

УДК: 621.45.037:004.94

Разработка конструкции моноколеса вентилятора с полыми лопатками для ТРДД высокой степени двухконтурности

А. А. Коротыгин, С. В. Багров, К. Р. Пятунин

Аннотация

Одной из основных тенденций в современном гражданском авиадвигателестроении является увеличение степени двухконтурности. Это приводит к использованию лопаток больших размеров и массы. Одним из конкурентоспособных путей решения проблемы снижения массы широкохордных лопаток вентиляторов в авиадвигателестроении является создание облегченных полых титановых конструкций.

В данной работе исследованы существующие конструкции, выявлены их преимущества и недостатки и предложена оригинальная конструкция моноколеса вентилятора с полыми лопатками из титанового сплава, разработана маршрутная технология изготовления, проведено трёхмерное аэродинамическое проектирование лопатки вентилятора и оценены прочностные характеристики конструкции.

Ключевые слова

ТРДД; вентилятор; моноколесо; полая лопатка; механическая обработка; электрохимическая обработка; сварка трением; 3D аэродинамическое проектирование

Актуальность задачи

Анализ развития самолетов гражданской авиации показывает, что их размеры в ближайшем будущем будут непрерывно расти. Поэтому для них потребуются двигатели все большей тяги или в них будут использованы дополнительные двигатели. Полагают, что снижение стоимости изготовления и стоимости технического обслуживания самолетов достигается возрастанием размеров двигателей, повышением их тяги, а не использованием большего их числа. Увеличение числа двигателей на самолете в настоящее время считается нерациональным. Для повышения тяги и эффективности ТРДД (турбореактивных

двухконтурных двигателей) применяется высокая степень двухконтурности. Создание таких двигателей приводит к появлению и использованию в них лопаток больших размеров и, следовательно, большой массы. Большая масса лопаток приводит к снижению эффективности двигателя, которая достигается повышением степени двухконтурности.

Таким образом, как только двигатель достигает больших размеров, проблема снижения массы становится определяющей при его создании и в то же время является актуальной задачей двигателестроения. Задача облегчения лопаток вентиляторов ТРДД должна быть решена в совокупности с решением других проблем. В частности, при создании облегченных лопаток не могут быть снижены требования к их жесткости и прочности при рабочих и нерасчетных (удар посторонними предметами, помпаж) нагрузках, к их эксплуатационным характеристикам, к стоимости изготовления и эксплуатации.

Большинство эксплуатирующихся лопаток, являются сплошными титановыми конструкциями. Повышенная масса лопаток, высокая исходная стоимость материалов и изготовления ставят под сомнение целесообразность использования в двигателях нового поколения сплошных лопаток из титановых сплавов. Существующая тенденция подтверждает, что сплошные титановые лопатки должны иметь стандартные (ранее применяемые) размеры хорды и бандажные полки, присущие двигателям предыдущих поколений. Одним из конкурентоспособных путей решения проблемы массы широкохордных лопаток вентиляторов в авиадвигателестроении является создание облегченных полых титановых конструкций [1].

Достоинства и недостатки существующих конструкций

Существует несколько традиционных и оригинальных схем изготовления полых титановых лопаток. Рассмотрим некоторые известные конструкции, их достоинства и недостатки.

Самой распространённой и давно зарекомендовавшей себя схемой является полая лопатка с гофрированным листовым наполнителем. Лопатка представляет собой конструкцию из двух сваренных между собой половин (корыта и спинки), внутри которой находится гофрированный листовой наполнитель, соединенный сваркой давлением с обшивками со стороны корыта и спинки лопатки.

Единственным для изготовления таких конструкций является метод, основанный на совмещении диффузионной сварки и сверхпластической формовки. Эти технологические операции с ныне применяемыми промышленными сплавами титана проводятся при повышенных температурах, в связи с чем на поверхности сплавов образуется так

называемый альфированный хрупкий слой, удаление которого является отдельной трудоемкой и экологически вредной операцией. Существенное снижение температур сварки давлением и сверхпластической формовки может быть достигнуто только путем использования листовых полуфабрикатов с наноразмерной структурой [2], что значительно увеличивает стоимость конструкции.

При формовке сильно закрученных лопаток вентилятора остается проблема деформации наполнителя и разрушения сварочных швов, что может повлиять на жесткость и другие эксплуатационные характеристики.

Существуют также конструкции полых слоистых лопаток с сотовым наполнителем. Работы по созданию таких лопаток в 1980-ых годах велись крупнейшими отечественными и зарубежными авиадвигателестроительными компаниями, такими как СНТК (г. Самара), Rolls-Royce (Великобритания) [3] и др. Лопатка изготавливается из трех основных элементов – спинки, корыта и сотового наполнителя.

Спинка и корыто изготавливаются путем штамповки из титанового катаного листа переменной толщины по высоте лопатки.

Для обеспечения переменной толщины перед штамповкой заготовка подвергается химическому фрезерованию. Замковая часть лопатки типа «ласточкин хвост» также состоит из двух частей, которые формируются на утолщенном конце заготовки одновременно со штамповкой пера. Сотовый наполнитель, помещаемый между корытцем и спинкой, изготавливается из титановой фольги. Высота наполнителя переменная по сечению профиля и соответствует толщине лопатки. Изготовленная таким образом многослойная конструкция из штампованных пластин и сотового наполнителя соединяется в единую деталь с помощью диффузионной сварки.

Наряду со значительным снижением массы и относительной простотой изготовления, лопатка такой конструкции будет иметь относительно низкие прочностные свойства пера, т.к. титановая фольга не обладает достаточной жесткостью.

Существенно снизить массу по сравнению со сплошными конструкциями позволяет также применение лопатки, образованной двумя отдельными половинами, каждая из которых имеет каналы, получаемые посредством фрезерной обработки [4]. Каналы между собой образуют ребра жесткости и могут выполняться как радиальными, так и волнообразными, если необходимо увеличить жесткость в поперечном направлении.

Первоначально образующие профиля лопатки состоят из прямолинейных участков (т.е. являются ломанными кривыми), затем после соединения двух половин, чтобы придать профилю соответствующую форму применяют точную штамповку.

Такая конструкция обеспечивает достаточное снижение массы и жесткость лопатки, но для сильно закрученных лопаток вентилятора возникнут сложности со стыковкой ребер жесткости при сварке, что требует высокой точности и идентичности их выполнения на обеих половинах лопатки. Также возможны непредсказуемые деформации ребер жесткости при формовке, вплоть до разрушения сварочных швов.

Другой вариант полой лопатки представляет собой неразъемную конструкцию с внутренними радиальными полостями, образованными вытравляемыми стержнями [5].

Первоначально из цилиндрической заготовки штамповкой получают полуфабрикат, в котором сверлением выполняются продольные глухие отверстия и заполняются составом, формирующим стержень. Затем с помощью точной штамповки лопатке придают окончательную форму. Чтобы предотвратить большие деформации продольных полостей стержни удаляются из отверстий после формирования профиля.

Форма полостей может быть различной в зависимости от требуемых прочностных свойств, жесткости, массовых и других эксплуатационных характеристик.

Применение схемы с вытравляемыми стержнями позволяет существенно снизить массу лопатки за счет удаления части материала внутри лопатки. При этом конструкция достаточно проста в изготовлении.

Недостатками такой лопатки является высокая относительная толщина профиля, требуемая для размещения полостей, при этом для лопаток вентилятора с большой высотой пера и сильной закруткой профиля возникнут трудности с выполнением продольных отверстий в полуфабрикате. Также для таких лопаток возможно разрушение стержней при формовке профиля, вследствие чего могут возникнуть локальные деформации внутренних полостей.

Концептуальные особенности предлагаемой конструкции

Предлагается вместо традиционной конструкции рабочего колеса вентилятора (рис. 1, а) использовать схему, близкую к схеме Bling (Blade+Ring) (рис. 1, б). Модификация подразумевает сохранение размеров проточной части, крепления диска к валу вентилятора и крепления к диску барабана бустера и заднего конуса кока.

Моноколесо (рисунок 3) представляет собой отдельно изготовленные лопатку и диск (рисунок 2). Лопатка состоит из двух частей: основного пера 1 и крышки 2. Лопатка имеет хвостовик клиновидной формы, а диск 3 изготавливается с пазами, имеющими противоположные поверхности.

