

УДК 629.7:104.942:68

Ноженко Д. С. инженер–конструктор ОПРИ ГП «Ивченко–Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: nozhenkods@gmail.com;
Прибора Т. И. старший преподаватель кафедры ТАД Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: somovatat@meta.ua

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РОТОРАХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГТД

Цель работы. Изучение дополнительных возможностей учета болтовых соединений при расчетах роторов авиационных двигателей (АД) численным методом, а именно, методом конечных элементов (МКЭ).

Методы исследования. Математическое моделирование на основе МКЭ в нелинейной 2D- и 3D-постановках. Аналитический метод оценки объекта исследования предшествует математическому моделированию. Результаты численного решения проходят сравнительный анализ с результатами состояния объектов после эксплуатации.

Полученные результаты. Результаты проведенных численных исследований с расширением граничных условий математических моделей роторов АД, с целью реального учета наличия болтовых пакетов, позволили наиболее точно определять напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей, работающих совместно. Подобные расчеты не отрицают предшествующий им аналитический метод оценки прочности входящих в болтовой пакет деталей. Использование новых возможностей расчетного комплекса ANSYS максимально уточняет расчетную информацию о НДС деталей болтового пакета, визуализирует особенности совместной работы, выявляет слабые стороны конструкции и дает возможность практического исследования конструкции (тензометрирования).

Научная новизна. Реализация новых возможностей расчетного комплекса ANSYS при оценке НДС деталей болтового пакета с заданием силы затяжки болта. Создаются элементы Pretension, узлы которого воспринимают силу затяжки. В результате можно анализировать состояние болта под действием нагрузок, состояние стягиваемых болтом деталей. Есть возможность изучать влияние силы затяжки болта на НДС болта и деталей пакета.

Практическая ценность. Проведенные работы по организации прочностных расчетов элементов роторов АД с использованием элементов Pretension подтвердили эффективность новых возможностей расчетного комплекса ANSYS, для получения более полной и достоверной картины НДС исследуемых роторов.

Ключевые слова: сварной ротор компрессора; критическая зона; резьбовые детали; контактные пары.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование роторов компрессоров отечественных авиационных газотурбинных двигателей имеет одну особенность, которая в настоящее время не имеет рационального решения.

Определение конструкции роторов компрессоров, в частности, зависит от наличия у проектирующей организации необходимой базы материалов.

Конструкции роторов компрессоров, с начала проектирования ГТД, менялись в зависимости от опыта и квалификации разработчиков, от наличия в руках конструкторов прогрессивных графических и расчетных программ [1], [2], от наличия парка станков, способных реализовать творческие мысли проектанта. И наконец, конструкция роторов напрямую зависела от наличия авиационных материалов, сплавов, которые обладали необходимыми прочностными свойствами, имели достаточный уровень жаропрочности, были легкими и, конечно же, были свариваемыми.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Результатом проектирования нового авиационного двигателя ожидается получить совершенный конструктивно, прочный, надежный и ресурсный двигатель. Для получения требуемого результата востребована совокупность таланта и профессионализма конструктора, высокой квалификации расчетчика и наличия современных расчетных комплексов, типа ANSYS [3], [4], [5].

Расчетный комплекс ANSYS уже ни одно десятилетие служит для выполнения прочностных расчетов деталей и узлов АД с целью создания оптимально прочных конструктивных элементов с высокой степенью обеспечения надежного заданного ресурса [6],

Возможности данного расчетного комплекса постоянно расширяются дополнительными разработками. Проведено исследование новых возможностей расчетного комплекса ANSYS при

оценке НДС деталей болтового пакета с заданием силы затяжки болта. Создаются элементы Pretension, узлы которого воспринимают силу затяжки.

Публикаций по результатам решения подобных задач с использованием возможностей комплекса ANSYS последние два года не встречали.

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является освоение дополнительных возможностей учета болтовых соединений при расчетах роторов АД численным методом, а именно, методом конечных элементов (МКЭ).

