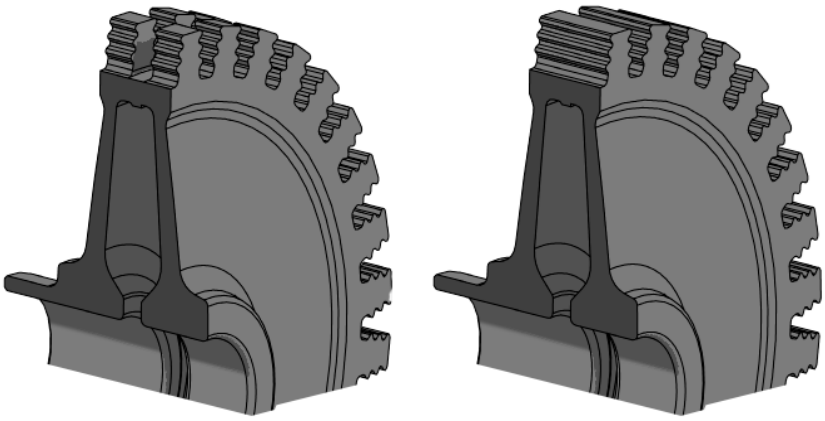
РАЗРАБОТКА ПУСТОТЕЛЫХ ДИСКОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МАССЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ВВЕДЕНИЕ

Для достижения необходимой прочности дисков высокооборотных роторов конструкторы, как правило, увеличивают толщину в области ступицы диска. Это приводит к увеличению массы дисков турбин газотурбинных двигателей (ГТД). Повышение прочностных и улучшение весовых характеристик дисков возможно при использовании методов оптимизации их геометрического облика и размеров и\или использования новых конструктивных решений. В последнем случае необходимо решать две проблемы: оценка эффективности новых конструктивных решений и их реализация с точки зрения технологических возможностей.

Одним из таких решений является диск с двумя полотнами (пустотелый диск, рисунок 1). Различные варианты, способы изготовления и области применения пустотелых дисков рассмотрены в ряде работ, в том числе в патентах [1–2]. Преимуществом перехода к пустотелой конструкции является снижение массы диска за счет разделения полотна на две части и их оптимального расположения вдоль обода. Это позволяет уменьшить габариты ступицы диска, а, значит, снизить массу рабочего колеса (РК) в целом. Дополнительными преимуществами являются снижение времени прогрева и остывания диска (из-за уменьшения габаритов ступицы), что благоприятно как с точки зрения напряжённо-деформированного состояния диска, так и кинетики изменения радиальных зазоров в турбине, а также повышение выявляемости дефектов в пустотелых дисках.



а) разрезной замок б) цельный замок

Рисунок 1 - Примеры конструкции пустотелых дисков

Целями данной работы были проведение расчетного исследования эффективности применения пустотелых дисков с точки зрения повышения циклической долговечности и снижения массы, а также демонстрация возможности изготовления таких дисков.

Были решены следующие задачи:

1) Выполнен анализ возможностей изготовления пустотелых дисков при использовании различных методов производства: сварки, горячего изостатического прессования (ГИП), аддитивных технологий (АТ).
2) Проведена конструктивно-прочностная оптимизация модельных и натурных дисков без учета и с учетом замковых соединений.
3) Изготовлены модельные диски.
4) Проведены испытания образцов для определения характеристик материала, в том числе получаемого нетрадиционным способом.
5) Проведены экспериментальные исследования прочности пустотелых модельных дисков.
6) Обобщен опыт разработки пустотелых дисков.

1 Анализ возможности изготовления пустотелых дисков

Исследования в обеспечение разработки конструктивно-технологических решений по созданию пустотелых дисков проведены, исходя из возможных методов изготовления, которые условно можно поделить на два класса: традиционные и основанные на применении АТ. В обоих случаях необходимо проводить множество предварительных исследований, связанных с анализом характеристик конструкционной прочности материала и разработкой технологии изготовления пустотелой конструкции.