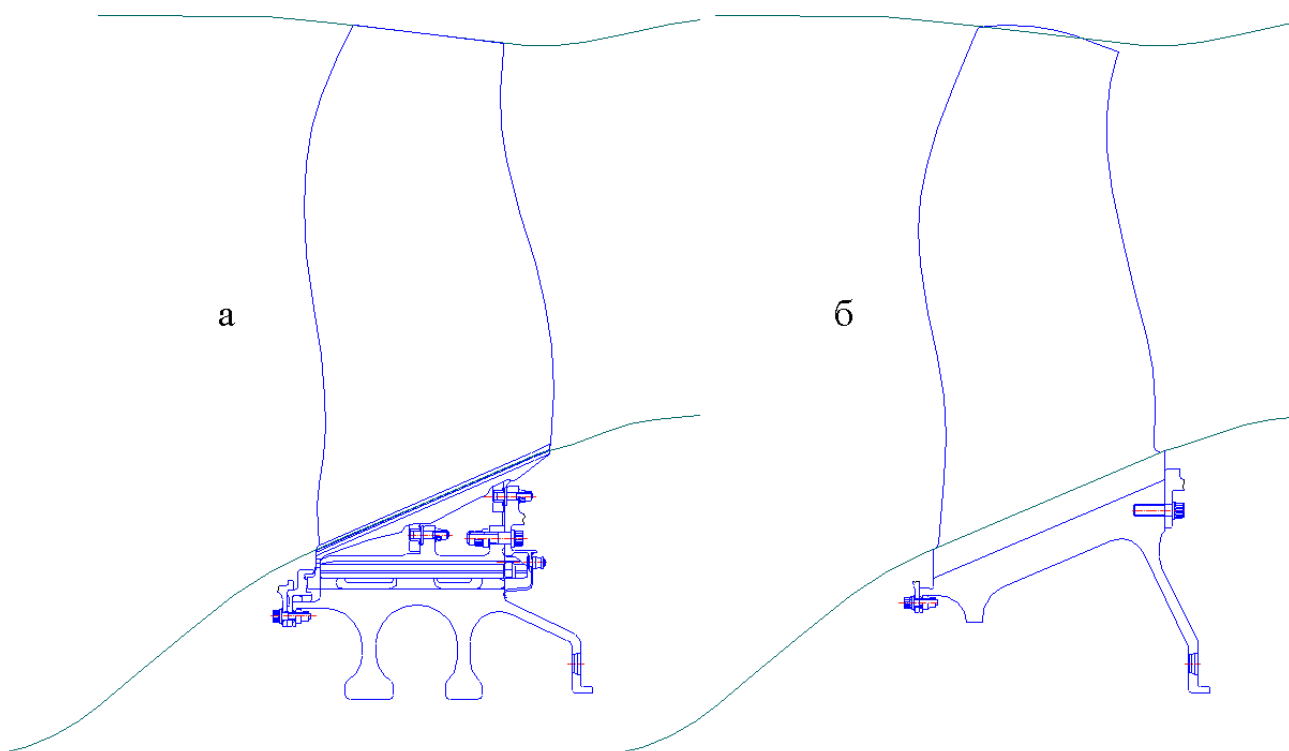


Рисунок 1 – Сравнение традиционной (а) и предлагаемой (б) конструкций

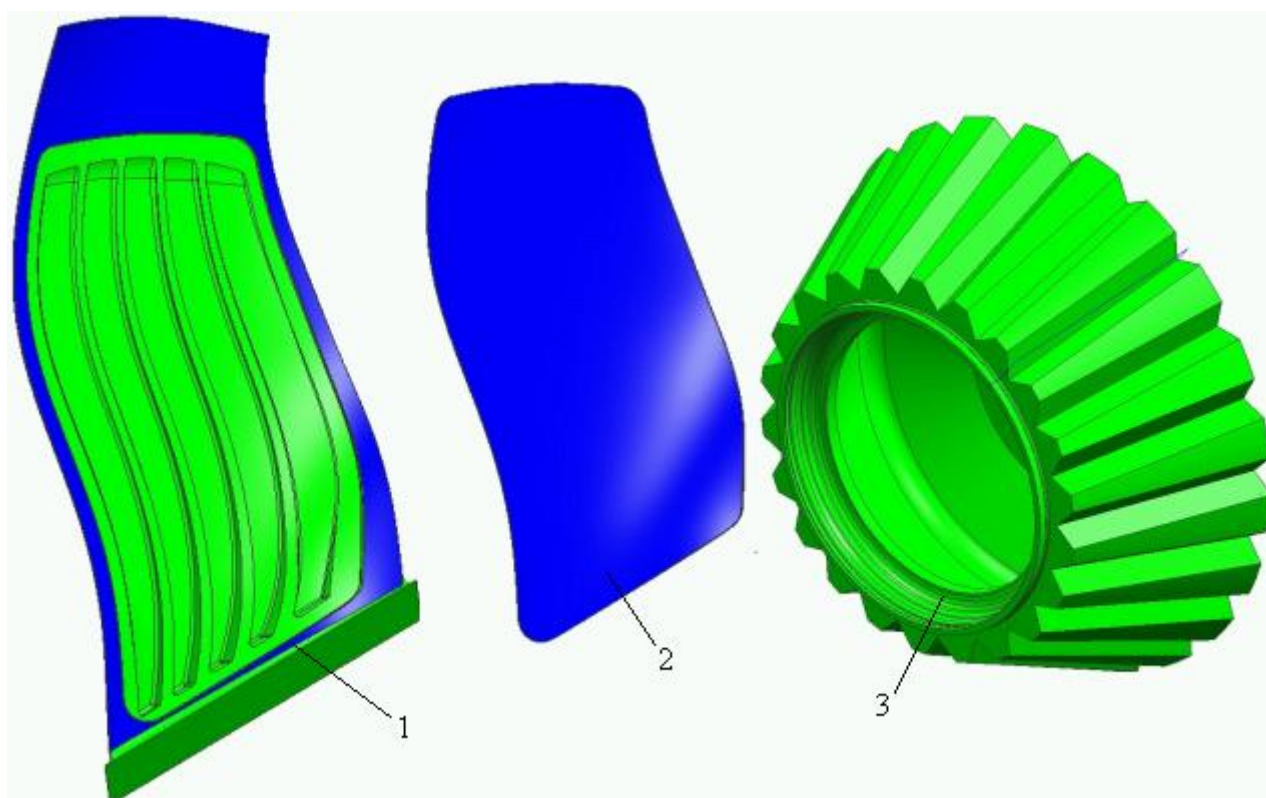


Рисунок 2 – Составные элементы конструкция моноколеса:

1 – основное перо лопатки; 2 – крышка лопатки; 3 – диск с ответными пазами

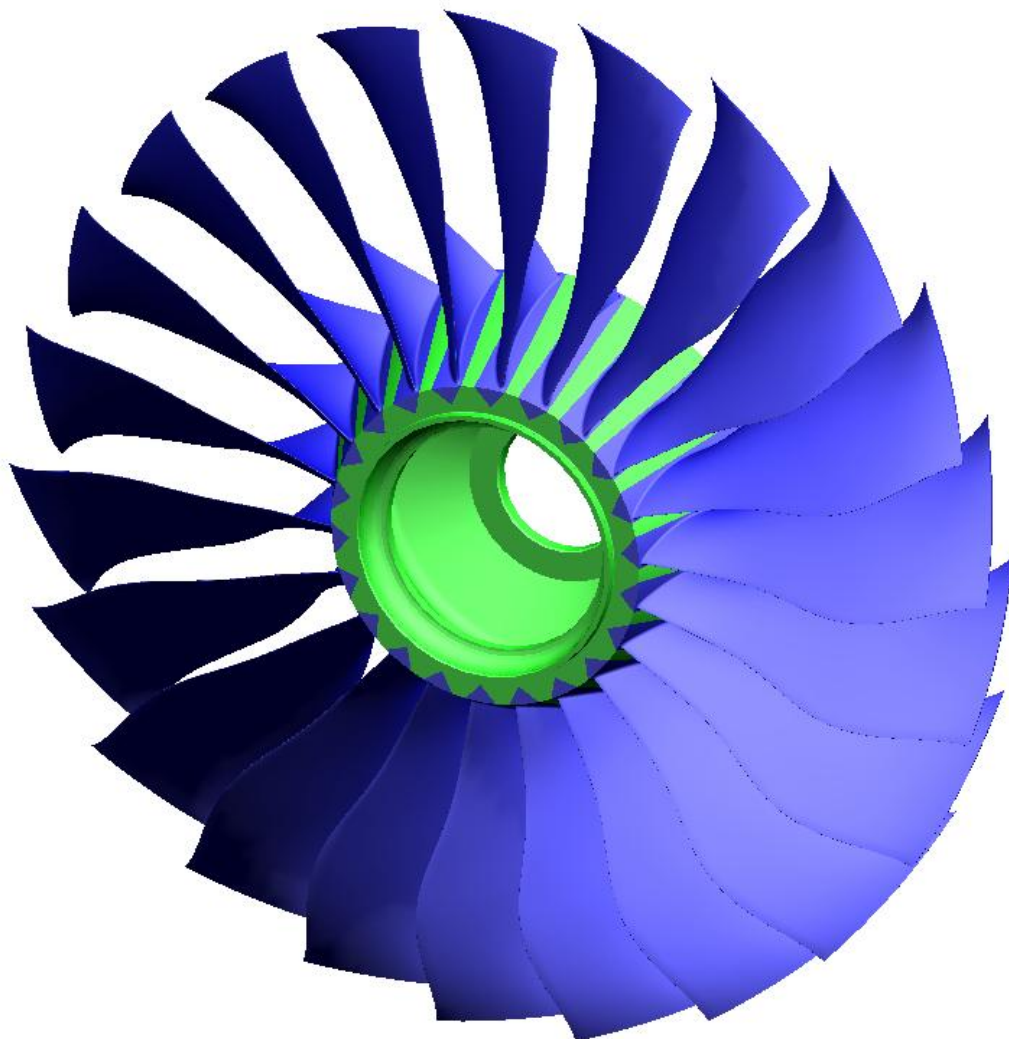


Рисунок 3 – Конструкция моноколеса

Количество лопаток (22) было выбрано исходя из оптимальных густот лопаточной решётки при аэродинамическом проектировании рабочего колеса вентилятора.

