

Запорожский национальный технический университет, АО «Мотор Сич»,
Национальный аэрокосмический университет им. Жуковского «ХАИ»

ВЕСТНИК **№ 1**
ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ **2016**

**издается
с 2002 г.**

НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Выходит два раза в год

Приказом Министерства образования и науки Украины № 1328 от 21.12.2015 г.
«Об утверждении решений Аттестационной коллегии Министерства относительно деятельности
специализированных ученых советов от 15 декабря 2015 года» **журнал включен в перечень научных
профессиональных изданий Украины**, в которых могут публиковаться результаты диссертационных
работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук

Запорожье
АО «Мотор Сич»
2016 г.

ISSN 1727-0219

Интернет-страница журнала: <http://journal.zntu.edu.ua/vd/index.php?page=index>

Статьи, которые публикуются в журнале, реферируются в базах данных та РЖ ВИНТИ (Россия) и «Джерело» (Украина). Журнал Вестник двигателестроения содержится в международной базе научных изданий INSPEC, Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>), электронная копия журнала размещена на сайте Национальной библиотеки Украины имени В.И. Вернадского НАН Украины в разделе «Наукова періодика України» по адресу: <http://nbuv.gov.ua/portal/>

Уважаемые авторы публикаций!

Журнал отражает достижения науки и техники предприятий и организаций Украины и зарубежных стран в области двигателестроения, публикует разработки ведущих специалистов и ученых, направленные на совершенствование производства и повышение качества продукции, а также статьи потенциальных соискателей ученых степеней и званий.

Статьи и сообщения будут формироваться по следующим рубрикам:

- Общие вопросы двигателестроения
- Конструкция и прочность
- Сборка и испытания
- Эксплуатация, надежность, ресурс
- Технология производства и ремонта
- Конструкционные материалы
- Стандартизация и метрология
- Экология

Шановні автори публікацій!

Журнал відображає досягнення науки і техніки підприємств та організацій України і зарубіжних країн в галузі двигунобудування, публікує розробки провідних спеціалістів та вчених, спрямовані на вдосконалення і підвищення якості продукції, а також статті потенціальних здобувачів степенів і звань.

Статті та повідомлення будуть формуватися за наступними рубриками:

- Загальні питання двигунобудування
- Конструкція і міцність
- Складання і випробування
- Експлуатація, надійність та ресурс
- Технологія виробництва і ремонту
- Конструкційні матеріали
- Стандартизація і метрологія
- Екологія

To the attention of authors!

The journal presents the achievements in the field of science and technique of Ukrainian enterprises, scientific institutions and foreign countries working at aircraft engineering. The journal publishes developments of leading specialists, scientists and the articles of potential applicants for scientific degrees aimed at perfection of the production and improvement of the quality.

The journal covers the subjects of:

- Aircraft engineering
- Structures and strength
- Assembling and trials
- Operation, reliability, service life
- Technology of production and maintenance
- Structural materials
- Standartization and metrology
- Ecology

Матеріали номера рекомендовані к публікації Ученим Советом Запорозького національного технічного університету (протокол № 1 от 21 марта 2016 г.).

Главный редактор:

д-р техн. наук, профессор **А. Я. Качан**

Заместитель главного редактора:

д-р техн. наук, профессор **А. И. Долматов**

Члены редакционной коллегии:

д-р техн. наук В. А. Богуслаев
д-р техн. наук С. Б. Беликов
д-р техн. наук В. С. Кривцов
д-р техн. наук Ю. Н. Внуков
д-р техн. наук Э. И. Цивирко
д-р техн. наук Л. И. Ившенко
канд. техн. наук П. Д. Жеманюк
д-р техн. наук Г. А. Кривов
д-р техн. наук В. А. Титов
д-р техн. наук Ю. А. Ножницкий
д-р техн. наук Б. С. Карпинос
д-р техн. наук А. П. Зиньковский

д-р техн. наук А. Я. Мовшович
д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий
д-р техн. наук Г. А. Горбенко
д-р техн. наук С. В. Епифанов
д-р техн. наук Н. С. Кулик
д-р техн. наук С. А. Дмитриев
д-р техн. наук Н. Ф. Дмитриченко
д-р техн. наук А. Р. Лепешкин
д-р техн. наук Ю. В. Петраков
д-р техн. наук М. В. Киндрачук
канд. техн. наук В. Ф. Мозговой
канд. техн. наук А. В. Богуслаев
канд. техн. наук А. В. Шереметьев

Редакторско-издательский совет: В. А. Богуслаев, С. Б. Беликов, В. С. Кривцов, Н. А. Савчук, А. А. Баранник

