиконовой формы;
5. Изготовление восковки;
  - a. Подготовка силиконовой формы;
  - b. Подготовка воска;
  - c. Литье воска;
  - d. Отверждение воска;
  - e. Разборка формы;
6. Контроль восковки;
7. Изготовление алюминиевой заготовки;
8. Контроль заготовки;
9. Термообработка;
10. Механообработка;
11. Окончательный контроль.

При разработке технологии изготовления колес использовалась трехмерная твердотельная модель, геометрия которой была базой для проектирования всех промежуточных технологических моделей и в задачах контроля геометрии.

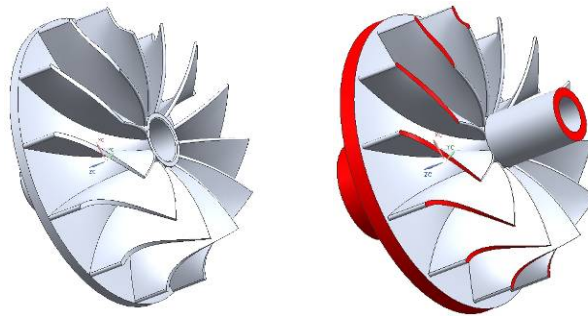


Рисунок 15. Слева конструкторская модель, справа – технологическая модель

К трехмерной модели технологической оснастки были разработаны требования исходя из специфики имеющегося оборудования и требований по точности изготовления деталей. К самой трехмерной модели были заданы следующие требования: допуск линейных размеров 0,001 мм, допуск угловых – 0,01°. Такие высокие требования обусловлены сложностью геометрии детали в проточной части и требованиями по точности к изготовлению детали. Также при проектировании технологической заготовки требовалось заложить припуски на изготовление детали (рисунок 15): припуск на усадку воска, припуск на усадку металла, припуски на механообработку (рисунок 15, поверхности выделенные цветом).

Кроме того проанализировав технологический процесс можно отметить, что для этапов межоперационного контроля необходимо иметь значения размеров восковки и отливки из металла. Это определило порядок построения модели. Первым этапом задаются припуски на механообработку детали, затем на усадку металла и только в конце припуск на усадку воска.

### **3. Особенности изготовления центробежных колес компрессора и турбодетандера.**

Первый этап маршрутной технологии – изготовление мастер-модели методом стереолитографии [4] на установке ViperSi2.

Технология стереолитографии – это аддитивная технология, основанная на выращивании детали из фотополимера, находящегося в ванне и отверждаемого по слоям под действием ультрафиолетового лазера. Слои формируются на основе геометрии 3D модели. Для создания управляющей программы для установки используются специализированные программные продукты – 3D Lightyear и Buildstation. В системе 3D Lightyear происходит создание поддержек, которые необходимы для того что бы закрепить деталь на подвижной платформе внутри установки, разбивка 3D модели на слои и генерация входного файла для

установки, в котором в векторном виде описаны траектории движения для пучка лазерного излучения. Программа Buildstation отвечает за управления исполнительными механизмами установки и управление пучком лазерного излучения по координатам и мощности. После построения детали ее необходимо промыть от остатков фотополимера в ацетоне или изопропиловом спирте [4], и провести окончательную полимеризацию модели в ультрафиолетовой камере.

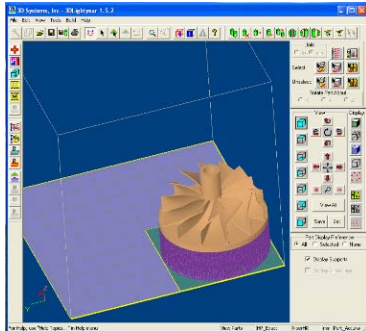


Рисунок 16. Колесо компрессора в программе 3D Lightyear.

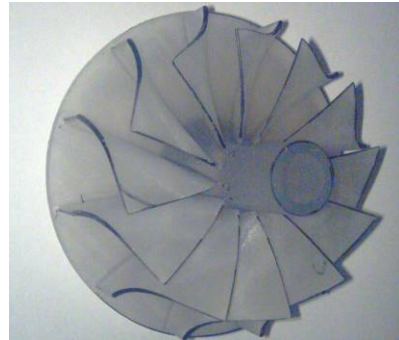


Рисунок 17. Стереолитографическая мастер-модель.