Диски роторов являются ответственными деталями конструкции и имеют ряд «критических зон», определяющих ресурс дисков. Наличие болтовых соединений предполагает увеличение числа «критических зон», требующих доскональной прочностной и ресурсной оценки [7].

3 РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

До актуализации титановых сплавов, диски компрессора изготавливались из стали. Двигатель АИ-20 имеет именно такой компрессор, состоящий из 9-ти стальных дисков (ДИ1-Ш), сплошных, т.е. без центрального отверстия.

Диски собираются в ротор посадкой с натягом и фиксацией штифтами.

В следующем поколении проектирования двигателя АИ-25 уже используются титановые сплавы; легкие, прочные. Ротор КВД собирается из 8-ми титановых дисков, которые стягиваются болтами.

И уже в двигателе ТВ3-117ВМА-СБМ1 ротор компрессора сварной из титановых дисков, двенадцать ступеней (титановый сплав ВТ8).

В семействе двигателей Д-36 уверенно занимают свои позиции титановые сварные ротора. Но, к сожалению, отечественное авиадвигателестроение не имеет рабочего жаропрочного титанового сплава с диапазоном рабочих температур до 600 °С.

Этим объясняется, что в данном и в последующих семействах двигателей с большой тягой, в компрессорах высокого давления сварные титановые барабаны включают 4–5 ступеней, до рабочей температуры 450°...500°С.

Последующие 5, 6, 7 ступени приходится проектировать на условие использования жаропрочных никелевых сплавов, обеспечивающих надежную работу рабочих колес до температуры 750°С. Это приводит к увеличению массы конструкции.

Диски из жаропрочного никелевого сплава приходится проектировать и изготавливать под болтовое соединение в ротор. Работающего жа-

ропрочного никелевого сплава, обладающего свариваемостью, пока нет.

Наличие болтового соединения дисков в ротор привносит ряд серьезных недостатков в конструкцию:

- увеличивается номенклатурный список деталей (болты, гайки, контровки), которые, кроме увеличения веса ротора, несут в себе определенную долю риска брака, дефектов;

- фланцы дисков, собранные в пакет болтами, имеют чаще в верхней части дисков усиления под стяжку и отверстия под болты. Отверстия под болты представляют собой серьезную концентрацию напряжений, то есть данная область дисков попадает в определение «критической зоны», определяющей ресурс.

Резьбовые детали, разрушение которых вызывает особо опасные последствия раскрытия стыка в роторе двигателя (стяжные болты компрессоров и турбин; болты, стягивающие диски компрессоров, турбин), относятся к группе наиболее ответственных резьбовых соединений. Ответственные резьбовые соединения должны работать только на растяжение [8]. Условие нераскрытия стыка является необходимым для обеспечения требуемой прочности резьбового соединения:

$$\sigma_{3 \min} \geq \sigma_p(1 - \chi),$$

где $\sigma_{3 \min} = \frac{Q_{3 \min}}{F_o}$ – минимальное напряжение предварительной затяжки;

$Q_{3 \min}$ – минимальное усилие затяжки;

F_o – площадь поперечного сечения стержня болта;

$\sigma_p = \frac{P}{F_o}$ – номинальное напряжение от наи-

большей внешней растягивающей нагрузки P , возникающее в стержне болта при работе соединения;

χ – коэффициент основной нагрузки, принимаемый в первом приближении $\chi = 0,2...0,4$.

Аналитический расчет резьбовых соединений позволяет определить напряжения и запасы прочности резьбовых деталей, полное усилие, действующее на болт, возникающие напряжения и запасы прочности в рабочих условиях.

При всех упомянутых особенностях проектирования, следует заметить, что болтовое соединение деталей обеспечивает доступную взаимозаменяемость дисков в роторе.

Что касается сварного ротора, то недостатком его является именно ремонт ротора, замена по-

врежденных дисков. Этот вопрос успешно решается при наличии высокотехнологичных сварных операций.