© ЗНТУ, 2016

© НАУ им. Жуковского «ХАИ», 2016

© АО «Мотор Сич», 2016

Члены редакционной коллегии



Качан А.Я.
Гл. редактор,
д-р техн. наук



Долматов А.И.
Зам. гл. редактора,
д-р техн. наук



Богуслаев В.А.
д-р техн. наук



Беликов С.Б.
д-р техн. наук



Кривцов В.С.
д-р техн. наук



Жеманюк П.Д.
канд. техн. наук



Внуков Ю.Н.
д-р техн. наук



Кривов Г.А.
д-р техн. наук



Цвирко Э.И.
д-р техн. наук



Ившенко Л.И.
д-р техн. наук



Зильковский А.П.
д-р техн. наук



Карпинос Б.С.
д-р техн. наук



Ножницкий Ю.А.
д-р техн. наук



Дмитриченко Н.Ф.
д-р техн. наук



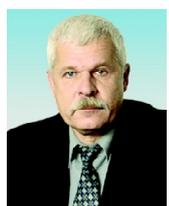
Мовшович А.Я.
д-р техн. наук



Ольшанецкий В.Е.
д-р техн. наук



Титов В.А.
д-р техн. наук



Петраков Ю.В.
д-р техн. наук



Киндрачук М.В.
д-р техн. наук



Епифанов С.В.
д-р техн. наук



Кулик Н.С.
д-р техн. наук



Дмитриев С.А.
д-р техн. наук



Лепёшкин А.Р.
д-р техн. наук



Горбенко Г.А.
д-р техн. наук



Богуслаев А.В.
канд. техн. наук



Мозговой В.Ф.
канд. техн. наук



Шереметьев А.В.
канд. техн. наук

Для сведения авторов

Условия публикации:

Научно-технические и производственные статьи, планируемые к опубликованию в нашем издании, утверждаются на редакционной коллегии. При положительных заключениях материалы помещаются в «портфель» редакции в очередь на опубликование. Процедура рецензирования-утверждения занимает срок от 1 до 3 месяцев. Статьи, прошедшие данную процедуру и размещенные в журнале в порядке очереди, публикуются бесплатно.

Требования к оформлению материалов для журнала «Вестник двигателестроения»

- К рассмотрению принимаются научные статьи, содержащие такие необходимые элементы: постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными или практическими задачами; анализ последних исследований и публикаций, в которых имеются предпосылки решения данной проблемы и на которые опирается автор, выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья; формулирование целей статьи (постановка задания); изложение основного материала исследования с полным обоснованием результатов; выводы из данного исследования и перспективы дальнейших разработок в данном направлении.
- Рукопись статьи присылается в редакцию в двух экземплярах вместе с актом экспертизы и справкой об авторах. Объем текстовой части статьи 3–6 листов. Рабочие языки: украинский, русский, английский. Последовательность размещения материала статьи: индекс УДК; инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация, ключевые слова на трех языках: украинском, русском и английском; полное название учреждения, в котором работают авторы; текст статьи (с подписями авторов на последней странице); перечень литературы; таблицы; рисунки.
- В статье нужно четко и последовательно изложить то новое и оригинальное, что получено авторами в результате исследований. Не следует приводить известные факты, повторять содержание таблиц и иллюстраций в тексте. Термины и обозначения технических параметров следует употреблять в соответствии с нормами Госстандарта, а единицы измерения – в международной системе единиц (СИ). В статье должны быть выделены следующие разделы: вступление, методика (исследований), результаты, обсуждение, выводы.
- Набор текста статьи следует выполнять с помощью текстового редактора Microsoft Word 97 или 2000 (в соответствии с ДСТУ 3008–95). Формат листа – А4, ориентация – книжная, поля – 20 мм со всех сторон. Шрифт: гарнитура Times New Roman, размер 12 пт; интервал – 1,5; выравнивание по ширине. Текст с ручным переносом не принимается!
- Для набора формул надо использовать редактор Microsoft Equation версии 2 или 3. Размер букв: обычный – 12 пт, крупный индекс – 10 пт, мелкий индекс – 8 пт, крупный символ – 16 пт, мелкий символ – 12 пт.
- Иллюстрации (чертежи) могут быть подготовлены с помощью любых графических редакторов и переданы в виде отдельных графических файлов изображения. Для графиков и чертежей (двухбитных файлов) плотность изображения должна составлять 300 dpi (формат TIF), для фотографий – 200–240 dpi (формат JPG, EPS, BMP). Не допускается вставка рисунков в файл статьи непосредственно из прикладных программ (AutoCAD, Excel и т.п.), минуя графический формат. Для четкого воспроизведения изображения при печати толщина линий не должна быть меньше, чем 0,1 мм. Наличие подрисовочной надписи обязательно. При наличии дополнительных обозначений, или нескольких изображений, их объясняют в подрисовочной надписи.
- Таблицы должны содержать только необходимую информацию, быть лаконичными и максимально понятными. Возле обозначений параметра необходимо указать его размерность. Размер шрифта таблицы должен составлять 10 пт. Ширина таблицы не должна превышать 80 мм (размер колонки). В отдельных случаях разрешается делать таблицы шириной 170 мм.
- Перечень литературы в конце рукописи на языке оригинала приводится в соответствии с последовательной ссылкой на работы в тексте и требованиями действующих норм. Ссылка на литературу в тексте нумеруется арабскими цифрами в прямых скобках.
- В справке об авторах нужно привести фамилии, имена и отчества всех авторов, их служебные и домашние адреса, должности, ученые степени, номера телефонов, электронные адреса. Авторами считаются лица, которые принимали участие в выполнении работы в целом или ее главных разделов.