В качестве базовых рассмотрены варианты изготовления пустотелых дисков с использованием традиционных методов производства [3]. Так, например, для изготовления полого диска с разрезной ободной или ступичной частью может быть предложена технология формования целой заготовки диска из порошковых дисковых сплавов методами металлургии гранул (консолидации распыленных порошков высоколегированных сплавов путем ГИП). При разработке технологии следует предусмотреть наличие прорези для удаления закладного элемента и способы обработки внутренних поверхностей. Возможен также вариант создания пустотелого диска при использовании ГИП для соединения предварительно скомпактированных частей диска.

Альтернативой описанному подходу является изготовление пустотелого диска из двух частей, которые свариваются друг с другом при помощи различных методов сварки. При таком подходе пустотелый диск разделяется на две части, которые можно изготовить и обработать при помощи традиционных технологий производства (механические операции – деформирование, точение, методы ГИП и т.д.). Далее эти части соединяются вместе при помощи того или иного типа сварки.

При реализации варианта изготовления полого диска из двух частей внутренние поверхности могут быть обработаны механическими способами до их соединения.

Наибольшее количество дефектов сварного соединения сосредоточено в корне шва. Преимущество разработанного авторами метода [4-6], состоит в том, что корень шва располагается с внешней стороны обода, поэтому после сварки легко производится удаление дефектного слоя металла при помощи механической обработки. Припуск на обработку шва заложен на этапе проектирования диска с учётом максимальной глубины проплавления, которая для обеспечения требуемой прочности шва обычно составляет не более 10-15 мм. Сварка осуществляется сфокусированным лазерным лучом в один проход со стороны полости диска. Для этого создается специальная оснастка [3, 6]. При этом мощность лазерного луча должна быть не более допустимой величины термического расширения кругового стыка.

Для изготовления пустотелых дисков с помощью АТ из металлического порошка могут быть применены две основные технологии: синтез на подложке (PBF – Powder Bed Fusion) и прямое лазерное спекание металлов (DMLS - **Direct Metal Selective Laser Sintering)**. Несмотря на то, что применение методов АТ для изготовления сложных деталей открывает широкие возможности конструирования, существуют технологические проблемы, которые необходимо решить с учетом применяемого оборудования и выбранного метода изготовления. Изготовление пустотелого диска методами АТ связанно с большими сложностями из-за недостаточного уровня развития АТ, а также недостаточного объема исследований прочности вращающихся конструкций, изготовленных таким способом. Дополнительной проблемой так же как и при изготовлении целого полого диска методом ГИП является обработка поверхностей полости пустотелого диска.

Более подробное описание разработанных технологий изготовления пустотелых дисков приведено в [3, 4, 6, 7, 9-12].

2 Конструктивно-прочностная оптимизация пустотелых дисков

Поиск оптимальной конфигурации полотен и полости между ними является сложной и трудоемкой задачей, качественно решить которую можно только используя автоматизированные подходы к проектированию: параметризацию применяемых конечно-элементных моделей (КЭМ) и поиск оптимальной конструкции при помощи современных методов многокритериальной оптимизации.

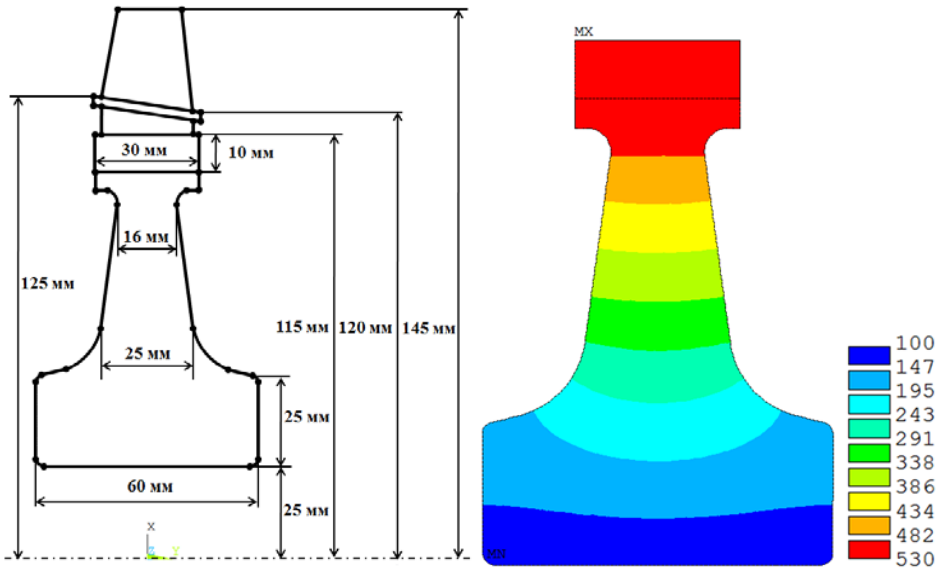
На первых этапах работ был проведен анализ преимуществ внедрения пустотелой конструкции для дисков различных габаритов и условий эксплуатации без учета замковых соединений. Анализ полученных результатов показал, что внедрение пустотелой конструкции с криволинейными полотнами эффективно как для снижения массы, так и для увеличения