Для того, чтобы обеспечить меньшую шероховатость в проточной части колеса его можно обработать наждачной бумагой и убрать следы слоев построения методом стереолитографии. На колесе компрессора этой операции не проводилось.

После слесарной обработки мастер-модели проводится метрологический контроль отклонений геометрии формы (подробнее см. раздел 5). Результат контроля показывает, что отклонения формы после слесарной обработки оказываются в пределах допустимых значений.

На основе геометрии колес были спроектированы и изготовлены формы из силикона (рисунок 18).



Рисунок 18. Силиконовая форма для колеса детандера.

Для того, чтобы изготовить силиконовую форму, мастер-модель детали подвешивается за держатель, который формирует литниковую систему формы, в опалубке – ящике из дерева. В опалубку заливается силикон, который проходит следующие этапы подготовки:

- развешивание компонентов силикона в жидком виде (силиконовой основы и катализатора полимеризации силикона);
- смешивание компонентов;
- дегазация смеси в вакуумной установке МСР-НЕК С5/01 для извлечения из смеси газообразных примесей;
- заливка силикона в опалубку;
- дегазация залитой опалубки для исключения воздушных полостей в области мастер-модели.

Далее опалубка с залитым силиконом помещается в термошкаф, где силикон полимеризуется при температуре в 60°C в течении 6-7 часов.

Далее форма разрезается в соответствии со схемой разборки формы. Контроль силиконовой формы проводится визуально. Контролируется отсутствие на поверхностях каверн, вздутий, царапин, налипания посторонних примесей на стенки формы.

Для литья в форму воска форма прогревается в термошкафу. Заливка воска производится в вакуумной установке МСР-НЕК С5/01. В ходе выполнения работ появилась необходимость разработки режимов литья воска с параметрами технологического процесса отличными от рекомендованных. Рекомендуемая температура воска и формы при литье составляет 65-70°C. При таких значениях температур воск не успевает протечь во все узкие полости, которые образуют лопатки колеса, вследствие начала застывания воска и налипания его на стенки формы, что создает и пробки, препятствующие его протеканию в форму. Для исключения возникновения подобных эффектов были подобраны температуры формы и воска. Причем сильный перегрев воска при литье также приводит к нежелательным явлениям – разрушение восковки в местах примыкания лопаток к колесу из-за разной степени усадки тонкостенной лопатки и массивной центральной части. Качественные отливки удалось получить при следующих режимах литья: перегрев силиконовой формы до 80°C, разогрев воска до 90°C с перемешиванием, литье воска в форму при температуре чашки для воска в 80°C.

Типовой технологический процесс предполагает охлаждение формы до комнатной температуры (7-9 часов) и, после этого – выемка восковки из формы. При таких условиях в

процессе разборки формы лопатки отламываются от основной части колеса. Для предупреждения этого силиконовая форма после ее остывания до 30°C ставится в термошкаф на 40°C на 30-40 минут и только после этого разбирается. Такой способ позволил вследствие низкой теплопроводности воска разогреть поверхностный слой, при котором воск вместо того, чтобы прилипнуть к силиконовой форме, создает тонкий слой с небольшим смазывающим эффектом и приобретает большую эластичность. Это позволяет в процессе разборки формы лопаткам отгибаться, но не ломаться, сохранность геометрии лопатки обеспечивается за счет непрогретой центральной части лопатки (рисунок 19).

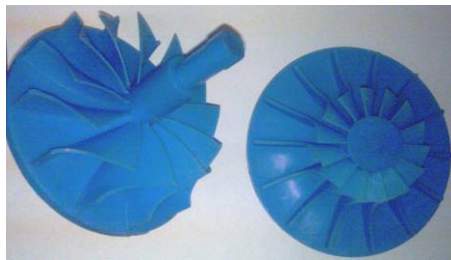


Рисунок 19. Восковые модели колес компрессора и детандера.



Рисунок 20. Алюминиевая заготовка.

На следующих этапах восковка отдается на отливку металла, термо- и механообработку. Окончательный вид колес детандера и компрессора показан на рисунках 21 и 22.



