

УДК 004.65

РЕШЕНИЕ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ПРОТОТИПОВ

И. Н. Будилов¹, В. С. Жернаков²

¹budilov02@mail.ru, ²zhvs@mail.rb.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 08.09.2020

Аннотация. Продемонстрированы на базе цифрового прототипа (ЦП) возможности решения сложных мультифизических и междисциплинарных задач механики деформированного твердого тела на основе вычислительной платформы ANSYS/WORKBENCH/CFX. Выполнен трехмерный газодинамический расчет течения воздуха в канале компрессора с последующей оценкой напряженно-деформированного состояния (НДС) лопатки радиального компрессора (РК) с учетом давления, эксплуатационных нагрузок и температур. Получены качественные и количественные соотношения для коэффициента интенсивности напряжения (КИН) и J -интеграла по фронту трещины с учетом ее размеров и формы фронта как в пере лопатки, так и в замковом соединении.

Ключевые слова: цифровой прототип; напряженно-деформированное состояние; коэффициент интенсивности напряжений; интеграл Черепанова – Райса.

ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются основным типом двигателей в авиации, широко используются в судостроении, энергетике, газоперекачивающей отрасли. Важнейшее требование к двигателям – высокая надежность. Лопатки – сложные, высоконагруженные детали компрессора двигателя, испытывающие в течение длительного времени эксплуатации сложный комплекс воздействий различной природы (статические нагрузки, вибрации, нагрев). Поломки лопаток приводят к серьезным авариям и материальным потерям.

В связи с этим так важно и с научной точки зрения актуально научиться разрабатывать сложные мультифизические математические модели на основе цифровых прототипов/двойников с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим/производственным процессам.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Вопросам разработки цифровых двойников и решению на их основе сложных

мультифизических задач посвящены исследования [1–3]. Авторами [4, 5] показано, что использование цифровых платформ на базе компьютерных технологий мирового уровня позволило повысить уровень адекватности физических моделей и получаемых численных результатов.

В работах [6–8] выполнены исследования по оценке НДС в лопатках компрессора ГТД. Установлено, что в зонах радиусного перехода между лопаткой и замком, в замковом соединении максимальные напряжения могут достигать предела текучести и переходить в область пластических деформаций. В высоконагруженных областях возникают и распространяются трещины, вызывающие усталостное разрушение и отказ РК, что в свою очередь приводит к необходимости более точного комплексного мультифизического расчета термонапряженного состояния лопатки РК и оценке силовых параметров разрушения в случае зарождения в них усталостных трещин. Поэтому так важно научиться применять и разрабатывать цифровые прототипы/двойники ответственных узлов двигателя, а рас-

четы выполнять с использованием современных вычислительных платформ [10].

Необходимо учесть, что за счет применения метода конечных элементов (МКЭ) [9, 10], компьютерных технологий мирового уровня (CAD-CAE-CFD-FSI-MBD-EMA-CAO-NPC-...) стало возможным радикально повысить уровень адекватности физических моделей, а с использованием best-in-class компьютерных технологий мирового уровня и новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования существенно поднять уровень получаемых численных результатов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 показан пример цифровой копии/двойника компрессора.

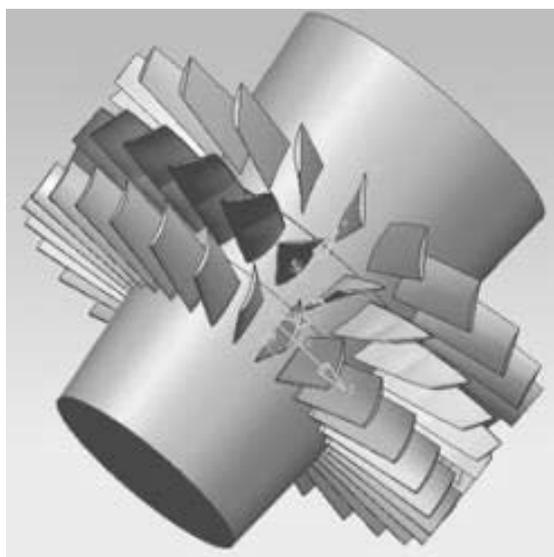


Рис. 1. Цифровая модель компрессора

Все расчеты выполнялись при использовании современных графических процессоров с помощью универсальных вычислений (GPGPU).