В настоящее время оценка прочности узлов ГТД осуществляется кроме аналитических методов, численным, а именно методом конечных элементов расчетного комплекса ANSYS [9].

На рис. 1, 2 представлены две математические модели компрессорных роторов, которые собраны из рабочих колес с использованием стяжных болтов.

Расчет ротора компрессора в 2D - постановке выполняется с целью определения напряженно-деформированного состояния под действием совокупных нагрузок [10]. В данных моделях взаимодействие сопрягаемых деталей в болтовом стыке задано:

- одинаковым перемещением в заданных направлениях, с использованием сервиса «coupling» (рис. 1);
- моделированием контактных пар, обеспеченных суммарной силой затяжки (рис. 2).

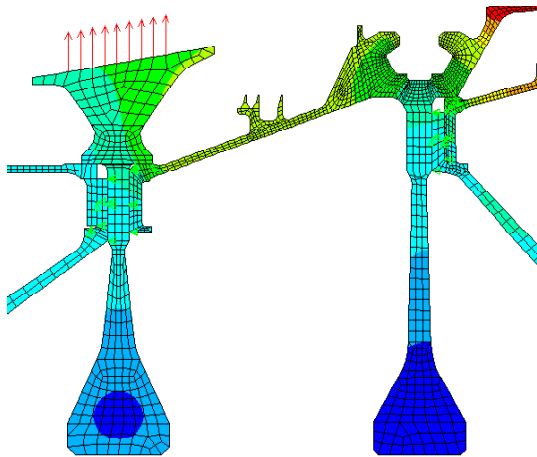


Рисунок 1. Фрагмент ротора с использованием «coupling»

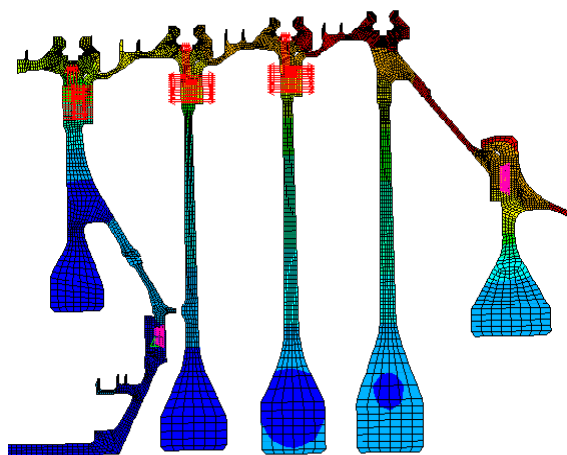


Рисунок 2. Фрагмент ротора с контактным взаимодействием, обеспеченным силой затяжки

Использование модели контактного взаимодействия дает более достоверную картину работы пакета болтового соединения, чем использование «coupling» [11].

Следующим этапом учета влияния болтовых соединений в роторе является использование методики создания напряжения затяжки в конструктивных соединительных элементах, моделируемых элементами твердого деформируемого тела (тип SOLID).

Создаются элементы Pretension, узлы которого воспринимают силу затяжки.

При этом организуется контактное взаимодействие опорных поверхностей.

На рис. 3 представлена 2D- модель фланцевого соединения ротора КВД. В данной математической модели болты равномерно располагаются по окружности радиусом R.

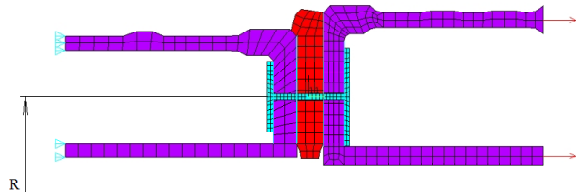


Рисунок 3. 2D- модель фланцевого соединения ротора КВД с использованием элементов Pretension

Головка болта, стержень болта и гайка смоделированы в данной 2D- модели из условия равенства массы всех пакетов (гайка, болт, головка болта) массе распределенной, по окружности осесимметричной математической модели условного болта. Сила затяжки прикладывается в узле, находящимся на оси вращения конструкции с осевой координатой середины условного болта.