Технология изготовления моноколеса

Описанные выше преимущества моноколес и полых лопаток всё ещё сравнимы с недостатками, такими как трудоёмкость процессов изготовления и сложность обеспечения требуемого качества, что отражается в высокой стоимости изготовления. Для того, чтобы повысить качество и производительность изготовления деталей газотурбинного двигателя необходимо разрабатывать и внедрять передовые технологии, а также использовать различные технологические процессы во взаимодействии друг с другом. Это может дать существенный экономический эффект, хотя на начальном этапе потребует больших затрат времени и средств.

При изготовлении предлагаемой конструкции моноколеса предполагается использовать технологические процессы, основанные на методах обработки различной физической природы: механическая и электрохимическая обработка, сварочные процессы. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, в зависимости от материала и геометрии обрабатываемой детали. Однако их сочетание позволит обеспечить заданный комплекс требуемых технологических показателей, обеспечивая при этом высокую производительность и экономическую эффективность.

Маршрутный технологический процесс изготовления моноколеса

Таблица 1

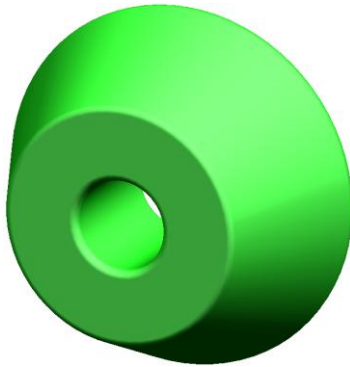
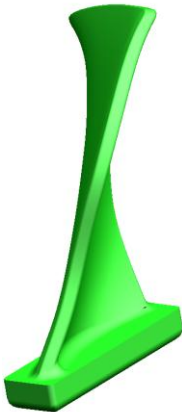
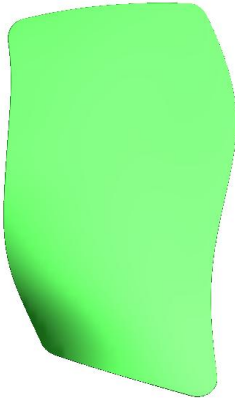
Этап	Операция	Содержание	Эскиз обработки	Оборудование
Заготовительные операции	Ковка заготовки диска	Изготовление заготовки диска с припуском под последующую обработку		Молот ковочный
	Штамповка заготовок лопаток	Изготовление заготовок лопаток с припуском под последующую обработку		Штамповочный пресс
	Штамповка пластины	Изготовление пластины методом точной штамповки		Штамповочный пресс

Таблица 1 (продолжение)


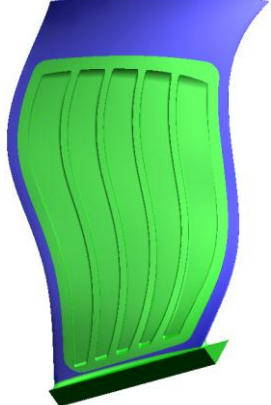
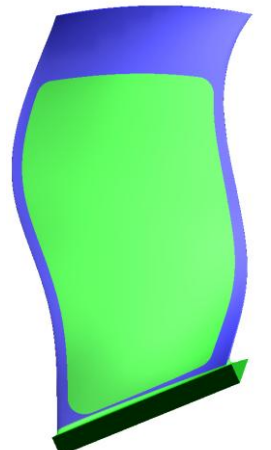
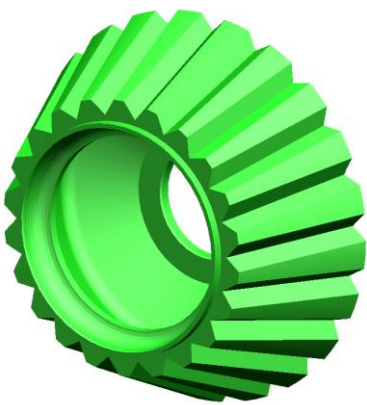
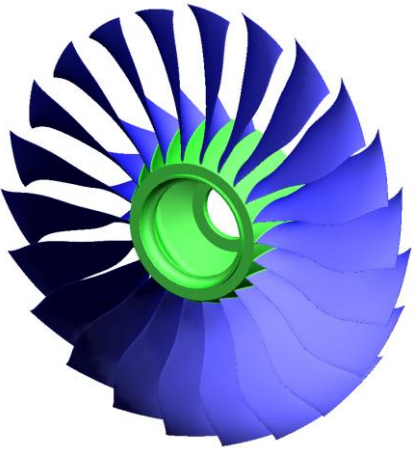
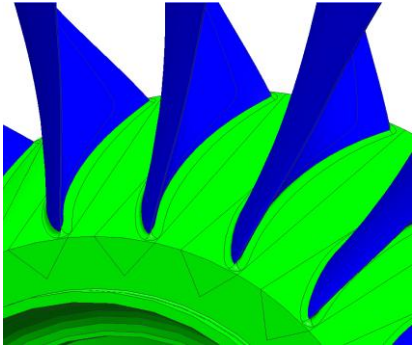
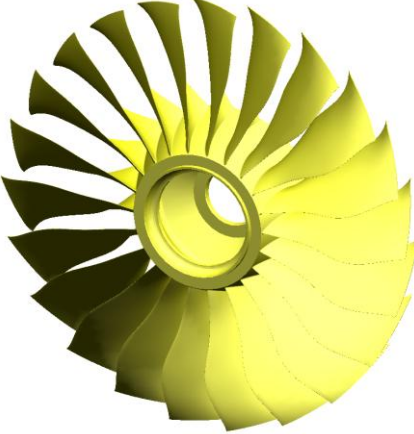
Этап	Операция	Содержание	Эскиз обработки	Оборудование
Предварительная обработка	Фрезерование лопаток	Обработка лопаток до необходимых размеров, изготовление хвостовика клиновидной формы с припуском под сварку		Пятикоординатный обрабатывающий центр
	Электрохимическая обработка лопаток	Изготовление профилированным электродом-инструментом полостей в корыте лопатке		Станок для электрохимической прошивки
	Приварка пластины к лопатке	Приварка пластины методом сварки трением с перемешиванием по контуру		Установка для сварки трением с перемешиванием
	Механическая обработка диска	Токарная обработка фланцев диска, изготовление пазов клиновидной формы с припуском под сварку		Токарный станок, фрезерный станок

Таблица 1 (окончание)

Этап	Операция	Содержание	Эскиз обработки	Оборудование
Окончательная обработка	Сварка лопаток с диском	Приварить лопатки к ступице методом линейной сварки трением		Установка для линейной сварки трением
	Удаление грата	Механическое удаление вытиснившегося в процессе сварки материала		Фрезерный станок
	Окончательная механическая обработка. Термообработка. Отделочная обработка. Упрочняющая обработка. Контроль			

Применение электрохимической обработки

Электрохимическая обработка нашла широкое применение в производстве лопаток авиадвигателей [6]. Общий процесс электрохимической обработки заключается в следующем: предварительно обработанную лопатку располагают в рабочей камере, закрепляют по предварительно обработанным базовым поверхностям (на замке и на периферии лопатки) и ведут формообразование профилированным электродом-

инструментом (рисунок 4) с подачей напряжения на электроды и заготовку, прокачкой электролита через межэлектродный промежуток и заданием электроду перемещения с периодическим ощупыванием детали.

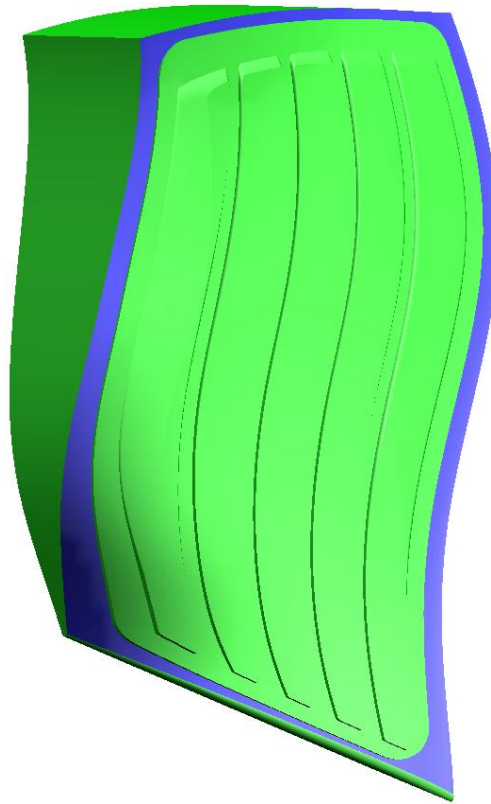


Рисунок 4 – Электрод-инструмент

Цикл обработки включает следующие операции:

- подвод электрода к детали и "ощупывание";
- отвод электрода на рабочий зазор;
- фиксация электрода или включение подачи электрода с одновременным включением рабочего тока;
- проведение рабочего периода, т.е. обработки в течение заданного времени;
- выключение рабочего тока;
- отвод электрода на увеличенный зазор для промывки межэлектродного промежутка;
- повторное "ощупывание".