Статьи направляются в редакцию по адресу:

69063, Украина, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64
Запорожский национальный технический университет,
зам. главного редактора Качану Алексею Яковлевичу
Электронный вариант статьи можно передать по адресу:
vd@zntu.edu.ua (максимальный объем письма 2 Мбайта).

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

- Лоскутов С.В., Еришов А.В., Зеленина Е.А.*
ОЦЕНКА КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СЦЕПЛЕНИИ ЧАСТИЦЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОДЛОЖКИ 7
- Катренко М.А., Панченко А.А.*
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСХОДА ВОДЫ В КОМБИНИРОВАННОМ ГИДРОРЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПОДАЧЕЙ ВОДЫ В ЗАКРИТИЧЕСКУЮ ЧАСТЬ СОПЛА 13
- Гараненко Т.Р., Прибора Т.И., Березовский Е.К.*
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОХОРДНЫХ ПОЛЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА 18
- Шамровський О.Д., Богданова Є.М.*
МЕТОД ПОСЛІДОВНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНТАКТНИХ ЗАДАЧ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ 24

КОНСТРУКЦИЯ И ПРОЧНОСТЬ

- Mastinovsky Yu. V.*
THERMO-ELASTIC WAVES IN TWO-LAYER STRIP COMPOSED OF DIFFERENT MATERIALS 29
- Моргун С.А.*
ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ НА ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН 32
- Івценко Л.Й., Крестьяніков О.І., Прибора Т.І.*
ХАРАКТЕР ПЕРЕМІЩЕННЯ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ Z-ПОДІБНИХ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ ЛОПАТОК ГТД 37

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА

- Павленко Д.В., Двирник Я.В.*
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОЙ АТМОСФЕРЫ 42
- Качан А.Я., Уланов С.А.*
КОНТАКТНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ГТД И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ БЕСПРИЖОГОВОЙ ОБРАБОТКИ 52
- Павленко Д.В., Овчинников А.В.*
УПЛОТНЕНИЕ СПЕЧЕННЫХ ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ 58
- Качан А.Я., Уланов С.А.*
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ПОЛЫХ ВАЛОВ ГТД НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ 63
- Дядя С.И., Козлова Е.Б., Кондратюк Э.В., Кришталь В.А., Зубарев А.Е.*
СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ 68

Белоконь Ю.А., Павленко Д.В., Пахолка С.Н.
ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СИНТЕЗА 72

Мозговой В.Ф., Березовский Е.К., Панасенко В.А.
ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ШИРОКОХОРДНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ЛОПАТКИ ТРДД НА
ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ 81

Пухальская Г.В., Марков И.Б.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В РАЗЛИЧНЫХ ЗОНАХ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1 89

Маковский С.Г., Лукинов В.В., Цивирко Э.И., Шаломеев В.А.
НАНОТЕХНОЛОГИЯ В ПОВЫШЕНИИ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ 92

Мионов А.Н., Потан О.Е., Тригуб И.Г.
МЕТОД НЕПРЯМОЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ НАТЯЖЕНИЯ ПРОКАТА В ОДНОНИТОЧНОЙ
ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО МЕЛКОСОРТНОГО СТАНА 96

Бабенко О.Н., Прибора Т.И.
МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК
КОМПРЕССОРА ГТД 101

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гайдук С.В., Кононов В.В.
РАСЧЕТ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЛИТЕЙНОГО СВАРИВАЕМОГО ЖАРОПРОЧНОГО
КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ CALPHAD 107

Белоус В.А., Ермоленко И.Г., Заднепровский Ю.А., Ломино Н.С.
ОСАЖДЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ MoN- ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АЗОТИРОВАНИЯ ОСНОВЫ 113

Калинина Н.Е., Джур Е.А., Калинин В.Т., Носова Т.В., Кащенко А.В.
ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 118

Иванов В.Г.
РОЗПОДІЛ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СТРУКТУРІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ДЛЯ
МАСЛОТНИХ ЗАГОТОВОК ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ 121

Нетребко В.В.
ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ НА ТВЕРДОСТЬ Cr-Mn-Ni ЧУГУНОВ 129

УДК 628.438:519.9

Т. Р. Гараненко¹, Т. И. Прибора², Е. К. Березовский²¹Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев²Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОХОРДНЫХ ПОЛЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА

Рассмотрены особенности создания широкохордных полых лопаток вентилятора АД. Проведенные статический и модальный анализы различных вариантов рабочих лопаток вентилятора позволили определить их напряженно-деформированное состояние (НДС), форму и частоты собственных колебаний, что обеспечивает создание реальной физической модели полых рабочих лопатки вентилятора.