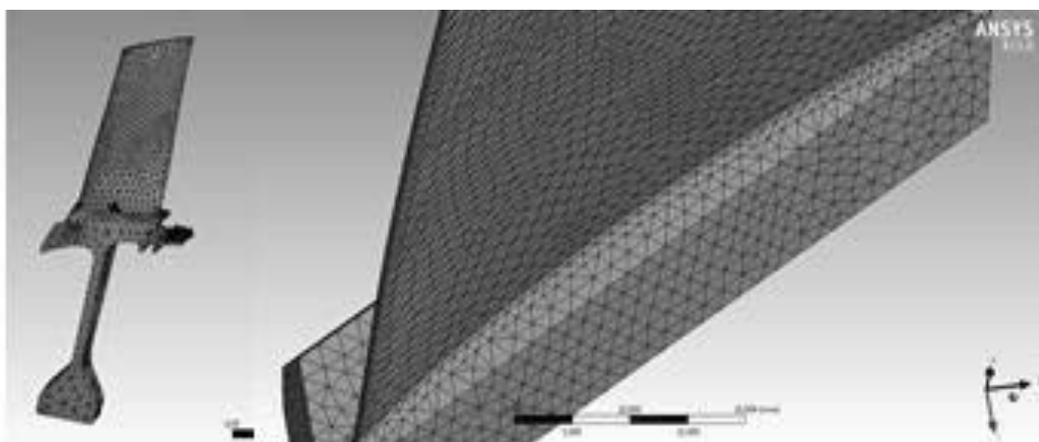


Рис. 3. Фото лопатки и секториальная КЭ-модель

Цель работы – комплексная оценка НДС, силовых и энергетических параметров разрушения при решении мультифизической задачи на примере радиальной лопатки компрессора с расположенной в пере лопатки в зоне радиусного перехода от лопатки к замковой части трещиной и в соединении типа «ласточкин хвост».

Радиальный компрессор представляет собой сборку, состоящую из диска, лопатки и вала. Твердотельная модель радиального колеса компрессора (РКК) выполнена в пакете Solid Works и показана на рис. 2.



Рис. 2. Твердотельная модель компрессора

Для возможности использования в процессе расчетов более мелкой сетки конечных элементов (КЭ) и с учетом циклической симметрии был выделен характерный сектор, показанный на рис. 3. Блок-схема расчета мультифизической задачи расчета РКК (газодинамика – прочность – вибрация) представлена на рис. 5, фото лопатки – на рис. 3.

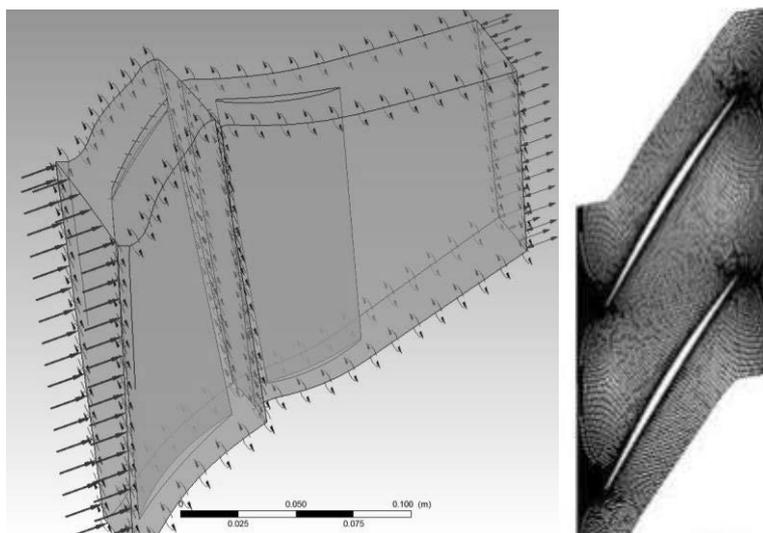


Рис. 4. Граничные условия и расчетная H-сетка

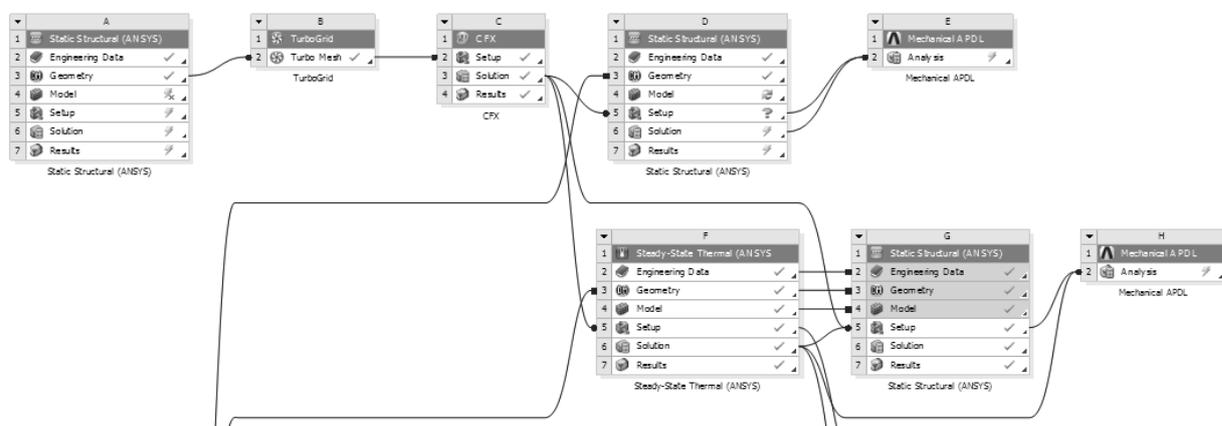


Рис. 5. Блок-схема мультифизического расчета

Все расчеты были выполнены в статической постановке в пакете ANSYS/Workbench/Thermal/CFX/Mechanical [10]. Один из вариантов сетки КЭ «лопатка – диск» с учетом секториальности приведен на рис. 3.