Электрохимическая обработка стабильно обеспечивает необходимые показатели качества обработки: отклонение профиля от теоретического не более $\pm 0,02$ мм, шероховатость поверхности в пределах 10...11 класса ($Ra = 0,08$ мкм).

Применение сварки трением с перемешиванием

Процесс реализуется с помощью вращающегося инструмента, рабочий стержень которого погружается в стык между деталями на глубину, равную толщине пластины, при этом инструмент опорной поверхностью опирается на поверхность кромок свариваемых деталей (рисунок 5). Материал кромок за счёт теплоты, выделяющейся при трении, нагревается до пластичного состояния, вследствие чего уменьшается усилие, действующее на инструмент. При поступательном перемещении вращающегося инструмента по стыку пластическое течение выносит материал в зону, освобождающуюся сзади движущегося инструмента. При этом образуется сварной шов.

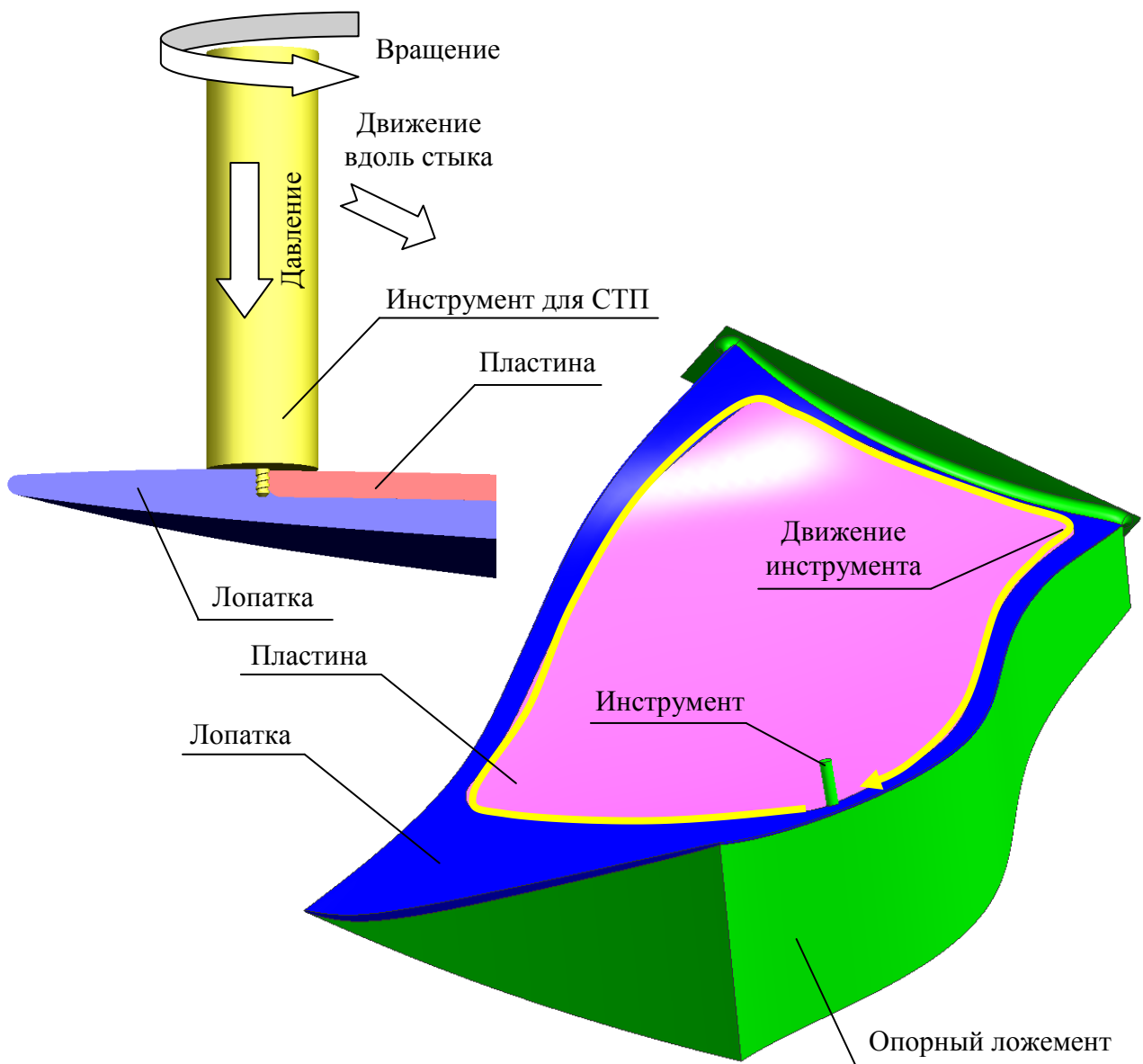


Рисунок 5 – Процесс сварки трением с перемешиванием

Применение линейной сварки трением

Основной принцип линейной сварки трением [7] заключается в следующем: одна из деталей соединения (диск) неподвижна, другая (лопатка) совершает линейные колебания (рисунок 6). На сопряженных поверхностях деталей, прижатых друг к другу, возникают силы трения. Работа, затрачиваемая на их преодоление, преобразуется в теплоту, которая выделяется на поверхностях трения и в приповерхностных слоях металла, нагревая их до температур, необходимых для образования сварного соединения ($T_{св} < T_{пл}$). Одновременно длина деталей сокращается, образуя оплавление в совместной зоне. Затем вибрация прекращается (рисунок 7), фиксируя детали в заданном положении.

При этом стык подвергается деформации сжатия осевым усилием, которое либо

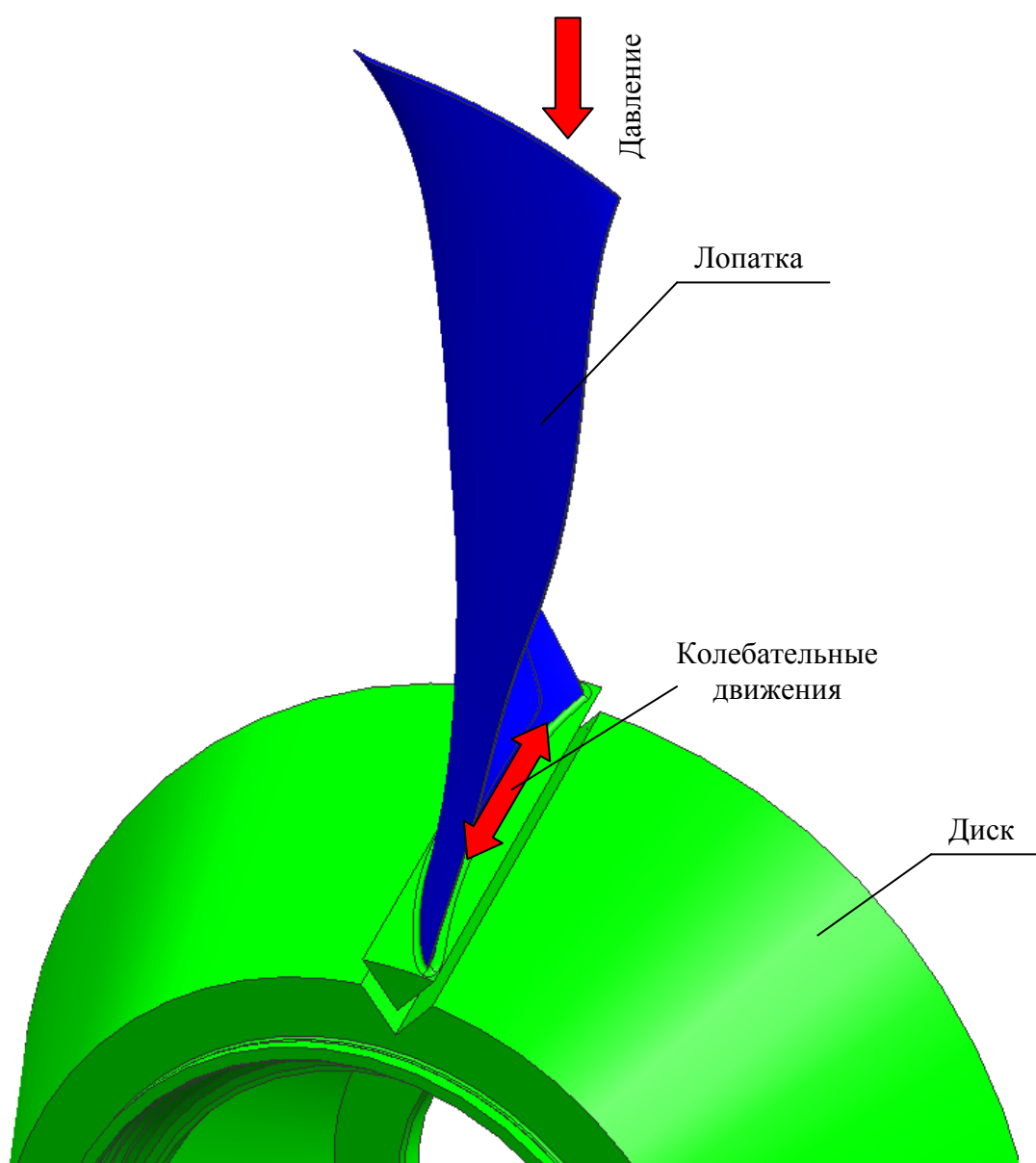


Рисунок 6 – Процесс линейной сварки трением

остаётся на прежнем (как в стадии нагрева) уровне, либо может быть увеличено. Общая усадка свариваемых деталей составляет около 3 мм.

