

том является незначительным, несмотря на то, что модель конструктивно-ортотропной оболочки, во-первых, не учитывает начальные несовершенства, а во-вторых, основана на гипотезах, идеализирующих работу подкреплённой оболочки. Данное расхождение является существенно меньшим, чем у ЭСМ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для оболочек, изготовленных по современной технологии, значение коэффициента k может быть принято близким к 0,95, а не к 0,3-0,5, как это часто предполагается. Это открывает значительные возможности для оптимизации и снижения массы перспективных конструкций ракетно-космической техники без ущерба для их надёжности.

Список использованных источников

1. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 408 с.
2. Анисимов С.А. Численный анализ устойчивости при осевом сжатии вафельных цилиндрических оболочек из алюминиевых сплавов // Труды МАИ. – 2024. – № 134.
3. Анисимов С.А., Сухомлинов Л.Г., Токарев А.Е. Прогноз критических нагрузок сжимаемых в осевом направлении вафельных цилиндрических оболочек в сопоставлении с экспериментальными данными // Космонавтика и ракетостроение. – 2024. – № 1(134). – С. 58-67.
4. Hilburger M.W., Waters W.A.J., Haynie W.T. Buckling Test Results from the 8-Foot-Diameter Orthogrid-Stiffened Cylinder Test Article TA01 [Test Dates: 19-21 November 2008] // NASA/TP–2015–218785. – 2015.
5. Hilburger M.W., Lovejoy A.E., Thornburgh R.P., Rankin C. Design and analysis of subscale and full-scale buckling-critical cylinders for launch vehicle technology development // AIAA Paper 2012–1865. – 2012.

УДК 629.735

В.М. Бузин, П.А. Селищев, А.С. Злобин, С.А. Колычев

РАСЧЁТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ФРАГМЕНТА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЛОПАТКИ МОНОКОЛЕСА

Введение. Используемые в авиационной промышленности подходы к решению задач локализации повреждений вследствие разрушения ло-

паток подразумевают проведение экспериментальных исследований по обрыву фрагмента лопатки, размеры которого заданы на основе требований нормативной документации [1]. В случае рабочих колёс, не являющихся моноколёсами, обеспечение требуемого размера фрагмента лопатки достигается известными методами (последовательная подрезка, нагрев ослабленного сечения лопатки, подрыв и т.д. [2]). Но для широкохордных лопаток моноколёс или лопаток центробежных моноколёс (ЦБК), особенно в случае МГТД, обеспечение требуемого размера отделяемого фрагмента является нетривиальной задачей, которую известные методики не затрагивают. При проведении испытаний по локализации разработчик заинтересован в предварительном расчётном определении размеров отделяемого фрагмента лопатки, а значит, в определении траектории развития трещин при разрушении.

Цель. Целью работы является исследование возможности предварительного расчётного определения размеров фрагмента при разрушении лопатки моноколеса. Рассматриваются два способа расчётного моделирования траектории развития трещин.

Линейно-упругая механика разрушения

Первый способ основан на линейно-упругой механике разрушения (ЛУМР) и автоматическом перестроении конечно-элементной модели (КЭМ) по мере развития трещин. Процесс разрушения лопатки рассматривается в линейной квазистатической 2D-постановке, при этом сложная пространственная форма лопатки упрощена до пластины, образованной меридиональным сечением лопатки и поделённой на зоны с эквивалентными толщинами. Для автоматизации расчётного процесса в ПО «ANSYS Mechanical» был разработан модуль на языке APDL по моделированию развития 2D-трещин. К достоинствам разработанного модуля можно отнести возможность одновременного роста трещины в двух направлениях (при старте трещинообразования в середине пера); возможность роста трещины с пересечением поверхностей разной эквивалентной толщины; продолжение развития разрушения после выхода трещины на поверхность сквозного отверстия (рис. 1). Главными недостатками подхода являются ограничения, обусловленные использованием ЛУМР и упрощением геометрии лопатки до пластины.

Расширением описанного подхода может быть применение готовой функции «Smart Crack Growth» в ПО «ANSYS Mechanical», которая позволяет моделировать рост трещин в линейной квазистатической

3D-постановке (присутствуют проблемы стабильности решения для сложной геометрии).