циклической долговечности по сравнению со стандартной конфигурацией диска. При этом чем выше скорость вращения диска и меньше его габаритные размеры, тем выше эффективность применения пустотелой конструкции: для диска больших размеров – снижение массы (до 4%), увеличение циклической долговечности до 15%, для диска средних размеров – снижение массы до 18%, увеличение циклической долговечности в 2 раза, для малоразмерного диска – снижение массы до 30% увеличение циклической долговечности в 2,8 раза [7, 9].

Затем был разработан подход к оптимальному проектированию замкового соединения и пустотелого диска турбины в рамках одной задачи оптимизации в 3D постановке. Для этого в среде ANSYS APDL была создана параметризованная 3D КЭ модель сектора пустотелого диска с одной лопаткой. С использованием разработанной модели проведена сравнительная оптимизация замкового соединения и диска типичной турбины стандартной и пустотелой конфигураций. Для оценки эффективности использования разрезной пустотелой конструкции проведена оптимизация диска базовой конструкции, по сравнению с которой проводился анализ преимуществ обычной пустотелой конструкции. В качестве критериев оптимизации выбраны условие минимизации массы конструкции и максимизация циклической долговечности. В качестве ограничений использовались требования к минимальному значению циклической долговечности в ступице и полотне диске (min МЦУ > 12000 циклов) и требования, регламентируемые нормативными документами, а именно запасы по несущей способности: K_{B1}>1.4 и K_{B2}>1.4 (при разрушении по меридиональному или по окружному сечению диска).

Поиск оптимальной конструкции проводился при помощи программного пакета многокритериальной оптимизации IOSO NM – технологии многомерной нелинейной оптимизации, использующей алгоритмы на основе самоорганизации и регрессионные модели. В модуле оптимизации (IOSO NM) создается вектор варьируемых параметров и запускается параметризованная КЭ модель, которая проводит необходимые вычисления и формирует вектор выходных параметров. На базе полученных результатов с учетом используемых алгоритмов поиска в IOSO NM создается новый вектор варьируемых параметров. Начинается новая итерация оптимизации. Поиск завершается при удовлетворении всех критериев и ограничений с заданной точностью или при превышении заданного количества итераций.

Габаритные размеры диска из сплава ЭИ698ВД и поле температур, для которого проводилась оценка эффективности использования пустотелой конструкции, приведены на рисунке 2. Частота вращения диска составляла 30 000 об/мин. Тепловое состояние диска определялось на каждой итерации оптимизации на базе следующих граничных условий I рода: температура ступицы диска – 100°С, температура обода диска – 530°С.



а) Габариты б) Поле температур

Рисунок 2 - Общий вид объекта оптимизации

Схема параметризации замкового соединения приведена на рисунке 3. Схемы параметризации дисков стандартной и пустотелой конструкции приведены на рисунке 4. Варьировавшиеся в процессе оптимизации параметры выделены красной рамкой, неварьируемые параметры – чёрной рамкой. В процессе оптимизации варьировалось для замкового соединения и диска стандартной конструкции – 18 параметров; для замкового соединения и диска пустотелой конструкции – 43 параметра.