Результат решения данной модели представлен на рис. 4.

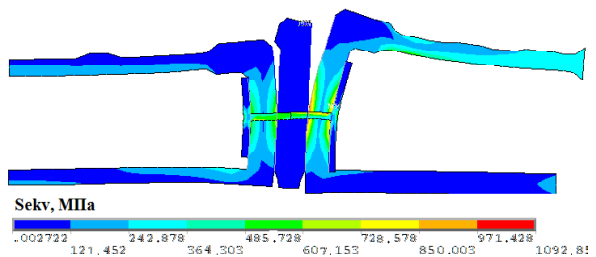


Рисунок 4. Картина эквивалентных напряжений 2D фланцевого соединения с приложенной силой затяжки

По результатам решения можно наблюдать характерную деформацию болтового стыка, места контакта, контактное давление, напряжения в теле болта.

В качестве критерия напряженности в местах концентрации напряжений может быть принято условие Губера-Мизеса:

$$\sigma_{\text{экв}} = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right\}^{\frac{1}{2}},$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения в рассматриваемой зоне.

σ_x – радиальные напряжения;

σ_y – окружные напряжения;

σ_z – осевые напряжения;

Подобным образом был реализован расчет узла трех последних дисков ротора КВД.

К сожалению, на стадии апробирования данного расчета, удалось получить результаты по математической модели только с одним фланцем из шести участвующих в узле, с заданным болтом и напряжением затяжки (рис. 5).

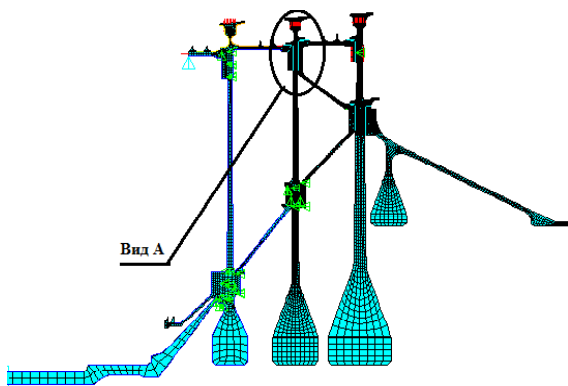


Рисунок 5. Фрагмент ротора КВД с 6-тью болтовыми стыками

Остальные пять болтовых стыков узла организованы с помощью процедуры «coupling». Результаты расчета приведенного узла КВД и, конкретно, исследуемого стыка приведены на рис. 6 и 7 в виде эквивалентных напряжений и контактного взаимодействия (радиального и осевого) сопряженных деталей.

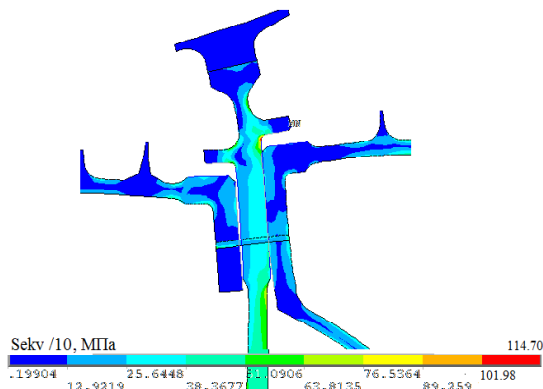


Рисунок 6. Распределение эквивалентных напряжений в болтовом стыке

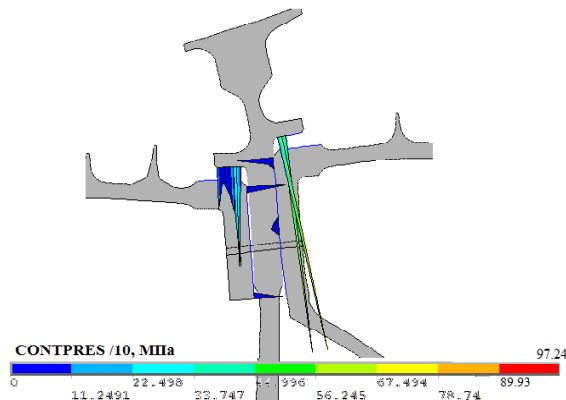


Рисунок 7. Контактное давление

Математическая модель болтового соединения в 2D-постановке (см. рис. 3) была реализована в 3D-постановке непосредственно с учетом конкретного болта (рис. 8).