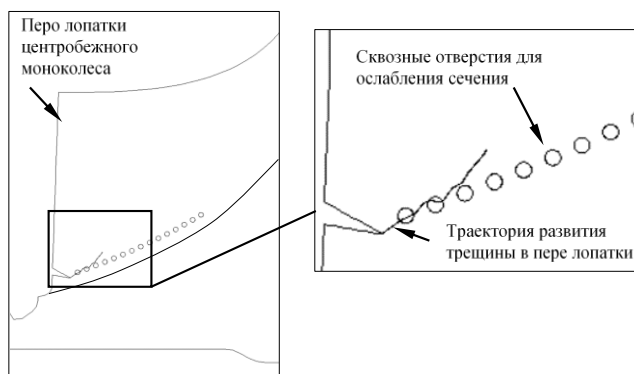


Рис. 1. Пример работы написанного модуля

Бессеточный метод. Второй способ заключается в использовании бессеточного метода «Smooth Particle Galerkin» (SPG) в ПО «LS-DYNA». Применение метода SPG позволяет моделировать рост трещин в 3D-постановке с учётом влияния пластических деформаций на процесс разрушения. К основным достоинствам метода можно отнести реализацию процесса распространения трещин через разрыв связей между узлами (дискретизация модели в процессе расчёта не меняется); поддержку больших пластических деформаций; широкий выбор критериев разрушения. Условным недостатком подхода является использование явного решателя, что многократно увеличивает время расчёта.

Верификация. Результаты верификации представленных подходов (на основе описанного в работе [3] эксперимента) в части траектории развития трещин представлены на рис. 2.

Подход, основанный на ЛУМР, позволил получить траекторию движения трещины, согласующуюся с результатами эксперимента.

Для SPG-метода траектория движения трещины в рассмотренном случае существенно зависит от назначенной критической величины пластической деформации. При величине деформации 0,2% траектория приближается к результатам ЛУМР и эксперимента. При увеличении критической величины пластической деформации траектория стремится к кратчайшему пути, соединяющему область старта трещинообразования и

концентратор в виде отверстия. Таким образом, применение SPG-метода позволяет учитывать влияние пластических деформаций на траекторию движения трещины.

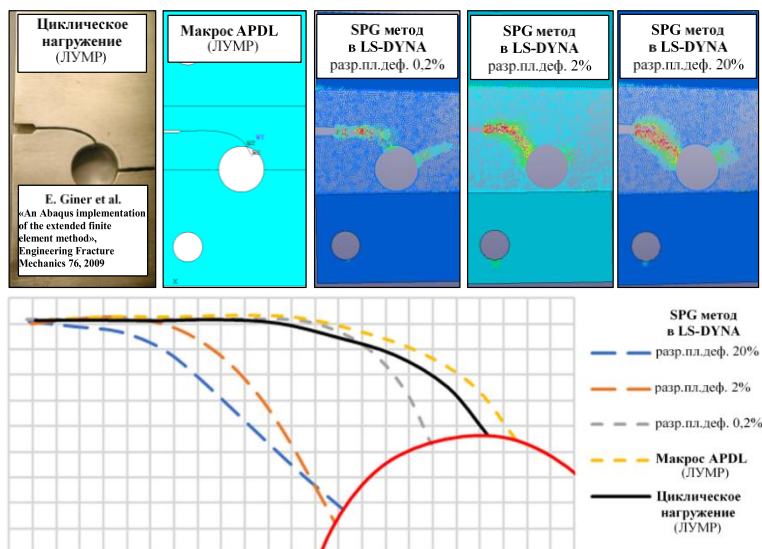


Рис. 2. Моделирование разрушения пластины

Результаты моделирования обрыва лопатки центробежного моноколеса представлены на рис. 3. Результаты сравнения чувствительности размеров получаемого фрагмента лопатки ЦБК к свойствам материала и качеству дискретизации модели методов SPG и традиционного МКЭ представлены на рис. 4.