Расчетные параметры конечно-элементной модели. Расчет полноразмерной модели предполагал ограничения осевых перемещений посадочной поверхности диска. При расчете секториальной модели

наряду с ограничениями осевых перемещений посадочной поверхности задавались обобщенные условия симметрии по боковым поверхностям сектора, что позволяло учитывать угловую скорость, как и на полноразмерной модели.

В качестве материала лопатки был выбран титан из стандартной библиотеки материалов Workbench со свойствами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики жаропрочного титанового сплава BT-6

Температура, °C	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль Юнга, E , Па	Коэффициент Пуассона ν	Предел текучести σ_T , МПа
20	4620	11,0E + 10	0,36	930
300	4620	9,6E + 10	0,36	815–830

Механические свойства в промежутке температур от 20 до 300 °С определялись линейной аппроксимацией.

Давление на перо лопатки определялось при решении газодинамической задачи в пакете CFX, а затем поля давлений передавались в расчетный модуль ANSYS/Workbench/Thermal/Modal/Structural, тем самым решалась связанная мультифизическая задача с учетом всех сил, давлений и полей температур, действующих на центробежный компрессор (ЦК). При решении газодинамической задачи в CFX выбирались интерфейсные поверхности (рис. 4), к которым в дальнейшем была приложена нагрузка в виде полей давлений. Расчетная H-сетка области межлопаточного канала показана на рис. 4.

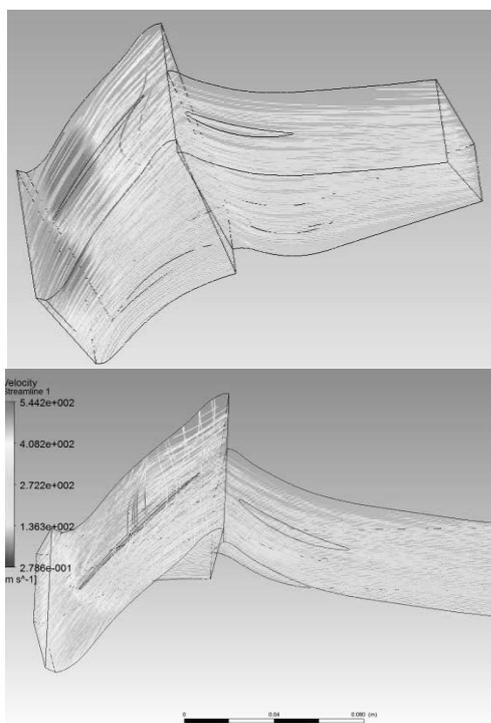


Рис. 6. Линии тока для модели ротора без зазора

Модель трещины. Область с эллиптической трещиной описывалась изопараметрическими элементами второго порядка и задавалась отдельно от основной модели с помощью инструментария CRACK в модуле Static Structural. В результате образовалась гибридная конечно-элементная модель РКК с эллиптической трещиной. РКК с трещиной с радиально-кольцевой структурой КЭ показано на рис. 8 с различным увеличением. Трещина моделировалась в форме эллипса с параметрами $C = 2,0\text{--}12,0$ мм, $a = 0,4\text{--}6,0$ мм,

располагалась в зоне радиусного перехода от лопатки к замковой части и в зоне замкового соединения типа «ласточкин хвост». Ориентацию трещины выбирали так, чтобы ось X располагалась вдоль короткого радиуса эллипса, а ось Z – вдоль длинной стороны фронта трещины.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 6 представлены линии тока с учетом величины радиального зазора в компрессоре, на рис. 7 – форма деформации лопатки на первой и шестой несущей частоте колебания лопатки.