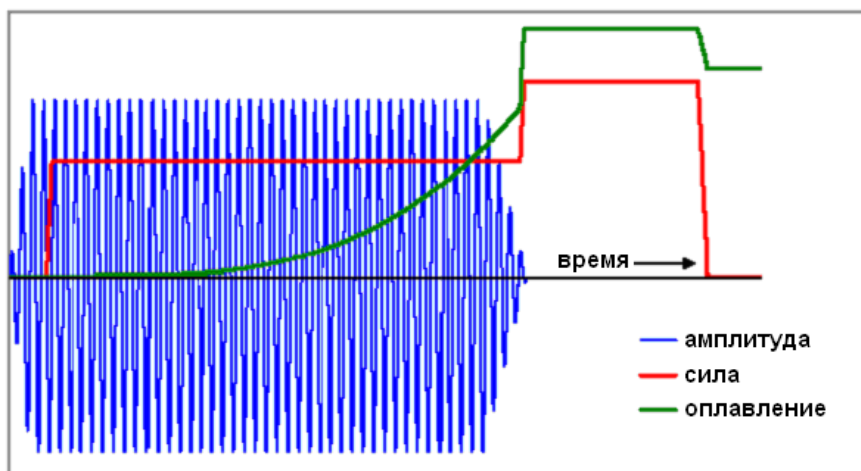


Рисунок 7 – Диаграмма процесса линейной сварки трением

Аэродинамическое 3D проектирование лопатки вентилятора

Лопатка спроектирована с учётом опыта проектирования вентиляторных лопаток ТРДД высокой степени двухконтурности для гражданской авиации. Профилирование производилось в специальном модуле CAD/CAE/CAM-системы Unigraphics NX.

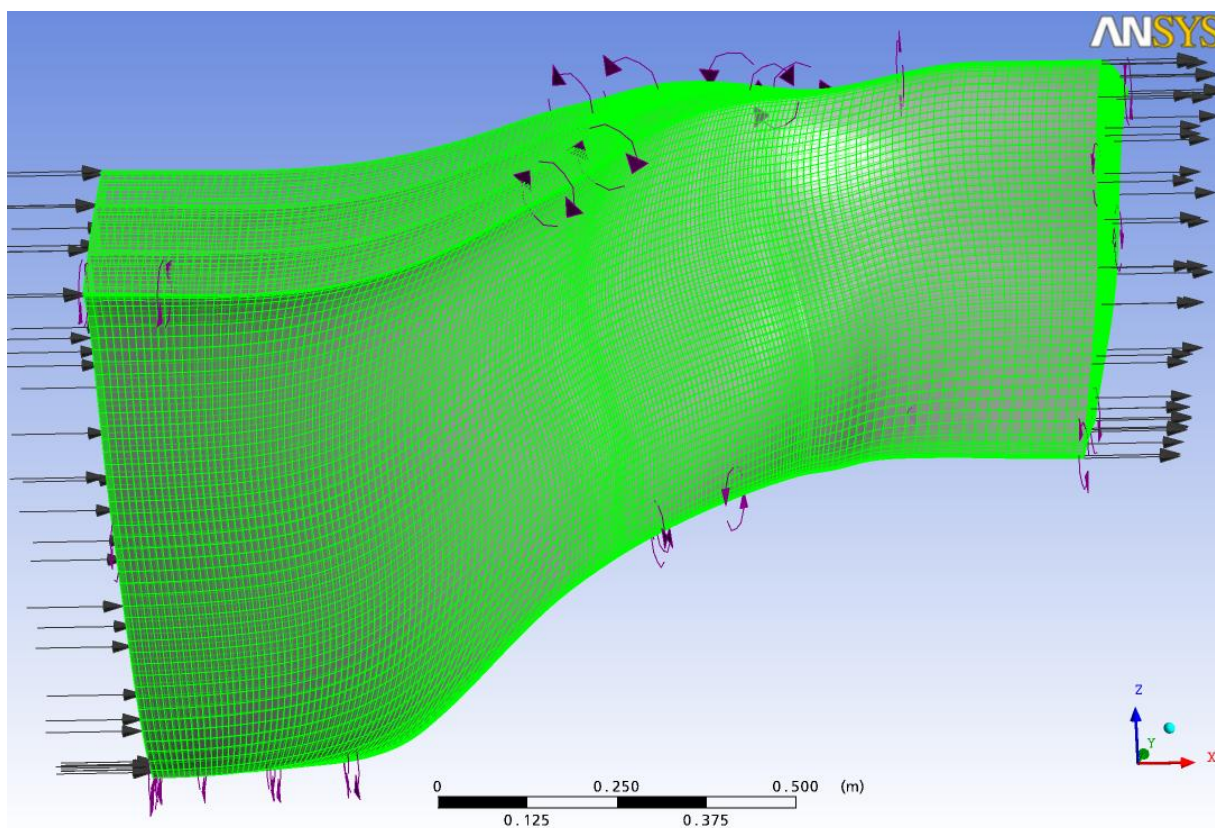


Рисунок 8 – Расчётная сетка для анализа аэродинамических характеристик спроектированной лопатки вентилятора

Расчеты аэродинамических характеристик [8] рабочего колеса вентилятора выполняются с помощью комплекса вычислительной газовой динамики ANSYS CFX 11.0. Расчет производится с использованием ОН-топологии расчётных сеток, расчётная сетка построена в NUMECA AutoGrid v5 и дискретизирована 499576 гексагональными конечными элементами (рисунок 8) с учётом радиального зазора. Для расчета используется двухпараметрическая модель турбулентности k-ε. В качестве рабочего тела применяется модель «Air Ideal Gas» – газ с молярной массой воздуха, подчиняющийся уравнению состояния идеального газа, течение газа моделируется адиабатическим, теплопроводным с учётом турбулентности, полиномиального изменения теплоёмкости и изменения динамической вязкости и теплопроводности газа по формуле Сазерленда. Расчеты выполняются в стационарной постановке на схеме High Resolution. На боковых поверхностях используется граничные условия типа «периодичность».

Результаты расчётов представлены на рисунках 9-13.

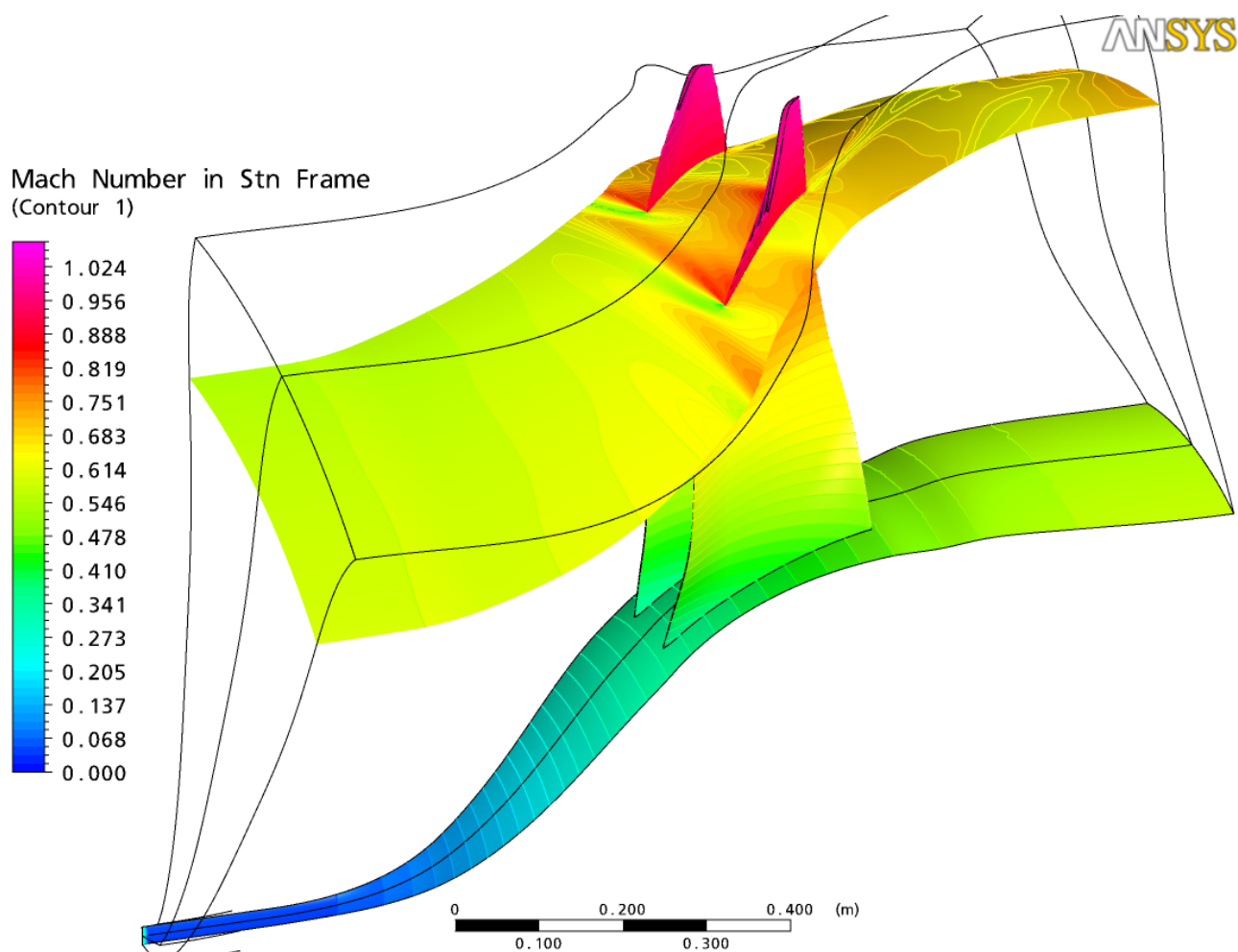


Рисунок 9 – Распределение полей чисел Маха в абсолютном движении (относительная высота 0,8)