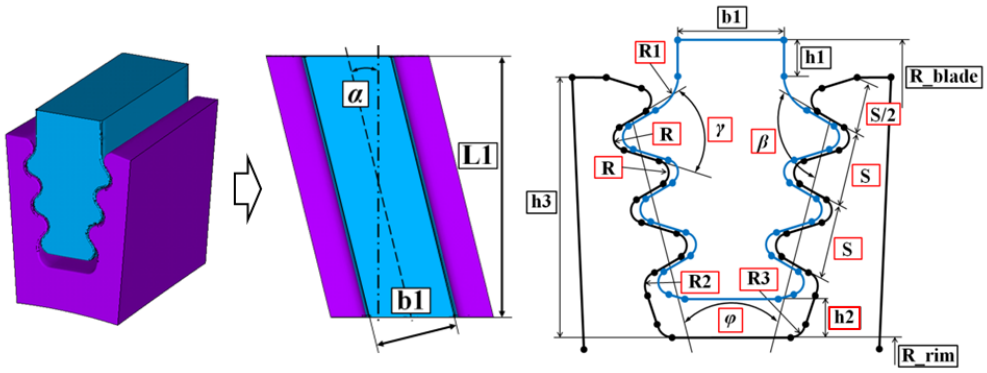
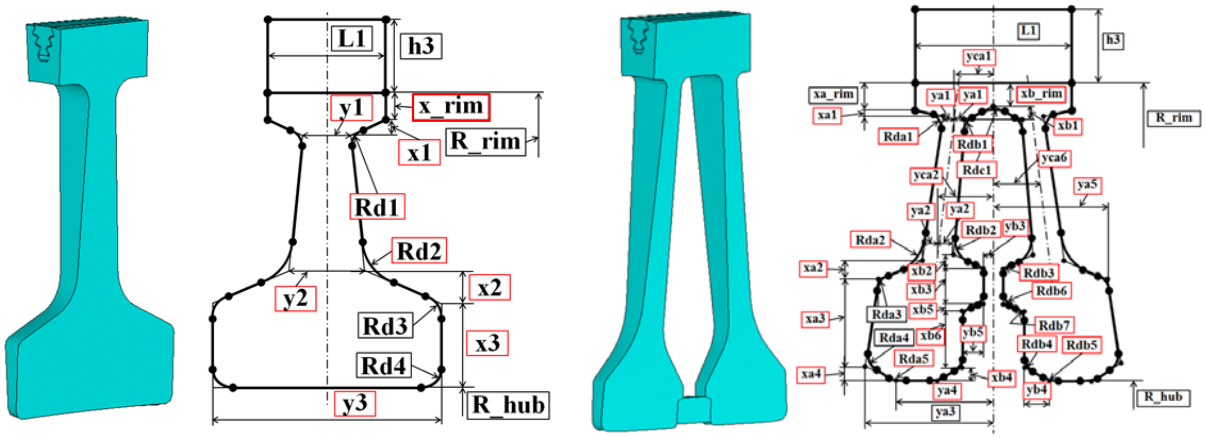


Рисунок 3 - Схема параметризации замкового соединения



а) б)

Рисунок 4 - Схема параметризации дисков стандартной (а) и пустотелой (б) конструкций

На каждой итерации оптимизации (как диска стандартной, так и диска пустотелой конфигураций) автоматически проводились модификация модели и расчёт прочности замкового соединения и диска согласно следующей схеме:

- модификация твердотельной и конечно-элементной 3D моделей замкового соединения и диска согласно новым значениям варьируемых параметров;
- анализ теплового состояния модифицированной конструкции;
- анализ напряженности диска в условиях нагружения;
- анализ напряженности диска без нагрузок с учетом предыдущего напряженного состояния;
- анализ МЦУ с использованием минимальных кривых МЦУ и коэффициента запаса;
- дефекты не учитывались.

В замковом соединении и между упором и ступицами (для пустотелой конфигурации) моделировалось контактное взаимодействие со стандартными настройками. Перо и трактовая полка лопатки учитывались в виде сосредоточенных масс.

Полученные в результате оптимизации дисков стандартной и пустотелой конфигурации Парето множества приведены на рисунке 5. В полученных Парето множествах выделены 4 характерных точки – по две для стандартной (Opt №1 и Opt №3) и пустотелой (Opt №2 и Opt №4) конфигураций. Твердотельные модели характерных конструкций приведены на рисунках 6 и 7.