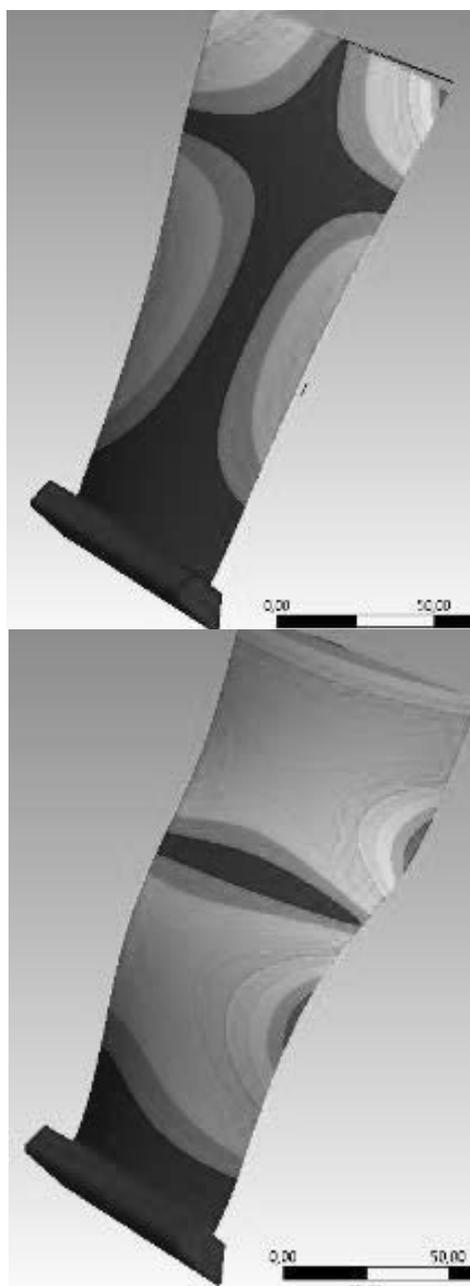


Рис. 7. Форма деформации на первой и шестой несущей частоте

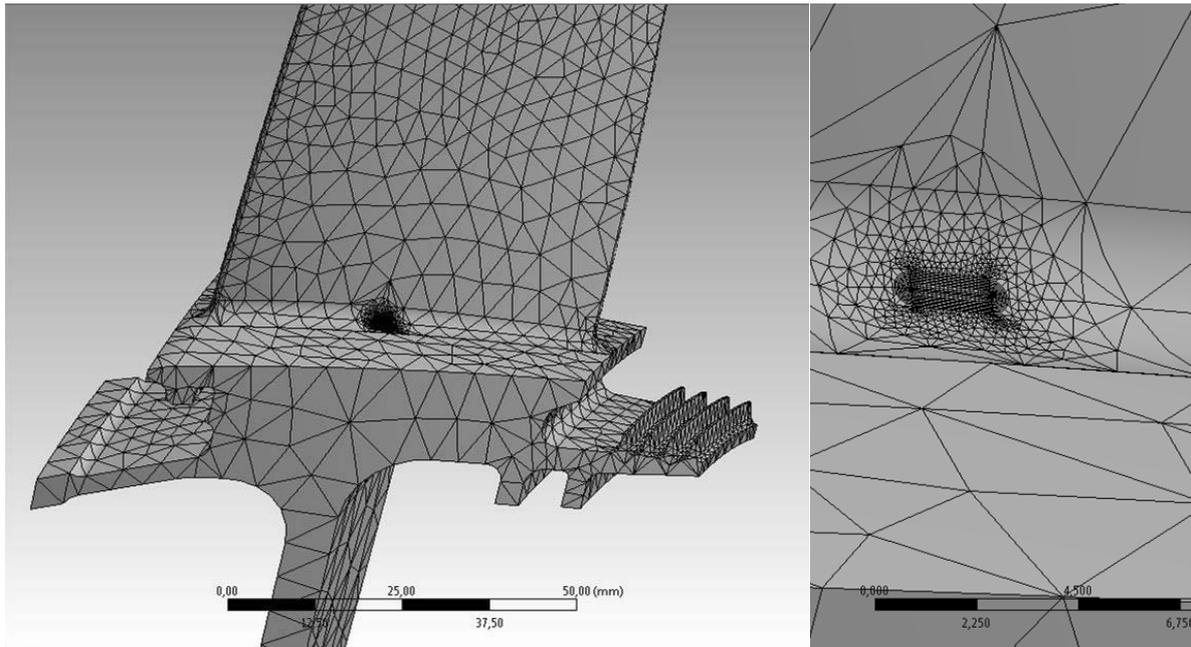


Рис. 8. Гибридная сетка КЭ в секторе ЦК с учетом наведенной эллиптической трещины

Результаты выполненного расчета МКЭ по оценке силовых и энергетических параметров разрушения позволили выявить качественные и количественные закономерности

с учетом размеров трещины и ее формы фронта. На рис. 9 и 10 показаны поля эквивалентных напряжений и перемещений в лопатках и в зоне замкового соединения.