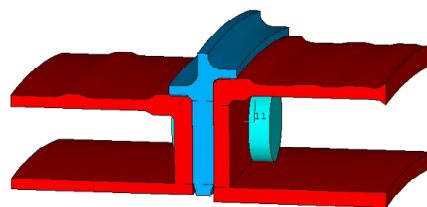


Рисунок 8. 3D- модель фланцевого соединения ротора КВД с использованием элементов Pretension

В модели приложили условие циклосимметрии (исходя из количества болтов стыка по окружности), организованы радиальные и осевые контактные пары взаимодействующих деталей, в центре среднего сечения болта приложена сила затяжки (рис. 9).

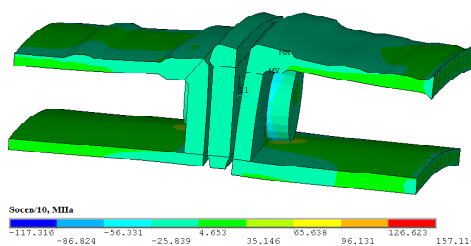


Рисунок 9. Картина НДС 3D- фланцевого соединения с приложенной силой затяжки

Результаты расчетов данной математической модели в 2D и 3D-постановках достаточно близки, при этом расчет 3D-модели дополнительно показывает напряженно-деформированное состояние непосредственно болта (рис. 10–12).

На рис. 11 представлено распределение эквивалентных напряжений в элементах циклосимметричной конструкции болтового соединения трех деталей.

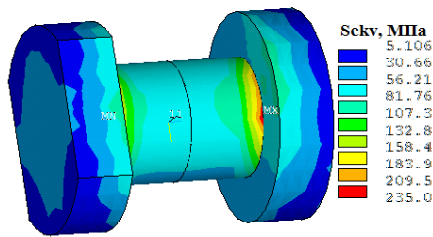


Рисунок 10. НДС болта

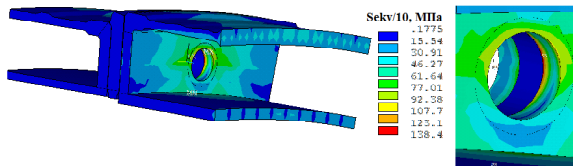


Рисунок 11. Картина эквивалентных напряжений пакета, стягиваемого болтом

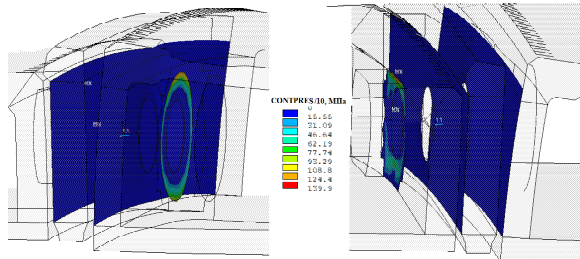


Рисунок 12. Результат контактного взаимодействия деталей в пакете болтового соединения

Проведена большая исследовательская работа по сравнительным результатам расчетов рассматриваемого стыка. На этапе расчета осесимметричных 2D -расчетов роторов рекомендовано учитывать приведенную модель болта с приложением силы затяжки и организацией контактов взаимодействующих поверхностей. Подобный расчет позволит получить более реальную картину напряженно-деформированного состояния ротора.

Но при более детальном расчете элементов ротора, следует рекомендовать циклосимметричные 3D- модели рабочих колес, с элементами приходящих проставок и, непосредственно, болта. В подобных расчетах необходимо максимально корректно задавать контактное (радиальное и осевое) взаимодействие, в центре среднего сечения болта прикладывается сила затяжки, кроме того прикладываются все нагрузки, включая инерционные, тепловые. Можно проводить серию расчетов, меняя величины нагрузок, включая силу затяжки.