Ключевые слова: лопатка вентилятора, титановый сплав, статический анализ, динамический анализ, гофра, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Современные авиационные ГТД должны обладать высокой надежностью в эксплуатации.

Одним из требований, предъявляемых к ГТД, является снижение веса деталей, в частности, рабочих лопаток. Этим достигается снижение напряженности в дисках, основных деталях ГТД. Требование снижения веса возможно обеспечить за счет изготовления рабочих лопаток из новых сплавов на основе титана (в частности, алюминиды титана), вместо стали. При достаточной прочности, данные материалы дают значительное снижение веса.

Другие направления — изготовление полых лопаток вентилятора и из композиционных материалов.

В данной работе представлены численные исследования полых рабочих лопатки вентилятора.

Формулирование проблемы

Численные исследования стали возможны в результате использования современных средств вычислительной техники, внедрения численных методов, в том числе метода конечных элементов.

Расчетный комплекс ANSYS с использованием математических моделей высокого уровня, дает наглядное представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) объекта исследования, в нашем случае, широкохордной полых рабочей лопатки вентилятора.

В ряде опубликованных статей [1, 2] проводилась численная оценка напряженно-деформированного состояния полых вентиляторной лопатки с двойной выпуклостью и без закрутки сечений по радиусу. Надо отметить, это сильно

упрощает создание математической модели и позволяет проводить сравнительный анализ влияния на напряженность конструкции внутренней гофры.

Решение проблемы

Для проведения сравнительного анализа в начале рассчитывалась модель вентиляторной лопатки конкретного профиля, находящегося в летной эксплуатации.

Полученные результаты были приняты в качестве критерия при проведении дальнейшего численного моделирования (рис. 1).

Материал вентиляторной лопатки — титановый сплав ВТ6.

При генерации конечно-элементной сетки использовался элемент 2-ого порядка Solid186.

Хвостовую часть лопатки из математической модели исключили, для упрощения. Граничные условия в виде закрепления прикладывали на корневом сечении пера. В перспективе, при отладке конечно-элементной полых модели пера лопатки, в качестве нагрузок можно рассматривать рабочее давление на перо, рабочую частоту вращения и рабочее температурное поле.

Результаты расчета по определению напряженно-деформированного состояния пера исходной сплошной лопатки представлены распределением радиальных перемещений (рис. 2), радиальных напряжений (рис. 3) и эквивалентных напряжений (рис. 4).



Рис. 1. Конечно-элементная модель пера рабочей лопатки

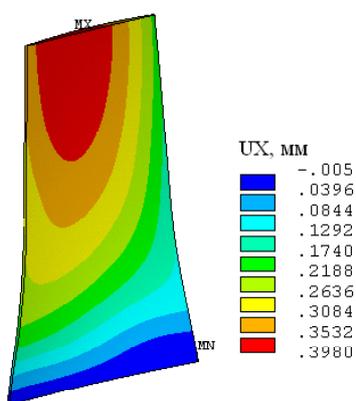


Рис. 2. Радиальные перемещения пера рабочей лопатки вентилятора

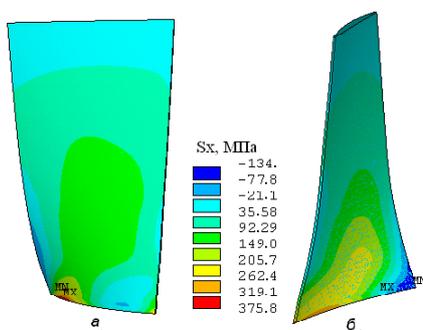


Рис. 3. Радиальные напряжения пера рабочей лопатки вентилятора (а – спинка, б – корыто)

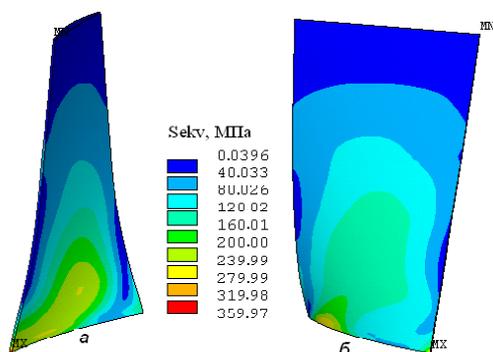


Рис. 4. Эквивалентные напряжения пера рабочей лопатки вентилятора (а – корыто, б – спинка)

Модель полой широкохордной рабочей лопатки вентилятора

Переход к моделированию полой лопатки осуществлен согласно разработанной технологии. Спинка и корыто пера соответствуют действующей лопатке. Организованы объемы и сгенерирована конечно-элементная сетка элементом SOLID186, с той же густотой разбивки, как и в работающей лопатке. На рис. 5 приведены объемы модели полой лопатки, на рис. 6 – конечно-элементная сетка данной модели.