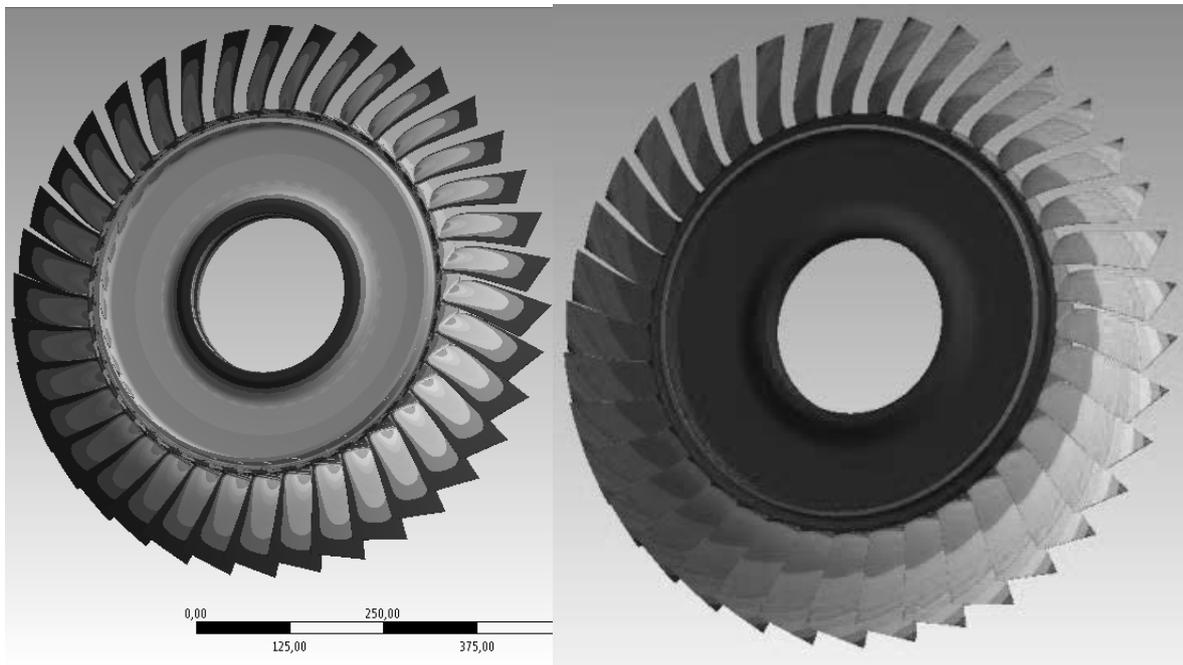


Рис. 9. НДС лопатки компрессора с учетом симметрии модели

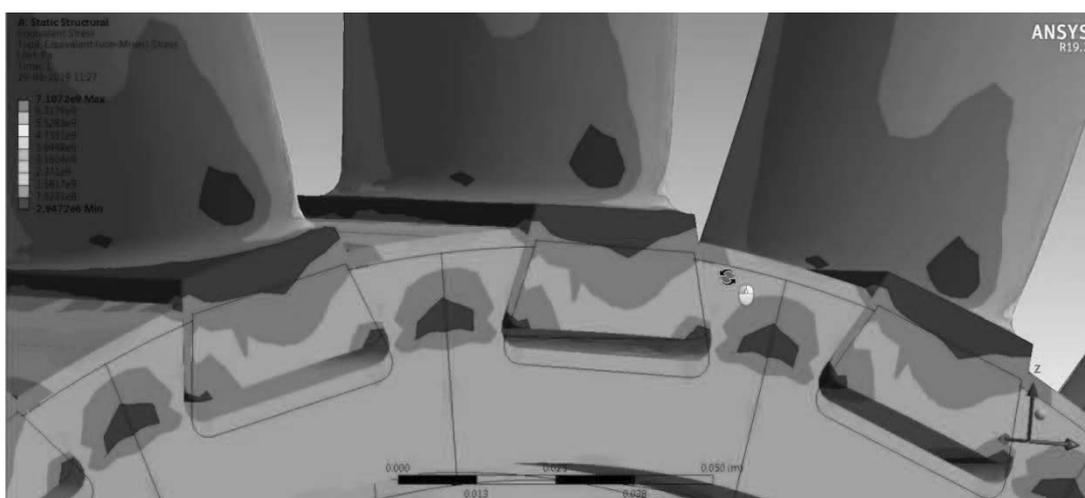


Рис. 10. Эквивалентные напряжения в области замкового соединения РКК

Результаты расчета силовых параметров разрушения. На рис. 11 показаны поля эквивалентных напряжений в области магистральной трещины.



Рис. 11. Поля напряжений в вершине трещины

Из рис. 11 видно, что в зоне вершины трещины наблюдается всплеск напряжений. Существенный рост напряжений также проявляется в области всего фронта

трещины, что является причиной ее дальнейшего роста.

Максимальные значения силовых параметров разрушения при размерах трещины $C = 12$ мм, $a = 6$ мм могут достигать значения $K_1 = 1549$ МПа \times мм $^{1/2}$.

Зависимости силовых параметров разрушения по фронту трещины приведены на рис. 12–15, на рис. 12–13 представлены зависимости КИН первого рода (K_1) и J -интеграл.

Установлен характер изменения кривых силовых параметров разрушения от формы фронта трещины. Так, рост длины трещины при постоянной ее глубине не сказывается на виде кривых силовых параметров разрушения, в то время как при изменении глубины трещины при постоянной ее длине происходит изменение характера КИН.

Максимальные значения силовых параметров разрушения при размерах трещины $C = 4$ мм, $a = 2$ мм могут достигать значений $K_1 = 871,91$ МПа \times мм $^{1/2}$. Зависимости интеграла Черепанова – Райса от длины трещины приведены на рис. 12 и получены по шести контурам интегрирования.

Установлено, что для различных по форме трещин форма кривой интеграла Черепанова – Райса представляет собой кривую с максимумом в точке максимального удаления по фронту трещины.