На рис. 13 представлены готовые к расчету Solid и КЭ модели одного из дисков рассматриваемого узла КВД.

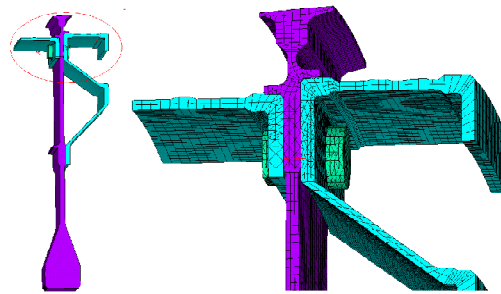


Рисунок 13. Solid и конечно-элементная модель диска КВД

ВЫВОДЫ

Использование численных методов расчета математического моделирования уже доказало свою эффективность при оценке прочности, долговечности узлов и деталей авиационного двигателя [12]. Организация математических моделей болтовых стыков с приложением силы затяжки дополняет расчетный эксперимент с получением наиболее полной информации о напряженности элементов узла.

Меняя величины нагрузок по режимам работы в эксплуатации, получаем возможность прогнозирования надежной бездефектной работы узла.

Проведенные работы по организации прочностных расчетов элементов роторов АД с использованием специальных элементов Pretension, узлы которых воспринимают силу затяжки болтов, позволили дать рекомендации для получения более достоверной картины НДС исследуемых роторов.

На этапе расчета осесимметричных 2D-расчетов роторов рекомендовано учитывать приведенную модель болта с приложением силы затяжки и обеспечением контактного взаимодействия деталей пакета.

При более детальном расчете элементов ротора следует использовать циклосимметричные 3D-модели рабочих колес, взаимодействующих деталей и, непосредственно, болта с элементами Pretension, узлы которых воспринимают силу затяжки болтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Шереметьев А. В. Использование компьютерного моделирования при проектировании дисков компрессоров авиационных ГТД / А. В. Шереметьев, Т. И. Прибора // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 32–37.
- [2]. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Пер. с англ. – М. : Мир, 1979, – 428 с.
- [3]. Beisheim J.R., Sinclair G.B., On the Free-Dimensional Finite Element Analysis of Dovetail Attachments, Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, GT-2002-30305.

- [4]. Колесников В.И. Прогнозирование надежности на основе расчетно-экспериментального анализа термонапряженного состояния узлов авиационных ГТД / В.И. Колесников, А. В. Шереметьев // Сборник трудов «Прогресс, качество, технология» Института Машин и Систем Минпромпол и НАН Украины. – Киев–Харьков–Рыбачье, 1997. – С. 282–286.
- [5]. Денисюк В. Н. Определение напряженно-деформированного состояния ротора компрессора ГТД методом конечных элементов / В. Н. Денисюк, Т. И. Прибора // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7. – С. 119–123.
- [6]. Олейник А. Г. Частные случаи повышения надежности и продления ресурса дисков компрессоров авиационных ГТД / А. Г. Олейник, Т. И. Прибора // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 10. – С. 42–45.
- [7]. Шереметьев А.В. Выбор необходимых параметров конечно-элементных сеток при расчетах на прочность лопаток авиадвигателей / А. В. Шереметьев, А. В. Петров // Авиационно-космическая техника и технология: Науч.-техн. журнал. – 2004. – № 7(15). – С. 114–118.
- [8]. РТМ. Расчет на прочность резьбовых соединений ГТД / ЦИАМ, 1980. – 27 с.
- [9]. Обеспечение прочностной надежности авиационных ГТД большой степени двухконтурности / А. В. Шереметьев, Т. И. Прибора, Р. П. Придорожный, В. В. Тихомиров // Авиационно-космическая техника и технология: Науч.-техн. журнал – 2014. – № 10/117. – С. 61–68.
- [10]. Михайленко А. Н. Оценка напряженности дисков компрессоров барабанно-дисковой конструкции при эксплуатации в различных климатических условиях. / А. Н. Михайленко, Т. И. Прибора // Авиационно-космическая техника и технология : Науч.-техн. журнал – 2005. – № 9/25. – С. 83–88.
- [11]. Шереметьев А. В. Анализ использования результатов субмоделирования при определении напряженно-деформированного состояния и ресурса деталей авиационных ГТД / А. В. Шереметьев, Т. И. Прибора, В. В. Тихомиров // Вестник двигателестроения – 2015. – № 2. – С. 52–57.
- [12]. Михайленко А. Н. Увеличение ресурса титановых дисков компрессоров / А. Н. Михайленко, Т. И. Прибора // Вестник двигателестроения – 2006. – № 3. – С. 75–79.