Наполнитель, «гофра», максимально приближен по геометрии к профилю пера. Объем «гофры» разделен на простейшие объемы для облегчения генерации конечно-элементной сетки. Трудности при генерации сетки возникли из-за сильной закрученности пера лопатки по высоте и уменьшению толщины лопатки с увеличением радиуса сечения лопатки. Качество сетки влияет на результаты расчета.

Вторая проблема создания конечно-элементной модели полого пера с «гофрой» – это обеспечение совместной работы корпуса пера и «гофры». На практике совместная работа корпуса и «гофры» обеспечивается контактной точечной сваркой. На примере численного эксперимента, то есть расчета математической модели, можно сказать, что этим операциям (точной сварки и последующим технологическим операциям), обеспечивающим общность обшивки и наполнителя, необходимо уделять повышенное внимание. Иначе некоторые составляющие конструкции работают самостоятельно, что недопустимо. Как моделированием, так и реальными технологическими процессами обеспечить идеальную общность конструкции сложно.

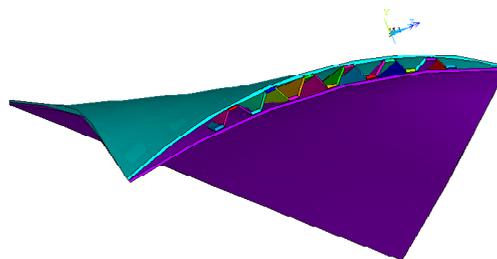


Рис. 5. Модель полого пера рабочей лопатки вентилятора, объемы

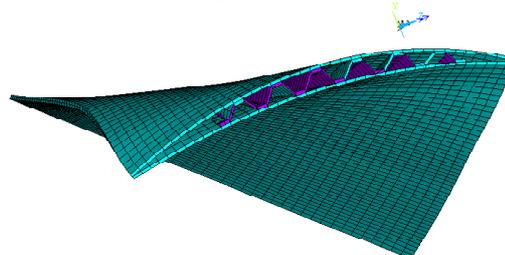


Рис. 6. Модель полого пера рабочей лопатки вентилятора, конечно-элементная сетка

Расчет модели пера с наполнителем – «гофрой» показал, что в данном случае выполненное численное моделирование несовершенно и требует значительной доработки, как и технологический процесс по изготовлению физической модели для эксперимента связан с реальными трудностями. Для оценки уровня деформаций и напряжений было принято решение перейти к формированию плоской полой модели с «гофрой».

Математическая модель плоского полого пера рабочей лопатки вентилятора

Создана математическая модель плоской полой лопатки с «гофрой». Размеры модели соответствуют чертежам детали для изготовления с последующим исследованием (рис. 7).

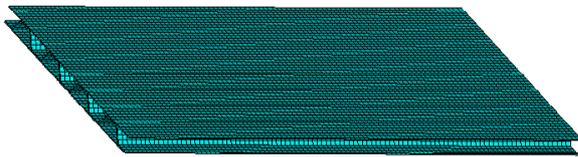


Рис. 7. Модель полого плоского пера лопатки вентилятора с конечно-элементной сеткой

Данная модель значительно проще в численном исполнении и в практическом реальном исполнении.

Модель выполняется из титанового листа, размерами 290×158 мм. Высота «гофры» принята равной средней толщине реальной лопатки вентилятора.

Толщина листа 0,6 мм. В математической модели выполнена условно точечная сварка «гофры» и листа. Качество сварки на реальной модели требует особого внимания и тщательного исполнения. Расчетная модель показана на рис. 8.

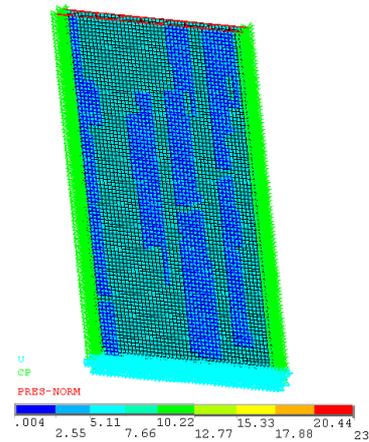


Рис. 8. Расчетная модель полого плоского пера

По нижней кромке модели (корневое сечение лопатки) организовано закрепление модели по всем направлениям, имитируя закрепление реальной модели в зажиме. По верхней кромке, соответствующей периферийному сечению лопатки, приложена контурная нагрузка растяжения ($\sigma_{\text{конт}} = 230 \text{ МПа}$). Данная нагрузка воспроизводит действующую центробежную силу в поле вращения лопатки с частотой $n = 6020 \text{ об/мин}$. На площадь, соответствующую корыту лопатки, приложено распределенное давление от воздействия воздушного потока. Поле давления соответствует реальной рабочей лопатке вентилятора (0,004...0,014 МПа).