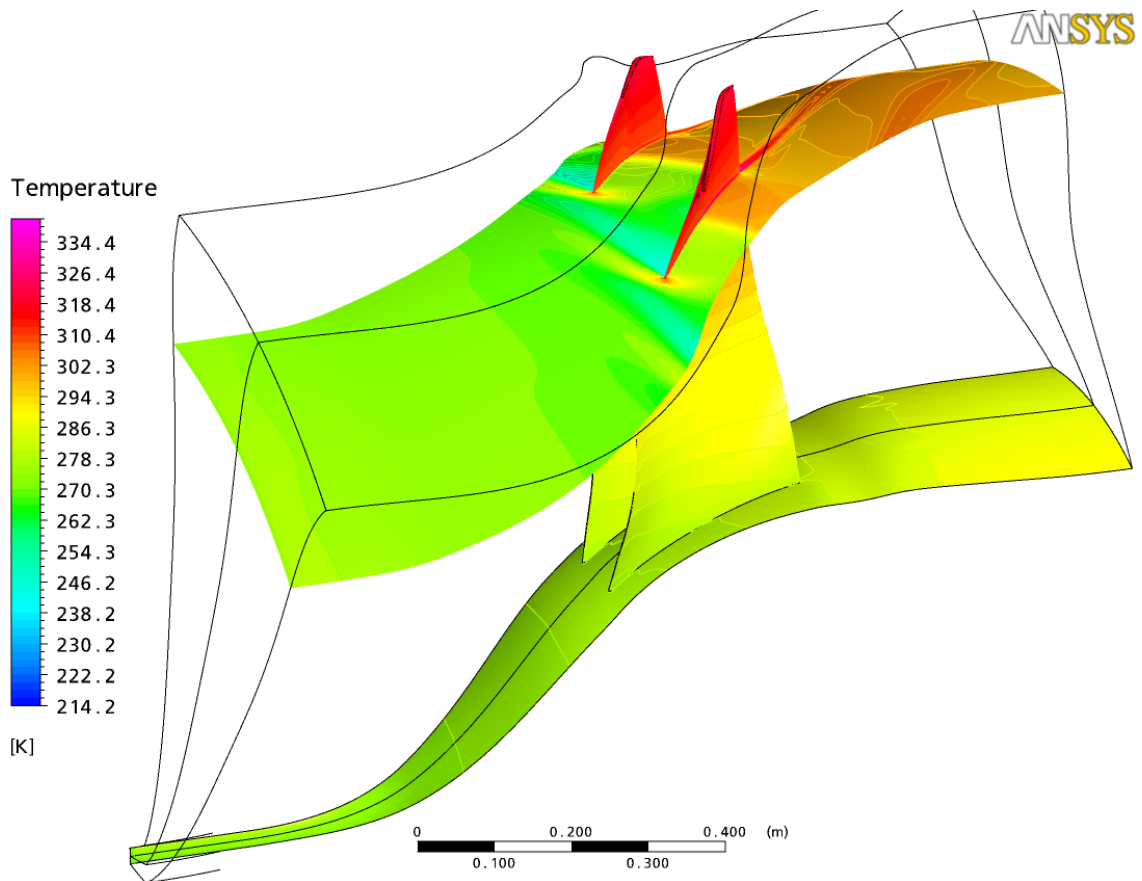


Рисунок 10 – Распределение полей температур (относительная высота 0,8)

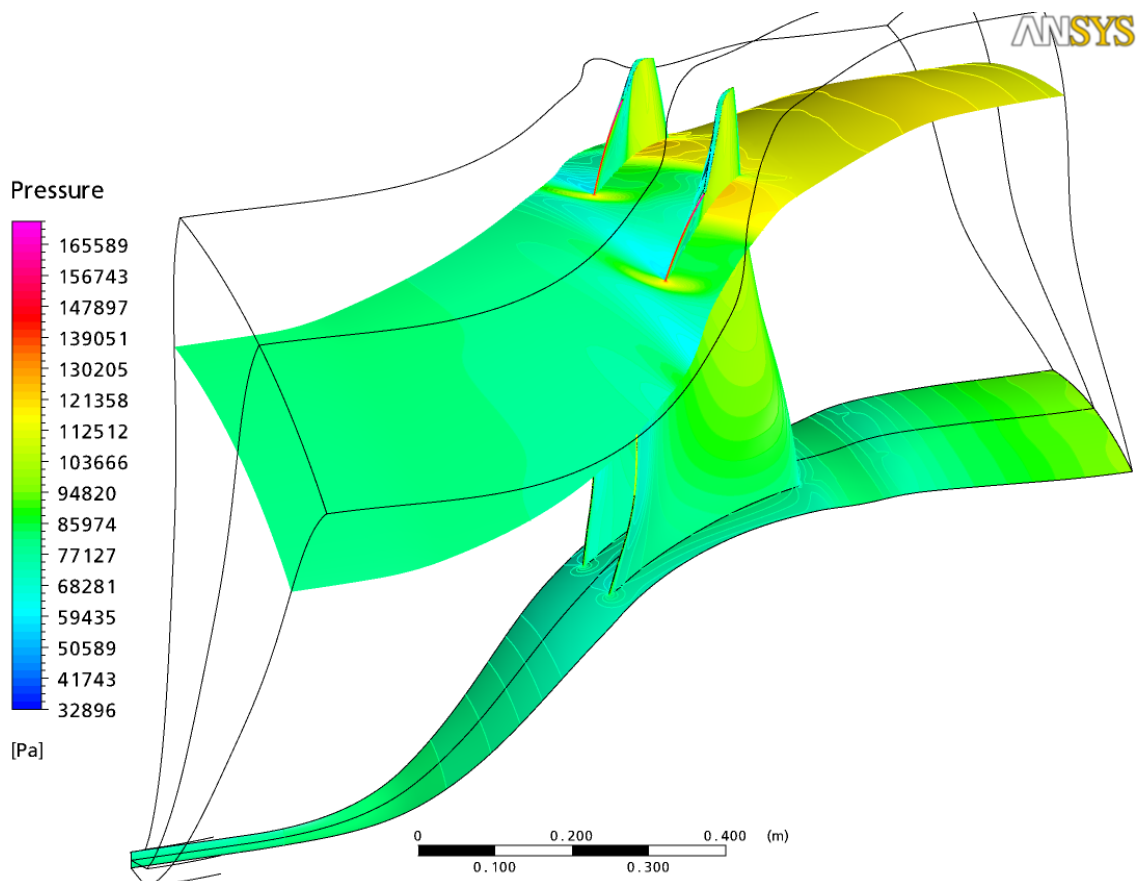


Рисунок 11 – Распределение полей давлений (относительная высота 0,8)