Рисунок 21. Колеса детандера и компрессора с валом.

#### **4. Методики контроля центробежных колес.**

К центробежным колёсам предъявляются высокие требования по точности изготовления, в частности требуется высокое качество обработки поверхностей детали. Колесо должно быть сбалансированным; должен быть выдержан заданный допуск биения.

Поэтому необходимо производить межоперационный контроль изделия на всех этапах производства.

Существуют различные способы контроля геометрических параметров центробежных колёс, все они делятся на две основные группы:

- 1) Контактные методы контроля. Для этого используют координатно-измерительные машины (КИМ). Также могут применяться специальные шаблоны и калибры. Контактные методы имеют некоторые достоинства: возможность измерения глубоких пазов и карманов, отсутствие чувствительности к цвету поверхности и прозрачности, высокая точность (до нескольких микрон). Но, в то же время, сбор данных происходит достаточно медленно, а контактный щуп может деформировать мягкие поверхности.
- 2) Бесконтактные методы. Устройства, которые применяются для бесконтактного контроля, основаны на использовании лазерных и оптических 3D-сканеров. С их помощью можно в короткие сроки получить полную цифровую модель изделия с достаточной точностью (на уровне 0,025-0,04 мм). Полученная модель позволяет проводить анализ геометрических параметров, в частности сравнивать реальное изделие с исходной CAD-моделью. Технология имеет некоторые ограничения. Так как для сканирования используется свет, есть сложности со сбором данных с блестящих и прозрачных поверхностей, а так же внутренних полостей.

В данной работе использовался бесконтактный метод контроля, а именно мобильная измерительная сканирующая система Model Maker D100. Выбор обусловлен следующими преимуществами:

- 1) Мобильность сканирующей системы.
- 2) Отсутствие контактного воздействия на изделие, в том числе нет необходимости его жёсткой фиксации для проведения измерений. Что особенно важно для моделей из пластика и воска.
- 3) Быстрота и полнота сбора данных. За 15-20 минут можно получить облако точек центробежного колеса (1,5-2 млн. точек), которое позволяет провести всесторонний анализ геометрии в 2D и 3D-постановке, в частности сравнить её с конструкторской CAD-моделью.

Для контроля геометрии центробежных колёс были разработаны и использованы несколько методик:

1. Методика выполнения сканирования. Получение облака точек. Произведена юстировка сканера, установлены оптимальные настройки: шаг точек 0,1 мм, фильтрация по углу сканирования (не более 60° к нормали поверхности), мощность лазера (70% от максимальной). Колесо размещено таким образом, чтобы была возможность отсканировать его целиком за один установ. Выбран формат SAB2 для обмена данными между программным обеспечением: KUBE (сканирование) и Geomagic Qualify (обработка и анализ).
2. Методика обработки облаков точек. Так как сканирование производится вручную лазерной полосой, существует необходимость объединений точек от разных проходов полосы с устранением совпадающих точек (пересечений). Это позволяет получить единое облако точек, оптимизировать количество данных, что, в свою очередь, позволяет уменьшить нагрузку на аппаратное обеспечение и ускорить процесс обработки. Вместе с этим производится устранение ошибочно оцифрованных точек (шумов), а также точек от предметов, случайно попавших в зону сканирования.
3. Методика проведения сравнения облаков точек с CAD-моделью в 2D и 3D-постановке. Для проведения сравнения исследуемые модели должны располагаться в одной системе координат и максимально точно совпадать друг с другом. Так как при сканировании система координат произвольная и располагается в основании манипулятора, облако точек необходимо совместить с CAD-моделью. Это осуществляется с помощью специальной опции Geomagic Qualify [5], которая производит совмещение по наилучшему совпадению геометрии. В процессе исследования было выяснено, что для корректного совмещения необходимо иметь полное облако точек колеса, совмещение отдельных секторов с CAD-моделью производится недостаточно корректно. Результатом сравнения является трёхмерная карта отклонений, а также при необходимости сравнения в различных сечениях.