Статья поступила в редакцию 21.03.2018

Ноженко Д. С. інженер-конструктор ВМРД ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна, e-mail: nozhenskods@gmail.com;

Прибора Т. І. старший викладач кафедри ТАД Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: somovatat@meta.ua;

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ В РОТОРАХ ВІТЧИЗНЯНИХ ГТД

Мета роботи. Вивчення додаткових можливостей урахування болтових з'єднань при розрахунках роторів авіаційних двигунів (АД) чисельним методом, а саме, методом кінцевих елементів (МКЕ).

Методи дослідження. Математичне моделювання на основі МКЕ в нелінійній 2D- і 3D- постановках. Аналітичний метод оцінки об'єкта дослідження передуює математичному моделюванню. Результати чисельного рішення проходять порівняльний аналіз з результатами стану об'єктів після експлуатації.

Отримані результати. Результати проведених чисельних досліджень з розширенням граничних умов математичних моделей роторів АД, з метою реального урахування наявності болтових пакетів, дозволили найбільш точно визначити напружено-деформований стан (НДС) деталей, що працюють спільно. Подібні розрахунки не заперечують попередній їм аналітичний метод оцінки міцності деталей, що входять до болтового пакету. Використання нових можливостей розрахункового комплексу ANSYS максимально уточнює розрахункову інформацію про НДС деталей болтового пакета, візуалізує особливості спільної роботи, виявляє слабкі сторони конструкції і дає можливість практичного дослідження конструкції (тензометрування).

Наукова новизна. Реалізація нових можливостей розрахункового комплексу ANSYS при оцінці НДС деталей болтового пакета із завданням сили затяжки болта. Створюються елементи Pretension, вузли якого сприймають силу затяжки. В результаті можна аналізувати стан болта під дією навантажень, стан деталей, що стягуються болтом. Є можливість вивчати вплив сили затяжки болта на НДС болта і деталей пакету.

Практична цінність. Проведені роботи по організації розрахунків на міцність елементів роторів АД з використанням елементів Pretension підтвердили ефективність нових можливостей розрахункового комплексу ANSYS, для отримання більш повної і достовірної картини НДС досліджуваних роторів.

Ключові слова: зварний ротор компресора; критична зона; різьбові деталі; контактні пари.

- Nozhenko D. S.** Design Engineer of the DSAR of Ivchenko-Progress SE, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: nozhenkods@gmail.com;
- Pribora T. I.** Senior lecturer of the TAE Department of Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: somovatat@meta.ua

MATHEMATICAL MODELING OF BOLT CONNECTIONS IN ROTORS OF DOMESTIC GTE

Purpose. Development of additional possibilities of accounting bolt connections in calculating the rotors of aircraft engines (AE) by a numerical method, namely, the finite element method (FEM).

Methodology. Mathematical modeling based on the FEM in nonlinear 2D- and 3D-statements. The analytical method of evaluating the object of research precedes mathematical modeling. The results of the numerical solution are compared with the results of the state of objects after operation.