Результаты сравнительной оптимизации показывают, что использование пустотелой конфигурации позволяет снизить массу РК на 10 – 13% в зависимости от требований к значению циклической долговечности в замковом соединении и диске. Одновременно с этим пустотелая конфигурация позволяет повысить циклическую долговечность (без учёта

возможных дефектов) в замковом соединении и диске турбины на 20 – 30% при сохранении массы конструкции и даже при её уменьшении. Данные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее при проведении сравнительных оптимизаций с использований 2D параметризованных моделей без учёта замковых соединений. Таким образом, показано, что применение пустотелой конфигурации не снижает характеристик прочности замкового соединения, но при этом позволяет улучшить массовые характеристики и характеристики прочности РК турбин.

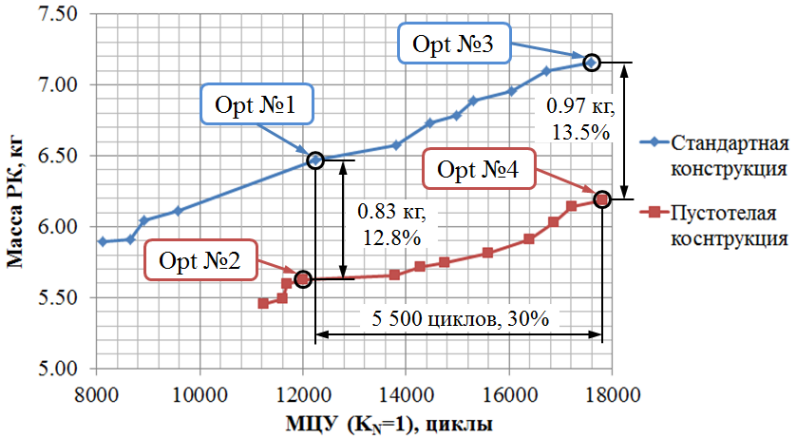
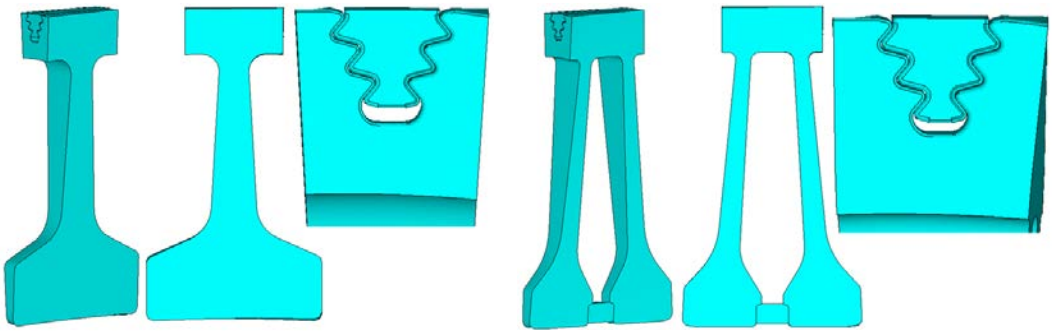
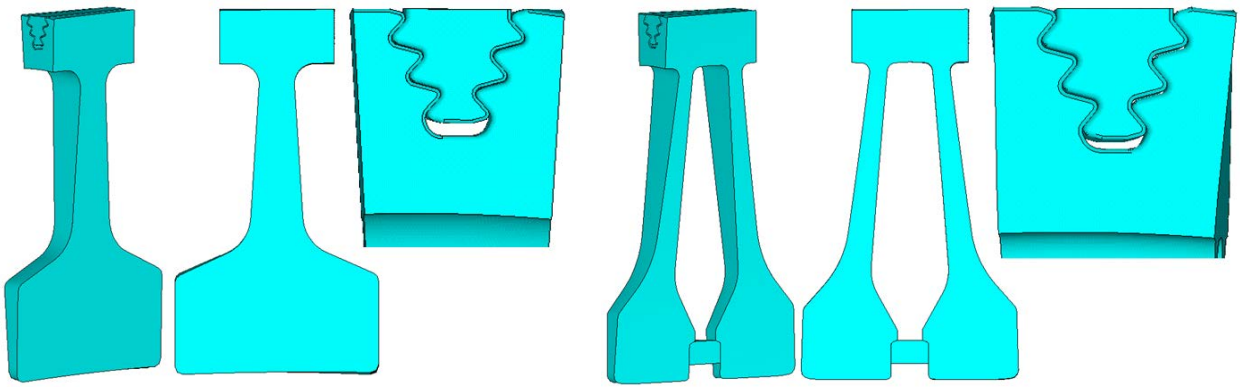