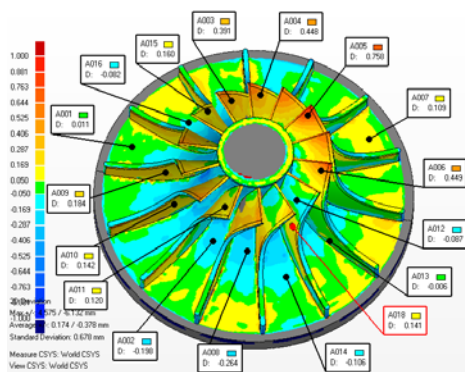


Рисунок 22. Карта отклонений формы стереолитографической модели колеса детандера.

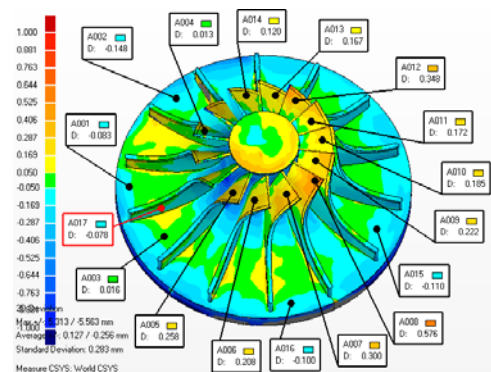


Рисунок 23. Карта отклонений формы восковой модели колеса детандера.



Контроль внутренней структуры для первых отливок производился в центре высокоэнергетической компьютерной томографии аэрокосмических систем в МАИ. Центр оснащен высокоэнергетическим томографом ВТ-600ХА-МАИ [6] с проникающей способностью до 150 мм стали, форматом томограмм до 2048x2048 и возможностью исследования детальной структуры локальных зон контролируемых изделий массой более 300 кг. Метод позволяет без разрушения количественно исследовать сложную внутреннюю структуру ответственных изделий современного аэрокосмического машиностроения и радиоэлектроники. Результат исследования представляется в виде двумерных сечений, графиков и 3D изображений внутренней структуры с обнаружением и точным измерением размеров и пространственного положения дефектов в виде разноплотностей, пор, трещин, включений и т.п. (пример томограммы колеса компрессора представлен на рисунке 24).

После получения отливок, удовлетворяющих требованиям к их внутренней структуре, томография следующих экземпляров не производилась.

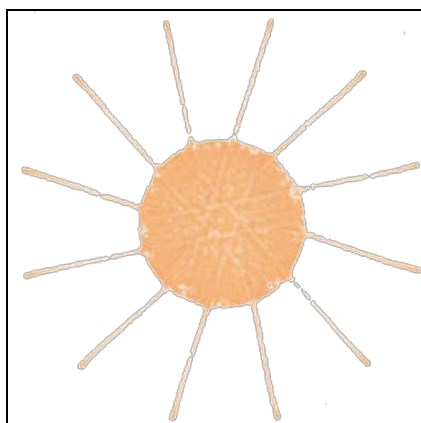


Рисунок 24. Пример томограммы колеса компрессора.

При контроле внутренней структуры центробежных колёс были выявлены следующие основные виды брака: внутренние полости, высокая пористость в зоне крепления лопаток к основной части.

## **5. Информационная поддержка технологической подготовки производства и производства центробежных колес компрессора и турбодетандера.**

В ходе выполнения проекта использовалось большое количество компьютерных программ. Почти для каждого этапа работ существует информация, которая создается и хранится в электронном виде. Для хранения и систематизации электронных данных в ходе проекта разработана структура электронного архива технологической документации РЦ МАИ.

Состав архива технологических электронных документов разработанных в ходе выполнения проекта:

1. Маршрутная технология изготовления колес, в формате \*.doc;
2. Технологические модели;
  - a. Колесо детандера
    - i. модель в системе Unigraphics NX7.5;
    - ii. модель в формате \*.stl (триангуляция твердотельной модели), обработанная в программе Magics 12.01;
  - b. Колесо компрессора
    - i. модели в системе Unigraphics NX7.5. Имеет 3 утвержденных модификации;
    - ii. модель в формате \*.stl (триангуляция твердотельной модели), обработанная в программе Magics 12.01;
3. Данные необходимые для технологии стереолитографии;
  - a. Платформа с размещенными на ней моделями в 3D Lightyear, формат \*.pla;
  - b. Модели поддержек сгенерированные в 3D Lightyear, формат \*.stl;
  - c. Входной файл для установки ViperSi2, формат \*.bff;
4. Данные контроля геометрической формы колес;
  - a. Результаты сканирования колес, в виде облака точек в формате \*.sab2;
  - b. Результаты сравнения облаков точек с 3D моделью – формат \*.wtp (система Geomagic);
  - c. Отчет о результатах контроля, формат \*.pdf;
5. Модели силиконовых форм с линиями разреза, в программе Unigraphics NX7.5 (2 модели).
6. Отчет о литье. Содержит информацию о режимах заливки воска и описание получившейся восковки, необходим для анализа причин возникновения брака, формат \*.doc;
7. Результаты томографии алюминиевых отливок, формат \*.jpeg;
8. Фотографии реальных объектов – форм, восковок и т.д., формат \*.jpeg;