Для оценки НДС модели в перспективной экспериментально-исследовательской установке выполнены статический и динамический анализ математической модели программным расчетным комплексом ANSYS .

Результаты статического анализа представлены в виде распределения перемещений, радиальных, изгибных, касательных (от кручения) и эквивалентных напряжений (рис. 9–12).

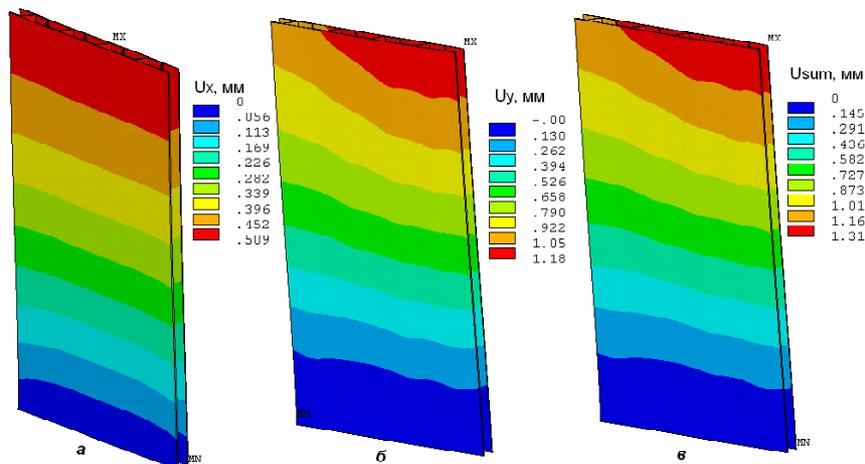


Рис. 9. Распределение радиальных (а), осевых (б) и суммарных перемещений (в) пера полой плоской модели с «гофрой»

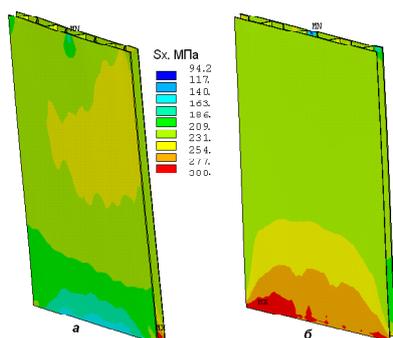


Рис. 10. Распределение радиальных напряжений пера полой плоской модели с «гофрой», где: *a* – спинка модели пера, *б* – корыто модели пера с приложенным давлением по поверхности

Несимметричность распределения напряжений на «корыте» и «спинке» модели плоской лопатки можно объяснить различной жесткостью пластин, полученной от несимметричного взаимодействия пластин с «гофрой».

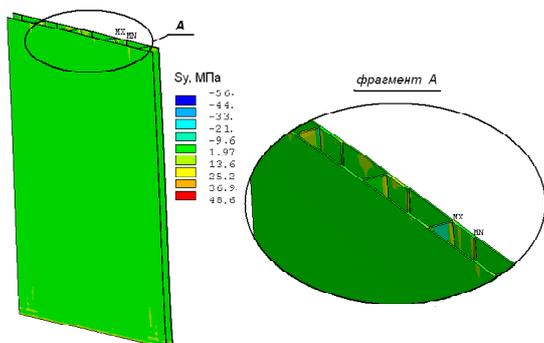


Рис. 11. Распределение осевых напряжений пера полой плоской модели с «гофрой»

Величины осевых напряжений незначительны, – как следствие приложенного на поверхность корыта давления. Можно заметить, что изгиб воспринимает «гофра», тогда как пластины корыта и спинки не нагружены.

Касательные напряжения от кручения вследствие неравномерного давления на перо, и эквивалентные напряжения показаны на рис. 12, 13.

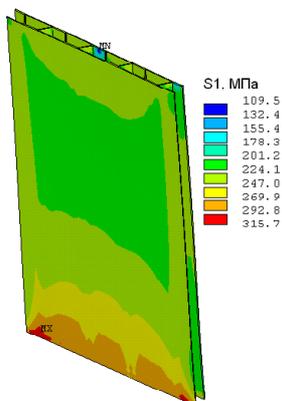


Рис. 12. Касательные напряжения пера полой плоской модели

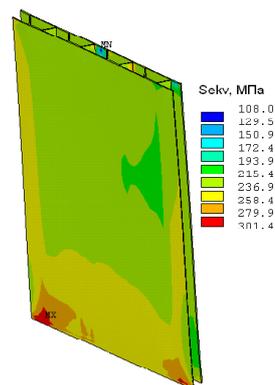


Рис. 13. Эквивалентные напряжения пера полой плоской модели

Уровень напряжений в модели плоской полой лопатки от приложенных нагрузок невысокий, ниже, чем в сплошной работающей лопатке (см. рис.14).