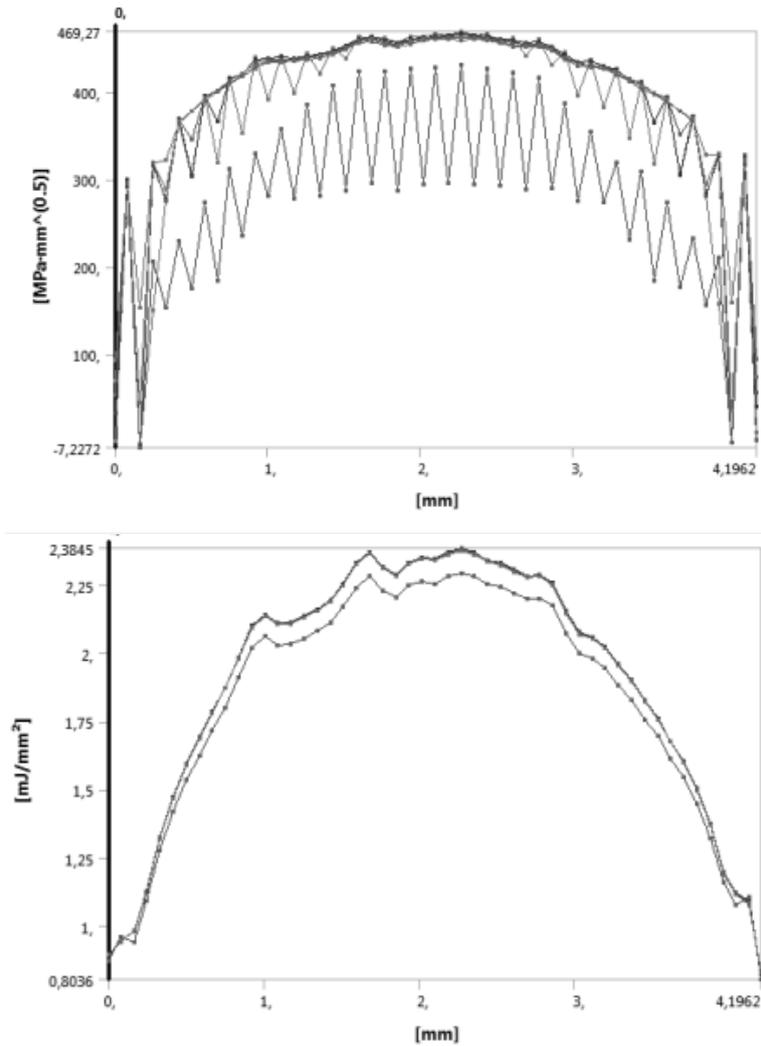


Рис. 12. Значение КИН первого рода K_1 и J -интеграла для эллиптической трещины, расположенной у основания лопатки $C = 2,0$ мм, $a = 0,4$ мм

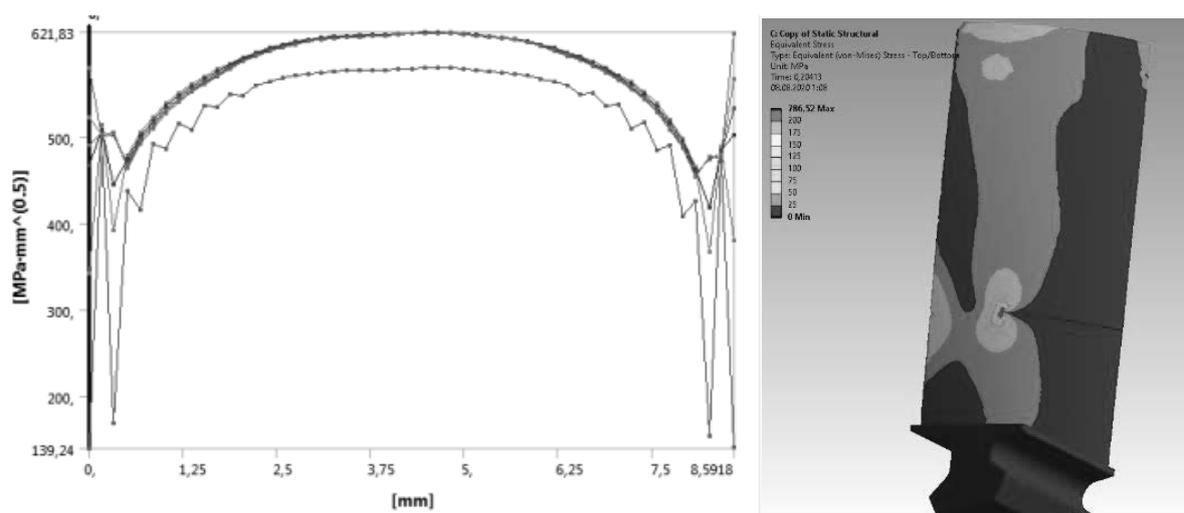


Рис. 13. Значение КИН первого рода K_1 для эллиптической трещины, расположенной в пере лопатки $C = 12,0$ мм, $a = 4,0$ мм

Максимальное значение J -интеграла для трещины с параметрами $C = 12,0$ мм, $a = 4,0$ мм составляет $2,38$ МДж/мм².

На рис. 14 показана зависимость коэффициента интенсивности напряжений первого рода K_I по фронту трещины.

Установлено, что характер полученных кривых типичен для силовых и энергетических параметров разрушения по фронту трещины для большинства компрессорных лопаток и зависит от места расположения трещины.