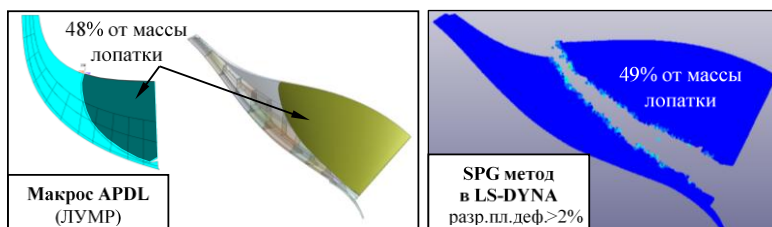


Рис. 3. Моделирование разрушения лопатки ЦБК

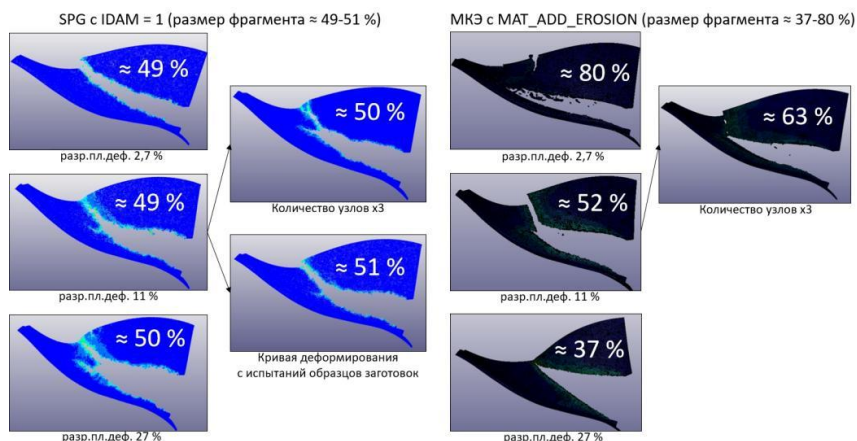


Рис. 4. Сравнение чувствительности размеров получаемого фрагмента лопатки ЦБК к свойствам материала и качеству дискретизации модели

Заключение. Оба подхода (ЛУМР и бессеточный метод SPG) позволили получить сопоставимые размеры фрагментов лопатки (48-49% от массы лопатки, см. рис. 3) при старте трещины от повреждения на входной кромке.

Применение подхода, основанного на ЛУМР, возможно для геометрии, которую можно свести к 2D-постановке для хрупких материалов и для пластичных материалов, когда траектория разрушения лопатки определяется процессом развития трещин по механизму малоцикловой и многоцикловой усталости. Главным преимуществом является возможность гибкой параметризации геометрии исследуемого объекта, его ослабления и места старта трещинообразования.

Применение метода SPG в ПО «LS-DYNA» позволило смоделировать рост трещины как в варианте, учитывающем пластическую деформацию, так и в варианте, согласующемся с линейной механикой разрушения (см. рис. 2). Данный подход позволил моделировать развитие трещин в сложной геометрии. Методика показала слабую чувствительность размеров получаемого фрагмента лопатки ЦБК к свойствам материала и качеству дискретизации модели (см. рис. 4). Для дальнейшего развития темы требуется валидация представленных методик по результатам натурных испытаний по обрыву лопаток моноколес.

Список использованных источников

1. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов: АП-33: утв. Постановлением 32-й сессии совета по авиации и использованию воздушного пространства 17.02.2012. 3-е изд. с поправками 1–2. – М.: Авиаиздат, 2012. 85 с.
2. Лепешкин, А.Р. Метод термоуправляемого обрыва лопаток при испытаниях корпусов авиационных ГТД на непробиваемость / А.Р. Лепешкин, П.А. Ваганов, Н.Г. Бычков // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – С. 1576-1578.
3. E. Giner, An Abaqus implementation of the extended finite element method / E. Giner, N. Sukumar, J.E. Tarancón, F.J. Fuenmayor // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76. – P. 347-368.

УДК 62:539:519.243

*И.Ю. Коваль, Н.А. Сургутанов, Е.Ю. Печенина,
С.А. Анисимов, С.С. Лаврентьева*

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАМЕНЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ПОЛИМЕР В КОРПУСЕ ТЕРМОСТАТА ДВС: СНИЖЕНИЕ МАССЫ И СТОИМОСТИ

Введение. В современном автомобилестроении оптимизация материалов для компонентов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является важной задачей. Замена металлических сплавов на полимеры позволяет снизить массу и стоимость изделия, сохраняя функциональность и надёжность. Данная работа посвящена многокритериальному выбору материалов для корпуса термостата ДВС автомобиля, изначально изготовленного из литейного алюминиевого сплава А356.0 (аналог АК7пч по ГОСТ 1583-93). Для анализа использовались программные средства УМКАМатериалы 3.3, Ansys 2022R2, сравнение по весовым коэффициентам через Microsoft Excel. Основное внимание уделяется расчётам в Ansys, обеспечивающим соответствие проектным требованиям [1-3].

Объект исследования и цели. Объектом исследования является корпус термостата автомобиля, выполненный из алюминиевого сплава