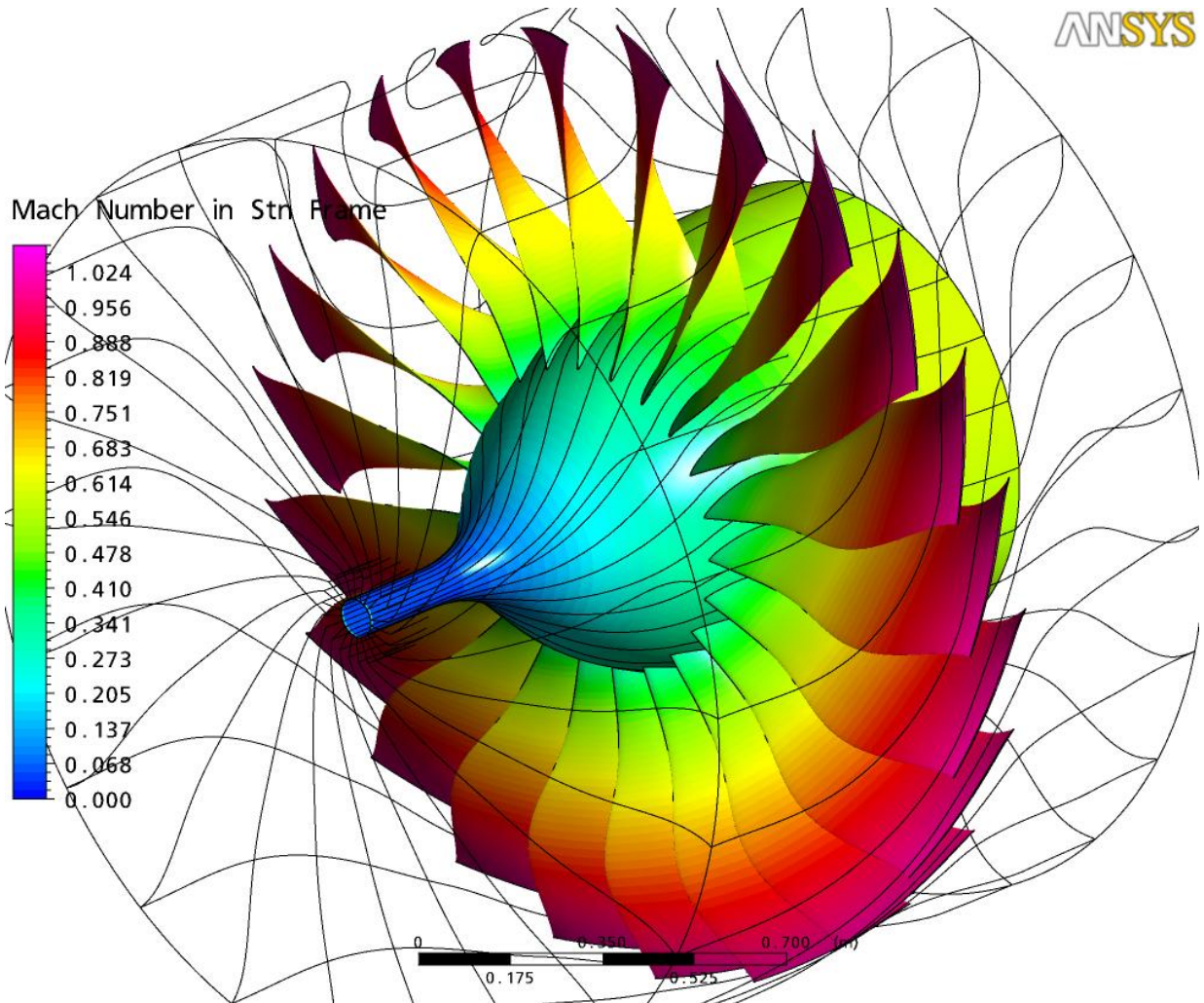


Рисунок 12 – Распределение полей чисел Маха в абсолютном движении по втулке и поверхностям лопаток

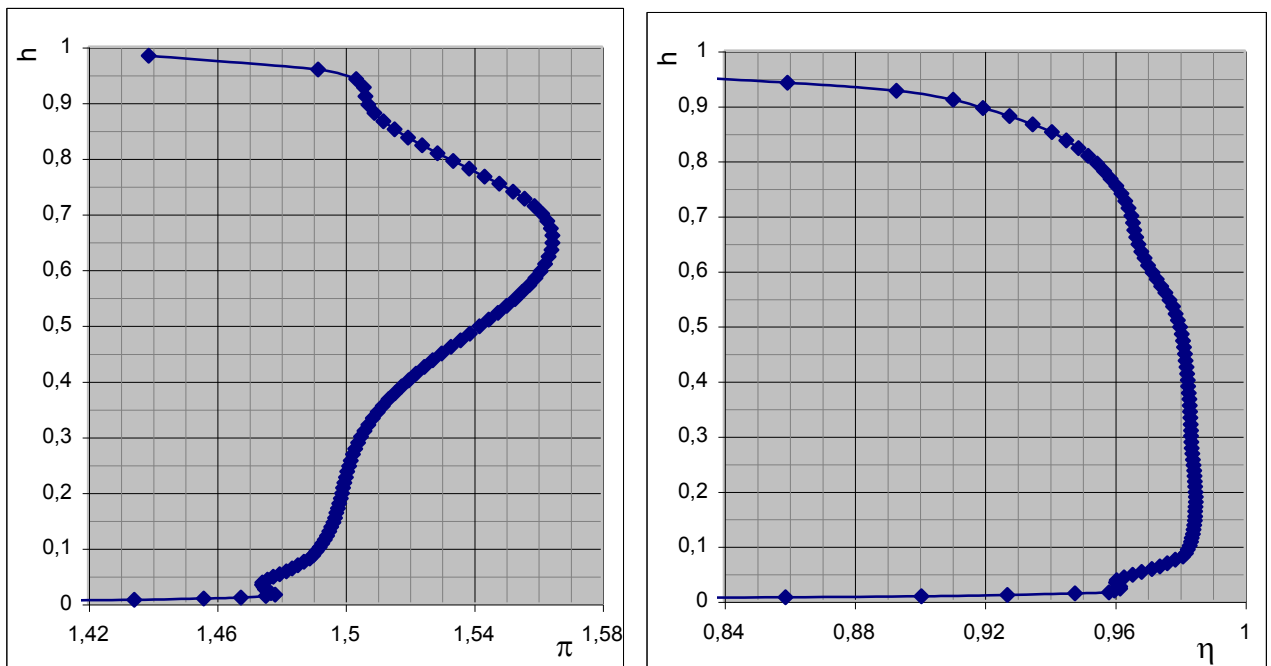


Рисунок 13 – Распределение степени повышения давления и КПД по высоте на выходе

В результате расчётов были получены следующие интегральные характеристики рабочего колеса проектируемого вентилятора:

- $\pi_B = 1,522$;
- $\eta_B = 0,948$;
- $G_B = 535,69$ кг/с.

Расчёты на прочность лопатки и сектора диска вентилятора

Расчёт прочностных параметров производился с помощью САЕ-пакета ANSYS 11 в интеграционной среде ANSYS Workbench.

Расчётная сетка построена в ANSYS Workbench и дискретизирована 55855 объёмными гексагональными конечными элементами SOLID186 (рисунок 14, а).

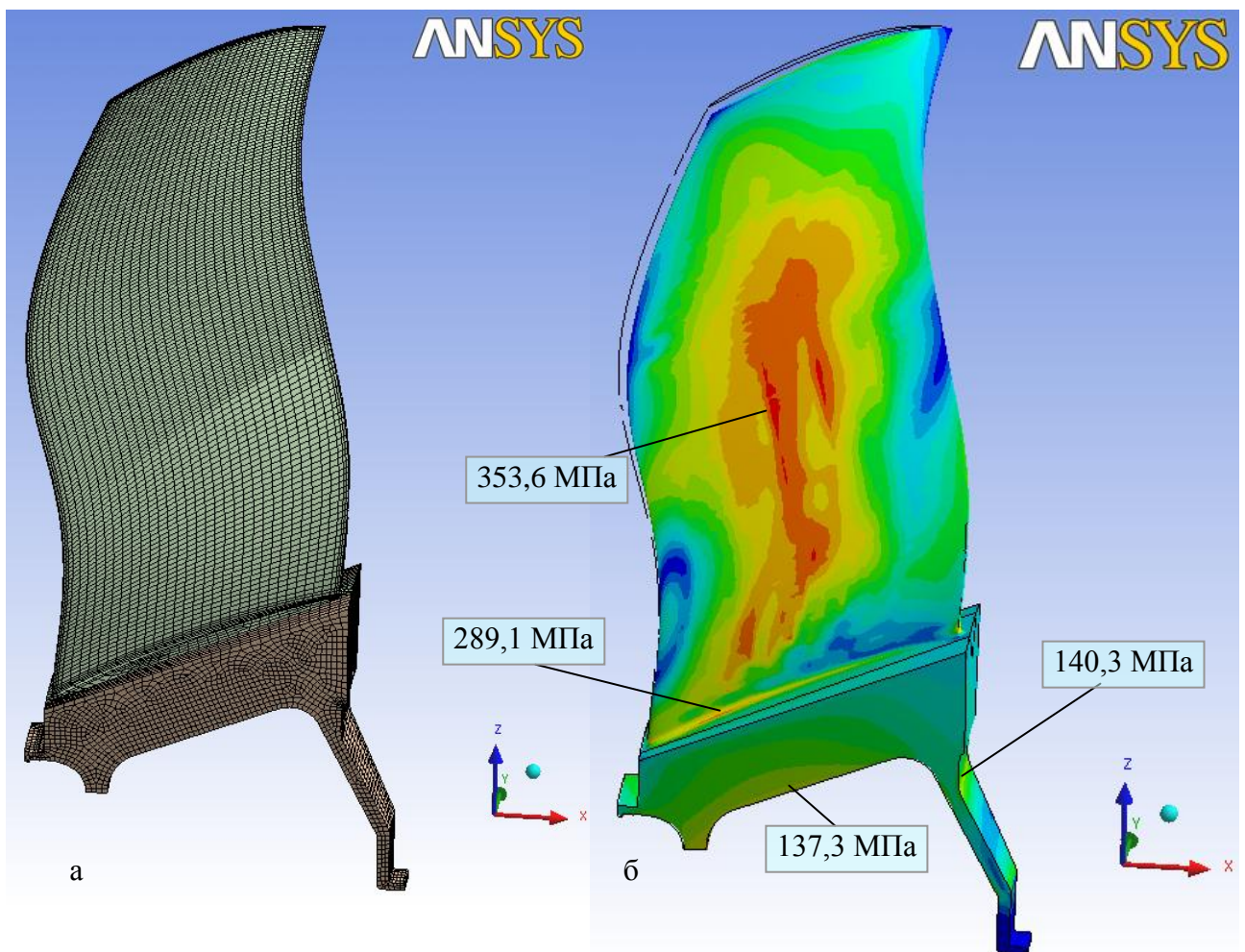


Рисунок 14 – Конечно-элементная модель лопатки и сектора диска (а) и эквивалентные напряжения по результатам расчёта (б)

Для расчёта на статическую прочность были приняты следующие условия:

- частота вращения 3800 об/мин;
- приложена нагрузка от газовых сил из ANSYS CFX;
- применена контактная сварочная поверхность на стыке клиновидного хвостовика лопатки и клиновидного паза диска;

для сектора диска применено условие циклической симметрии.