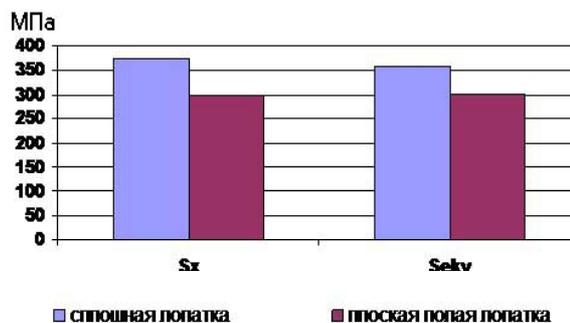


Рис. 14. Сравнительный анализ уровня напряжений исходной и полой плоской лопаток

Математическое моделирование дает возможность визуально оценить прогнозируемое напряженно-деформированное состояние «гофры» (рис. 15).

Выполненный модальный анализ модели пера полой плоской лопатки определил формы и частоты собственных колебаний (рис. 16).

Для сравнения приводим частоты и формы собственных колебаний сплошной лопатки вентилятора (рис. 17).

Модальный анализ показывает, что у пера полой плоской модели лопатки вентилятора частоты 3-х первых форм собственных колебаний значительно выше, чем у пера исходной сплошной лопатки вентилятора.

На графике (рис. 18) представлена резонансная диаграмма для пера сплошной лопатки вентилятора и плоской полой модели лопатки вентилятора.

Анализ резонансной диаграммы показывает, что частоты первых трех форм свободных колебаний плоской полой лопатки выше, чем соответствующие частоты первых трех форм колебаний фрагмента сплошной лопатки.

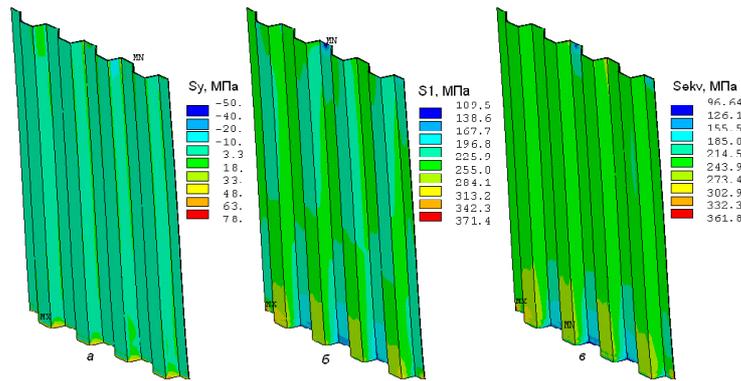


Рис. 15. Осевые (а), касательные (б) и эквивалентные напряжения (в) в наполнителе пера полой плоской модели, в «гофре»

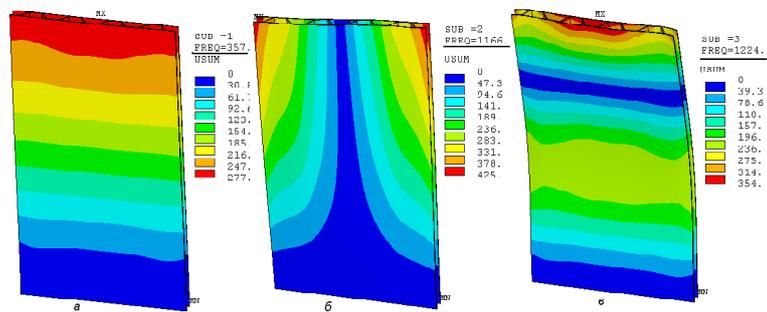


Рис. 16. Три первые формы и частоты собственных колебаний плоской полой лопадки вентилятора (а – 1-я изгибная, б – 1-я крутильная, в – 2-я изгибная)

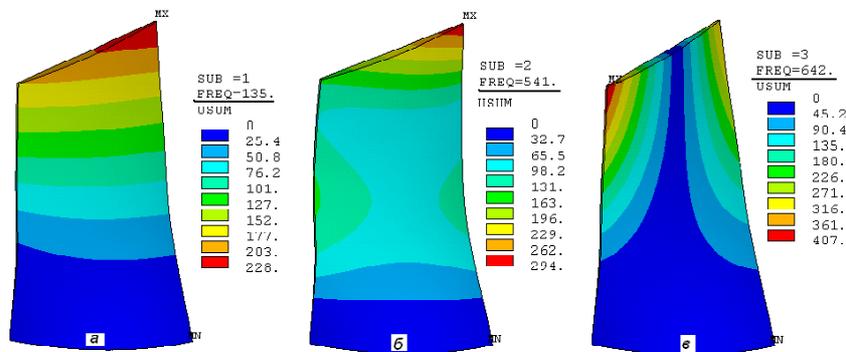


Рис. 17. Три первые формы и частоты собственных колебаний сплошной лопадки вентилятора (а – 1-я изгибная, б – 2-я изгибная; в – 1-я крутильная)

Резонанс по первой форме колебаний фрагмента сплошной лопадки происходит от 2-й гармоники на низких частотах оборотов (≈ 4000 об/мин), тогда как полая плоская лопадка имеет 2 резонанса по первой форме колебаний от 4-й и 5-й гармоник, практически в рабочем диапазоне частот вращения.