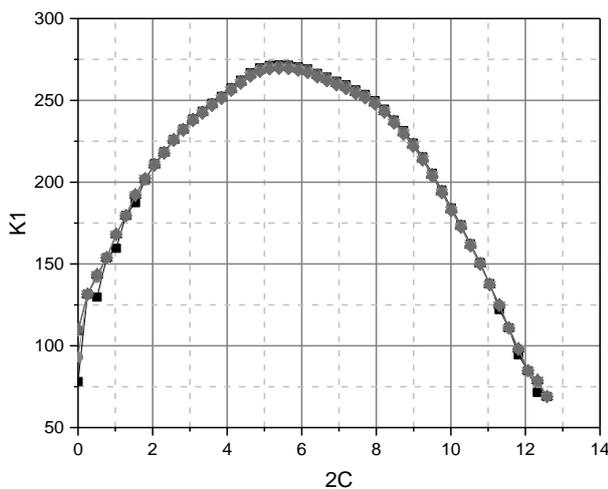


Рис. 14. Значение K_I для эллиптической трещины, расположенной в замковом соединении $C = 12,0$ мм, $a = 4,0$ мм

Характер трещин на пере лопатки компрессора в условиях циклических испытаний на вибродинамическом стенде ВЭДС-400 представлен на рис. 15. С помощью численного моделирования по методике SMART Crack-Growth Method установлена зависимость изменения собственной частоты колебания лопатки от длины трещины, как это показано на рис. 16. При росте трещины от 0 до 14 мм происходит снижение собственной частоты колебаний лопатки с 560 до 510 Гц. На основе численного эксперимента получены характерные этапы разрушения лопатки компрессора на цифровом прототипе/двойнике.

На рис. 17 представлены поля НДС при разрушении лопаток компрессора КВД,

а на рис. 18 – кривая живучести лопатки с дефектом типа магистральной трещины при ее распространении.



Рис. 15. Разрушение лопатки компрессора из жаропрочного титанового сплава ВТ-6

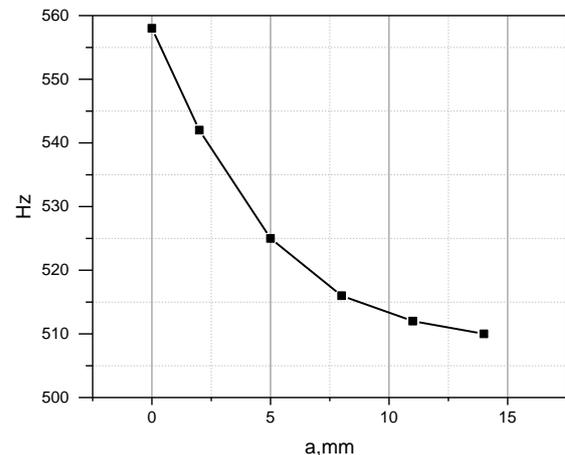


Рис. 16. Изменение собственной частоты колебания лопатки КВД при росте трещины



Рис. 17. Кинетика роста трещины лопатки КВД в процессе эксплуатации

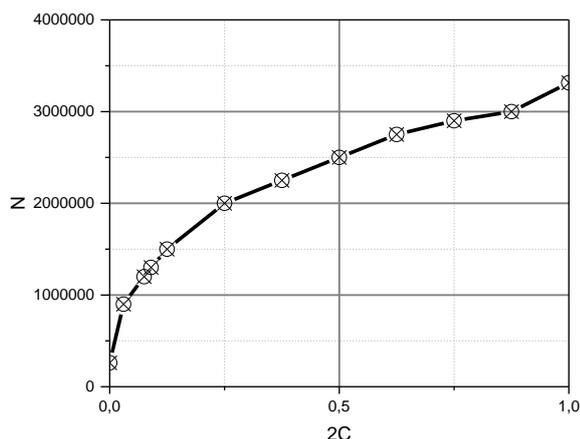


Рис. 18. Кривая живучести компрессорной лопатки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена зависимость силовых параметров разрушения КИН первого K_1 , второго K_2 и третьего K_3 рода от формы фронта трещины, расположенной в теле пера лопатки компрессора и в зоне замкового соединения «ласточкин хвост», в зоне вершины трещины наблюдался всплеск напряжений. Существенный рост напряжений также проявляется в области всего фронта трещины, что является причиной ее роста и в последующем причиной разрушения лопатки компрессора.

2. Разработан цифровой прототип лопатки и диска компрессора и решен ряд мультифизических задач на его основе.

3. Показаны поля НДС в лопатке и замковом соединении, рассчитаны собственные частоты колебаний лопатки компрессора. Установлено, что собственные частоты колебаний лопатки снижаются при появлении и росте магистральной трещины.

4. Выполнен расчет силовых параметров разрушения при совместном действии центробежной нагрузки, температурного поля и рабочего давления на перо лопатки РК, описаны новые зависимости КИН первого K_1 , второго K_2 и третьего K_3 рода по фронту трещины.

5. Установлены значения интеграла Черепанова – Райса по фронту трещины по шести контурам интегрирования.

6. Смоделировано поэтапное разрушение лопатки компрессора с помощью технологии SMART Crack-Growth Method. Проведено численное моделирование, продемонстрирована эффективность решения мультифизических задач при помощи цифровых прототипов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боровков А. И., Рябов Ю. А., Марусева В. М.** «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Трамплин к успеху. Цифровая экономика знаний. 2018. № 13. С. 13–17. [A. I. Borovkov, Yu. A. Ryabov., V. M. Maruseva, ““Smart” digital twins-the basis of a new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of a new generation”, (in Russian), in *Tramplin k uspekhу. Cifrovaya e'konomika znaniy*, no. 13, pp. 13-17, 2018.]