На рисунке 14, б представлено распределение эквивалентных напряжений по лопатке и диску вентилятора.

Максимальные напряжения составили 375,9 МПа. Область с максимальными напряжениями расположена в районе корневого сечения лопатки у нижней границы полостей (рисунок 15). Для исключения данной области требуется более подробные прочностные исследования потребной толщины стенок полостей.

Как показали результаты расчёта, напряжения в диске составляют порядка 100-140 МПа, что говорит о возможности уменьшения габаритов и массы диска. Возможным вариантом повышения прочностных свойств при значительном снижении массы является применение обмотки из композитных эпоксидно-углеродных материалов.

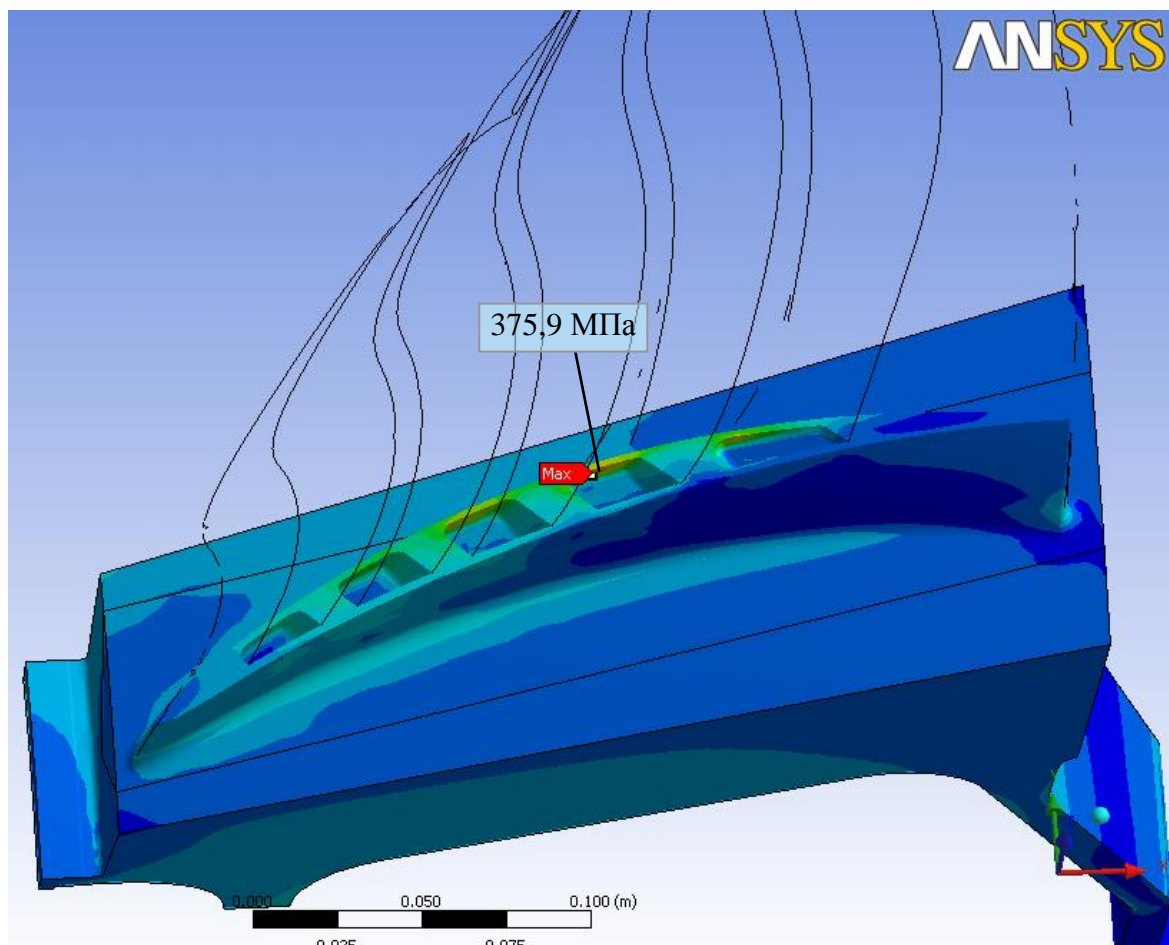


Рисунок 15 – Область с максимальными напряжениями

По результатам расчётов максимальные деформации составили 7,3 мм, а суммарная радиальная вытяжка лопатки и диска – 0,73 мм.

Выводы

В проекте предложена конструкция моноколеса вентилятора с полыми лопатками из титанового сплава, предложена технология изготовления и оценены аэродинамические и прочностные характеристики конструкции.

Преимуществами предлагаемой схемы являются:

- упрощение конструкции рабочего колеса вентилятора за счёт исключения таких элементов как межлопаточные платформы, контрочки лопаток, защита от протекания через паз и другие;
- снижение массы на 24-25% за счёт облегчения лопаток вентилятора и менее массивного диска вентилятора;
- исключение использования диффузионной сварки и сверхпластичной формовки привело к устранению образования альфирированного слоя и других негативных воздействий высоких температур на титановый сплав;
- рёбра жёсткости внутренних полостей лопатки не подвергаются деформациям при изготовлении, что позволяет более точно смоделировать поведение лопатки на рабочих режимах и оценить прочностные характеристики;
- низкая стоимость изготовления по причине использования отработанных технологий и минимизации внедрения дорогостоящих технологических операций.

Недостатками предлагаемой схемы являются:

- снижение ремонтпригодности конструкции, что характерно для всех моноколёс;
- возможное снижение прочностных характеристик по сравнению с «традиционной» конструкцией.

Библиографический список

1 **Каримбаев, Т. Д.** Облегченные широкохордные лопатки вентиляторов ТРДД. Особенности технологий их изготовления [Текст] / Т. Д. Каримбаев, А. А. Луппов // Конверсия в машиностроении: межотрасл. информ.-аналит. науч.-техн. и обществ. журн. ученых и инженеров конверсируемого машиностроения. – 2005. – N 4/5. – С. 108-112.

2 **Иноземцев, А. А.** Перспективная технология изготовления полой широкохордной лопатки вентилятора [Текст] / А. А. Иноземцев, Р. Р. Мулюков, Р. В. Сафиуллин и др. // Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: Сборник статей /Под общ. ред. академика В.Н. Анциферова. – Пермь, Пермский ЦНТИ – 2009. – с.61-65.

3 **The Jet Engine.** 5th Edition [Текст]. The Technical Publications Department, Rolls-Royce plc, Derby, England, 1996 – 278 с.: ил.

4 **Пат. ЕР 1754857.** Hollow fan blade for turbine engine [Текст] / United Technologies Corporation. – ЕР 1754857; заявл. 09.08.2006; опубл. 21.02.2007 – 8 с.: ил.

5 **Пат. US 2005/0002786.** Hollow fan blade for turbine engine and method of manufacturing such a blade [Текст] / Snecma Moteurs. – US 2005/0002786; заявл. 19.05.2004; опубл. 06.01.2005 – 12 с.: ил.

6 **Саушкин, Б. П.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, А. А. Митрофанов и др.; Под ред. Б. П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.: ил.

7 **Штрикман, М. М.** Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Технология машиностроения. – 2007. – №№ 8, 10, 11.

8 **Кампсти, Н.** Аэродинамика компрессоров [Текст]: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 688 с.: ил.

Сведения об авторах

Коротыгин Артём Александрович, инженер-конструктор ОАО «НПО «Сатурн»,
тел.: +7 920 104-29-21, e-mail: korotygin.artem@gmail.com

Багров Сергей Владимирович, инженер-конструктор ОАО «НПО «Сатурн» , аспирант
Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьёва,
тел.: +7 905 632-48-85, e-mail: bagroff_2007@mail.ru

Пятунин Кирилл Романович, студент Рыбинской государственной авиационной
технологической академии имени П.А. Соловьёва,
тел.: +7 910 967-73-61, e-mail: kodlin@bk.ru