Фрагмент сплошной лопадки имеет резонансы по второй форме колебаний от 6-й, 7-й и 8-й гармоник в рабочем диапазоне частот вращения, а полая плоская лопадка имеет резонансы по 2-й и 3-й формам колебаний от 12...16-й гармоник.

Наблюдается необходимость проведения натурального исследования с тензометрированием.

Создание математической модели и проведение численного исследования модели пера полой плоской вентиляторной лопадки показали, что создание реальной физической модели и проведение экспериментов возможны. Численное исследование можно продолжить при наличии материальной базы натуральных исследований. Тогда с опережением возможно прогнозирование результатов при проведении исследований с натурным объектом.

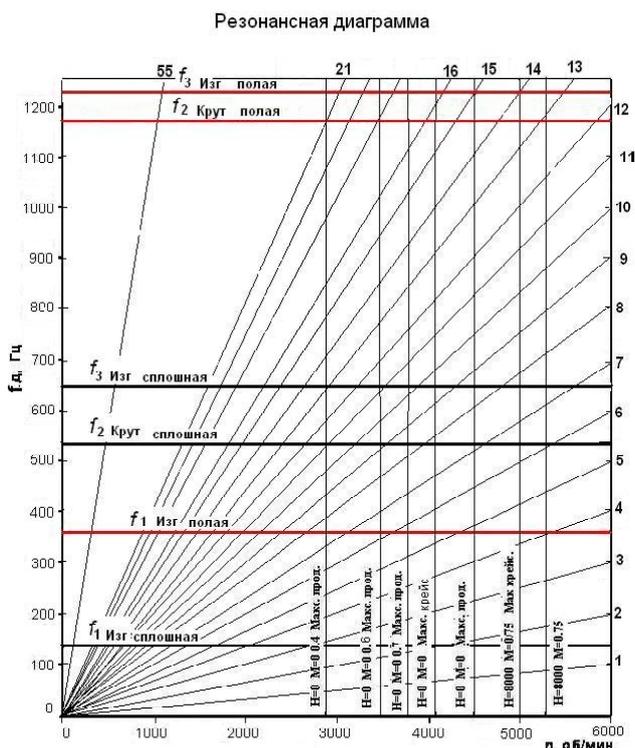


Рис. 18. Диаграмма Кемпбелла фрагмента сплошной вентиляторной лопадки и модели полой плоской лопадки вентилятора

Выводы

Проведено математическое моделирование полого пера с наполнителем лопадки вентилятора. Выявлены возможные проблемы при проведении данного численного эксперимента. Разработаны пути решения предполагаемых и имеющихся проблем.

Определены НДС, формы и частоты собственных колебаний моделей полых рабочих лопадок вентилятора.

Создание физической модели и проведение испытаний укажет пути внесения корректив в разработанную математическую модель полой лопадки вентилятора.

Список литературы

1. Кайбышев О.А. Численный анализ вариантов конструкции пустотелой вентиляторной лопадки / [О. А. Кайбышев, А. К. Галимов, А. А. Круглов и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2004. — № 1. — С. 90–95.
2. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в полых лопадках вентилятора с повреждениями / М. Ш. Нихамкин, О. Л. Любчик // Вестник ПНИПУ, Аэрокосмическая техника. — 2012. — № 32. — С. 25–35.

Поступила в редакцию 02.02.2016

Гараненко Т.Р., Прибора Т.І., Березовський Є.К. Математичне моделювання широкохордних порожнистих робочих лопадок вентилятора

Розглянуті особливості створення широкохордних порожнистих лопадок вентилятора АД. Проведені статичний і модальний аналізи різних варіантів робочих лопадок вентилятора дозволили визначити їх напружено-деформований стан (НДС), форму і частоти власних коливань, що забезпечує створення реальної фізичної моделі порожнистої робочої лопадки вентилятора.

Ключові слова: лопадка вентилятора, титановий сплав, статичний аналіз, динамічний аналіз, гофра, напружено-деформований стан.

Garanenko T., Pribora T., Berezovskii E. Mathematical design of wide hollow working shoulder-blades of ventilator

The features of creation of wide hollow shoulder-blades of ventilator are considered AE. Conducted static and modal the analyses of different variants of working shoulder-blades of ventilator allowed to define their tensely-deformed state (TDS), form and frequencies of eigentones, that provides creation of the real physical model of hollow working shoulder-blade of ventilator.

Key words: shoulder-blade of ventilator, titanic alloy, static analysis, dynamic analysis, flute, tensely-deformed state.