Рисунок 5 - Парето множества, полученные в результате оптимизации



а) Opt №1 стандарная конфигурация (6.5 кг) б) Opt №3 пустотелая конфигурация (5.6 кг)

Рисунок 6 - Твердотельные модели характерных конструкций (прогнозируемая циклическая долговечность до образования трещины ≈ 12 000 циклов)



а) Opt №2 стандарная конфигурация (7.2 кг) б) Opt №4 пустотелая конфигурация (6.2 кг)

Рисунок 7 - Твердотельные модели характерных конструкций (прогнозируемая циклическая долговечность до образования трещины ≈ 18 000 циклов)

Следует отметить, что при предлагаемом конструктивном решении тепловое состояние, как в ободной части диска, так и в полотнах, будет существенно отличаться, от принятого при оптимизационном расчете симметричном поле температур. Температурные состояния левого и правого полотен будут отличаться в большей степени, чем соответствующие поверхностные температуры сплошного диска. Существенно увеличится разница поверхностных температур в ободной части диска. Это приведет к повышению температурных напряжений в диске в направлении оси двигателя. Различное температурное состояние «переднего» и «заднего» полотен приведет к различным температурным расширениям, которые необходимо учитывать для сохранения рабочей лопатки в размерах проточной части без перекоса.

Исходя из вышеперечисленного, необходимо проводить оптимизацию диска для конкретной конструкции с учетом нестационарного температурного поля в процессе реализуемого эксплуатационного цикла.

3 Изготовление модельных пустотелых дисков

Для рассмотренных ранее способов создания пустотелых дисков, в том числе с применением АТ, разработаны техпроцессы и выпущена необходимая конструкторская документация. С целью упрощения диски спроектированы без замковых соединений, при этом для создания необходимой контурной нагрузки были предусмотрены имитаторы. На рисунке 8 показаны модельные диски, изготовленные различными способами.

В результате предварительных исследований по теме разработано два варианта конструктивных решений: с замкнутой полостью и кольцевой прорезью. Недостатком первого варианта является то, что замкнутую полость нельзя обработать. Наличие отверстий необходимо для проведения ГИП и выравнивания давления снаружи и внутри диска. Поэтому во всех вариантах предусмотрена кольцевая прорезь [9]. Для изготовления модельных дисков использован гранулируемый сплав ЭИ698П.

а) ГИП (заготовка) б) АТ в) сварка

Рисунок 8 - Модельные диски, изготовленные различными способами

Для различных вариантов изготовления дисков проведен анализ преимуществ и недостатков применения различных методов неразрушающего контроля [4].

4 Проведение испытаний

Для различных вариантов изготовления дисков проведены экспериментальные исследования как характеристик материала на образцах, так и статической прочности модельных дисков на разгонном стенде (рисунок 9). Одним из результатов исследований является демонстрация необходимости отработки режимов постобработки (термообработки и ГИП) на заготовках, произведенных методами АТ, а также учет направления выращивания. Результаты исследования образцов, выращенных методами АТ, а также изготовленных с помощью сварки приведены в [3, 4].