2. **Два в одном: для чего заводу нужен цифровой близнец** // РБК Цифровая Россия [Электронный ресурс]. URL: http://digital-russia.rbc.ru/article-page_11.html (дата обращения 10.10.2019) [*Two in one: why a factory needs a digital twin* (2019, Oct. 10) [Online], (in Russian). Available: http://digital-russia.rbc.ru/article-page_11.html]

3. **Комраков А. В., Сухоруков А. И.** Концепция цифрового двойника в управлении жизненным циклом промышленных объектов // Научная идея. 2017. № 3 (3). С. 3–9. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nauchidea.ru/> (дата обращения 19.10.2019) [A. V. Komrakov, A. I. Sukhorukov (2019, Oct. 19) “The Concept of a digital double in the management of the life cycle of industrial objects” [Online], (in Russian), in *Nauchnaya ideya*, no. 3 (3), pp. 3-9, 2017. Available: <http://www.nauchidea.ru/>]

4. **Как цифровые двойники помогают российской промышленности** [Электронный ресурс]. URL: <https://rb.ru/longread/digital-twin/> (дата обращения 10.10.2019) [*How digital twins help the Russian industry* (2019, 10 Oct.) [Online], (in Russian). Available: <https://rb.ru/longread/digital-twin/>]

5. **Boschert S., Heinrich C., Rosen R.** Next Generation Digital Twin // Proceedings of TMCE 2018 (Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 7-11 May, 2018). Organizing Committee of TMCE 2018. Pp. 209-218. [S. Boschert, C. Heinrich, R. Rosen, “Next Generation Digital Twin”, in *Proceedings of TMCE 2018*, 2018, pp. 209-218.]

6. **Раер Г. А.** Динамика и прочность центробежных компрессорных машин. Л.: Машиностроение, 1968. 260 с. [G. A. Raer, *Dynamics and strength of centrifugal compressor machines*, (in Russian.) L.: Mashinostroenie, 1968.]

7. **Гликсон И. Л., Яценко В. К., Лукьяненко О. Л.** Напряженно-деформированное состояние лопатки компрессора с повреждениями // Вестник двигателестроения. 2005. № 1. С. 83–88. [I. L. Glickson, V. K. Yatsenko, O. L. Lukyanenko, “Stress-strain state of the compressor blade with damage”, (in Russian), in *Vestnik dvigatelestroeniya*, no. 1, pp. 83-88, 2005.]

8. **Reed E. C., Viens J. A.** The influence of surface residual stress on fatigue limit of titanium // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1960. Vol. 82. № 1. [E. C. Reed, J. A. Viens, “The influence of surface residual stress on fatigue limit of titanium”, in *Journal Manufacturing Science and Engineering*, vol. 82, no. 1, 1960.]

9. **Павлевич А. Л., Староверов Н. Н., Хитрых Д. П.** Эффективная платформа прикладных исследований и всестороннего численного моделирования на основе решений ANSYS // CAD/CAM/CAE Observer. 2018. № 4. С. 70–75. [A. L. Pavlevich, N. N. Staroverov, D. P. Khitrykh, “Effective platform for applied research and comprehensive numerical modeling based on ANSYS solutions”, (in Russian), in *CAD/CAM/CAE Observer*, no. 4, pp. 70-75, 2018.]

10. **Ansys Release 19.3.** Dokumentation. Canonsburg: Ansys Inc.

ОБ АВТОРАХ

БУДИЛОВ Игорь Николаевич, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по техн. и оборуд. свар. пр-ва (УАИ, 1978). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. механики разрушения, механики деформируемого твердого тела.

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Проф., засл. деят. науки РФ, академик АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

METADATA

Title: Solving multiphysical problems based on digital prototype Shors.

Authors: I. N. Budilov¹, V. S. Zhernakov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹budilov02@mail.ru, ²zhvs@mail.rb.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 3 (89), pp. 10-19, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The possibilities of solving complex multiphysical and interdisciplinary problems of deformed solid mechanics based on the ANSYS/WORKBENCH/CFX computing platform are demonstrated on the basis of a digital prototype (CPU). A three-dimensional gas-dynamic calculation of the air flow in the compressor channel was performed, followed by an assessment of the stress-strain state (VAT) of the radial compressor blade (RC), taking into account pressure, operating loads and temperatures. Qualitative and quantitative relations are obtained for the KIN and J-integral along the crack front, taking into account its size and shape of the front both in the blade tip and in the lock joint.

Keywords: digital prototype; stress-strain state; stress intensity coefficient; Cherepanov-rice integral.

About authors:

BUDILOV, Igor Nikolaevich, Prof. of the Department of strength of materials. Dipl. engineering technology and welding equipment production (UAI, 1978). Dr. of Tech. Sci. in heat engines of aircraft (UGATU, 1998). Studies of fracture mechanics, research in the field of solid mechanics.

ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich, Head of the Department of materials resistance. Dipl. Eng.-fur (UAI, 1967). Dr. of Tech. Sci. in heat engines LA (UGATU, 1992). Prof., Honored Science Worker of RF. Academic of Science Academy of Bashkortostan Republic. Research in the field of mechanics of a deformed solid.