Findings. Results of the conducted numerical researches with the expansion of the boundary conditions of mathematical models of rotors of AE, for the purpose of real accounting of the presence of bolted packages, allow to define most precisely the stress-strain state (SSS) of the coupled parts. Similar calculations don't deny the previous analytical method of assessing the strength of the parts included in the bolt package. The use of new capabilities of the ANSYS computational complex maximizes the estimated information on the SSS of the parts in the bolt package to visualize the features of joint operation, identifies weaknesses in design and enables the practical study (strain-gauging) of the structure.

Scientific novelty. Implementation of new features of the ANSYS computational complex in the assessing the SSS of the bolt package parts with the bolt tightening force. The pretension elements are created, which nodes perceive the tightening force. As a result it is possible to analyze the state of the bolt under load, the state of the bolted parts. It is possible to study the influence of bolt tightening force on the SSS of the bolt and package parts.

Practical value. The carried out work on the organization of strength calculations of rotor elements of AE using pretension elements has confirmed the effectiveness of the new features of the ANSYS computational complex, to obtain a more complete and reliable picture of the SSS of the investigated rotors.

Keywords: welded rotor of the compressor; critical zone; threaded parts; contact couples.

REFERENCES

- [1]. Sheremet'ev A. V., T. I. Pribora. (2006). Ispol'zovanie komp'juternogo modelirovaniya pri proektirovanii diskov kompressorov aviacionnyh GTD. Vestnik dvigatelestroeniya, 2, 32–37.
- [2]. Segerlind L. (1979). Premenenie metoda konechnykh jelementov. Moscow: Mir, 428.
- [3]. Beisheim J.R., Sinclair G.B., (2002). On the Free-Dimensional Finite Element Analysis of Dovetail Attachments, Proceedings of ASME TURBO EXPO, GT-2002-30305.
- [4]. Kolesnikov V. I., Sheremet'ev A. V. (1997). Prognozirovanie nadezhnosti na osnove raschetno-jeksperimental'nogo analiza termonaprjazhennogo sostojaniya uzlov aviacionnyh GTD. Sbornik trudov «Progress, kachestvo, tehnologija» Intstituta Mashhin i Sistem Minprompol i NAN Ukrainy.: Kiev - Har'kov - Rybach'e, 282-286.
- [5]. Denisjuk V. N., Pribora T. I. (2004). Opredelenie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya rotora kompressora GTD metodom konechnykh jelementov. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 7, 119-123.
- [6]. Olejnik A. G., Pribora T. I. (2005). Chastnye sluchai povysheniya nadezhnosti i prodleniya resursa diskov kompressorov aviacionnyh GTD. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 10, 42-45.
- [7]. Sheremet'ev A.V., Petrov A.V. (2004). Vybor neobhodimyh parametrov konechno-jelementnyh setok pri raschetah na prochnost' lopatok aviadvigatelej. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija: Nauch.-tehn. Zhurnal, 7(15), 114–118.
- [8]. (1980). RTM. Raschet na prochnost' rez'bovyh soedinenij GTD: CIAM, 27.
- [9]. Sheremet'ev A.V., Pribora T.I., Pridorozhnyj R.P., Tihomirov V.V. (2014). Obespechenie prochnostnoj nadezhnosti aviacionnyh GTD bol'shoj stepeni dvuhkonturnosti. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, (10/117), 61–68.
- [10]. Mihajlenko A. N., Pribora T. I. (2005). Ocenka naprjazhennosti diskov kompressorov barabanno-diskovoj konstrukcii pri jekspluatacii v razlichnyh klimaticheskikh uslovijah. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 9(25), 83–88.
- [11]. Sheremet'ev A.V., Pribora T.I., Tihomirov V.V. (2015). Analiz rezul'tatov ispol'zovanija submodelirovaniya pri opredelenii naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya i resursa detalej aviacionnyh GTD, 2, 52–57.
- [12]. Mihajlenko A. N., Pribora T. I. (2006). Uvelichenie resursa titanovyh diskov kompressorov. Vestnik dvigatelestroeniya, 3, 75–79.