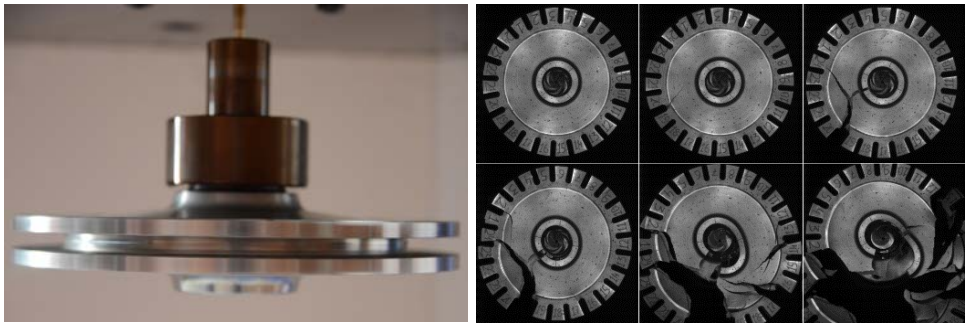


Рисунок 9 - Разгонные испытания модельного сварного диска

Проведённые разгонные испытания модельного сварного пустотелого диска подтвердили приемлемую статическую прочность сварного шва. Что касается модельного диска, изготовленного методами АТ, то несмотря на то, что испытания были остановлены до достижения заданного режима, была подтверждена несущая способность диска на частоте, соответствующей 89 % от разрушающей частоты (испытания были остановлены по причине, не связанной со спецификой АТ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показал, что внедрение пустотелой конструкции диска эффективно как для снижения массы, так и для увеличения циклической долговечности по сравнению со стандартной конфигурацией диска. При этом чем выше частота вращения диска и меньше его габаритные размеры, тем более целесообразно внедрение пустотелой конструкции: для диска больших размеров – снижение массы (до 4%), увеличение циклической долговечности до 15%, для диска средних размеров – снижение массы до 18%, увеличение циклической долговечности в 2 раза, для малоразмерного диска – снижение массы до 30% увеличение циклической долговечности в 2,8 раза.

Оптимальным способом изготовления пустотелых дисков, по мнению авторов статьи, является сварка. Направлениями дальнейших исследований являются проработка, в том числе экспериментальная прочности сварных швов на образцах и моделях, замковых соединений лопаток и дисков (или разработка блисковых конструкций) и проведение циклических испытаний дисков. Также, в связи с тем, что современные сертификационные требования

предусматривают подтверждение ресурса основных деталей двигателя с учётом возможного содержания дефектов, то в дальнейшем этому вопросу должно быть уделено специальное внимание.

Список литературы

1. Пат. 3982852 США, Bore vane assembly for use with turbine discs having bore entry cooling / Richsrd H. Andersen; Carl R. Dins & Co. № 528023; Заявлено 29.11.74; Опубл. 28.09.76. 6 с.
2. Пат. 4102603 США, Multiple section rotor disc / James Smith, Richard Paul Johnson № 640766; Заявлено 15.12.75; Опубл. 25.07.78. 7 с.
3. Васильев Б.Е., Исаков В.В., Семенов А.В. Сальников А.В. Изготовление пустотелых дисков турбин с использованием лазерной сварки // Вестник УГАТУ; Том 23 № 2 Вестник УГАТУ. 2019. С 3-9.
4. Vasilyev B. et al. Twin-web turbine discs: Part 2–fabrication and processing // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018, GT2018-76310. Oslo, Norway, 2018.
5. Сальников А.В., Васильев Б.Е., Семенов А.В., Шадрин Д.В. Разрезной пустотелый диск. Патент на полезную модель RU 177044, 06.02.2018. Заявка № 2017126552 от 25.07.2017.
6. Сальников А.В., Васильев Б.Е., Исаков В.В., Семенов А.В., Попов А.А. / Способ изготовления полого диска из жаропрочного сплава. Патент на изобретение RU 2704045, 23.10.2019. Заявка № 2019108300 от 22.03.2019.
7. Vasilyev B. et al. Twin-web turbine discs: Part 1–design and analysis of their efficiency // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018, GT2018-76306. Oslo, Norway, 2018.
8. Сальников А.В., Васильев Б.Е. Проектирование пустотелых дисков турбин и анализ эффективности их использования // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21, № 3. С. 40–46.
9. Магеррамова Л.А., Бабкин К.Д., Климова-Корсмик О.Г., Туричин Г.А. Способ изготовления полого диска газотурбинного двигателя. Патент на изобретение RU 2672989, 22.11.2018.
10. Магеррамова Л.А. Диск осевой турбомашины. Патент на полезную модель RU 182168, 06.08.2018.
11. Магеррамова Л.А. Способ изготовления диска осевой турбомашины. Патент на изобретение RU 2675735, 24.12.2018.
12. Магеррамова Л.А. Полый диск ротора турбины и способ его изготовления. Патент на изобретение RU 2682734, 21.03.2019.