Таким образом, архив электронных документов содержит большое количество разнотипной информации, представленной в различных форматах и обрабатываемой в различных программах. Для управления технологической подготовкой производства и производством изделий выпускаемых малыми сериями, авторами предлагается использовать системы PDM\PLM, далее АСУ ТПП.

Основой АСУ ТПП должна быть модель данных системы PDM\PLM. Для создания модели данных необходимо провести классификацию всей электронной информации, которая используется в ТПП и производстве.

На основе выполнения работы по изготовлению центробежных колес турбомашин можно сформулировать несколько основных требований к модели данных АСУ ТПП:

- в разработке модели данных должны быть учтены требования группы стандартов «Единой системы технологической документации»;
- созданная модель данных должна позволять заимствовать часть информации, которая создается на этапе проектирования с сохранением ассоциативной связи;
- модель данных должна позволять отслеживать изменения в конструкторской документации;
- модель данных должна позволять использовать справочники оборудования, инструментов, типовых технологических процессов и т.д.

### **Выводы.**

В процессе выполнения научно-исследовательской работы по результатам термогазодинамического расчета и численного моделирования с использованием модели трехмерного нестационарного турбулентного течения в проточной части была спроектирована конструкция центробежных колес компрессора и турбодетандера, отвечающие требованиям технического задания: расход газа для компрессора составляет 0,39 кг/с при повышении статического давления 1,114, температура 78К; скорость вращения – 30 000 об/мин; ожидаемая наработка на отказ – не менее 30 000 часов.

В дальнейшем были изготовлены опытные образцы центробежных колес. Для их изготовления была разработана технология, включающая методы стереолитографии, литья в силиконовые формы, литья по выплавляемым моделям, лазерного сканирования и томографии.

Для обеспечения организации работ на всех стадиях выполнения проекта была разработана структура электронного архива технологической документации, позволяющего хранить и систематизировать данные, используемые при проектировании, разработке, изготовлении и контроле центробежных колес турбомашин из алюминиевых сплавов.

В настоящее время турбодетандерный узел успешно проходит испытания в составе криорефрижератора.

### **Библиографический список:**

1. Ю. А. Ржавин, О. Н. Емин, В. Н. Карасев «Лопаточные машины двигателей летательных аппаратов теория и расчет» м.: май-принт, 2008 г.
2. А. Б. Давыдов А. Ш. Кобулашвили А. Н. Шерстюк «Расчет и конструирование турбодетандеров» М.: Машиностроение 1987 г.
3. Б. В. Овсянников, Б. И. Боровский «Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей» М.: Машиностроение 1971 г.
4. SLA System Operations, 3D System, 2005 г.
5. Geomagic Qualify 12 Interactive User Guide, Geomagic, Inc., 2010г.
6. Центр компьютерной томографии аэрокосмических систем в МАИ. Журнал «Двигатель» 2011 г. № 1(73) с. 41.

### **Сведения об авторах.**

Ионов Алексей Владимирович, аспирант Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета),

тел.: (499)158-43-81; e-mail: woln@mail.ru

Катенин Дмитрий Алексеевич, студент Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета),

тел.: (499)158-43-81; e-mail: dkat@ru.ru

Федосеев Сергей Юрьевич, студент Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета),

тел.: (499)158-43-81; e-mail: it202mai@gmail.com

Попов Вячеслав Андреевич, студент Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета),

тел.: (499)158-43-81; e-mail: daemonbl4@googlemail.com