



СОДЕРЖАНИЕ

Строительная механика
и прочность летательных аппаратов

Герасимов А.В., Паиков С.В.

Численное моделирование соударения высокоскоростных элементов с корпусом и наполнителем аэрокосмической конструкции

Ковалёв С.П., Нелюб В.А., Шелофаст В.В.

Многокритериальный анализ разрушения конструкций летательных аппаратов

Динамика полета
и управление летательными аппаратами

*Алифанов О.М., Егоров Ю.Г., Кульков В.М.,
Терентьев В.В., Фирсюк С.О.*

Подход к формированию проектного облика системы ориентации малого космического аппарата

Гаркушенко В.И., Лазарева П.А.

К задаче проектирования системы управления самолета с заданными динамическими свойствами

Гирфанов А.М., Ледянкина О.А.

Методология применения искусственных нейронных сетей в задаче имитации нагружения одновинтового вертолета

Ефремов А.В., Кошеленко А.В., Тяглик М.С.

Совершенствование методики и средств полунатурного моделирования при исследовании задач ручного управления летательными аппаратами

Машков Г.М., Борисов Е.Г., Владыко А.Г.

Анализ точности определения местоположения объектов дальномерными системами различного типа

Роднищев Н.Е., Романенко Л.Г., Денисов К.Г.

К оценке параметров законов управления боковым движением летательного аппарата с учетом ветровых возмущений

Аэро- и газодинамика летательных аппаратов
и их двигателей

Аристов С.Н., Просвирыков Е.Ю.

Крупномасштабные течения завихренной вязкой несжимаемой жидкости

*Стейл Р., Диизи Ф., Баракос Дж., Гарипова Л.И.,
Кусюмов А.Н., Михайлов С.А.*

Моделирование обтекания колеблющегося профиля с аэроупругим закрылком

Проектирование и доводка авиационных
и ракетных двигателей

*Гимбитский А.В., Гильфанов Р.Н., Дезидерьев С.Г.,
Каримова А.Г.*

Влияние способа тепловой защиты на температурное состояние экрана и оболочки

Картовицкий Л.Л., Левин В.М., Яковлев А.А.

Концепция повышения эффективности рабочего процесса ПВРД

CONTENTS

Structural mechanics
and strength of flight vehicles

3 *Gerasimov A.V. and Pashkov S.V.*

Numerical simulation of high-velocity element collisions with shell and filler of aerospace structures

9 *Kovalev S.P., Nelyub V.A., and Shelofast V.V.*

Multi-criteria analysis of aircraft structure fracture

Flight dynamics
and control of flight vehicles

15 *Alifanov O.M., Egorov Yu.G., Kul'kov V.M.,
Terent'ev V.V., and Firsyuk S.O.*

An approach to forming the design performance of the attitude control system for small spacecraft

21 *Garkushenko V.I. and Lazareva P.A.*

To a problem of aircraft control system design with the given dynamic parameters

26 *Girfanov A.M. and Ledyankina O.A.*

Methodology of using artificial neural networks for imitating the loading of a single-rotor helicopter

31 *Efremov A.V., Koshelenko A.V., and Tyaglik M.S.*

Improvement of semi-scale simulation technique and subsystems for investigation of aircraft manual control

38 *Mashkov G.M., Borisov E.G., and Vladyko A.G.*

Analysis of object positioning accuracy provided by range-finding systems of various types

44 *Rodnishchev N.E., Romanenko L.G., and Denisov K.G.*

To estimation of control law parameters for the lateral motion of aircraft taking into account wind disturbances

Aero- and gas-dynamics of flight vehicles
and their engines

50 *Aristov S.N. and Prosviryakov E.Yu.*

Large-scale flows of viscous incompressible fluid vorticity

55 *Steijl R., Dehaeze F., Barakos G.N., Garipova L.I.,
Kusyumov A.N., and Mikhailov S.A.*

Simulation of flow around oscillating rotor blade section with aeroelastic flap

Aircraft and rocket engine design
and development

62 *Gimitskii A.V., Gil'fanov R.N., Dezider'ev S.G.,
and Karimova A.G.*

Influence of thermal protection on the temperature state of the shield and casing

67 *Kartovitskii L.L., Levin V.M., and Yakovlev A.A.*

A concept of increasing efficiency for ramjet operation

- Колодяжный Д.Ю., Назорный В.С.** 73 **Kolodyazhnyi D.Yu. and Nagorni V.S.**
 Экспериментальные исследования влияния электрического поля на параметры сгорания керосиновоздушной смеси
 Experimental study of the influence of electric field on parameters of kerosene-air mixture combustion
- Романовский В.Л., Муравьева Е.В.** 77 **Romanovskii V.L. and Murav'eva E.V.**
 Использование графоаналитического метода анализа риска «древовидные структуры» для выявления факторов, влияющих на живучесть жидкостных ракетных двигателей малой тяги
 Application of the graph-analytical method of risk analysis «the tree structures» to study survivability of liquid rocket thrusters
- Теория авиационных и ракетных двигателей**
Aircraft and rocket engine theory
- Рябый В.А., Обухов В.А., Кирпичников А.П., Машеров П.Е., Мозулкин А.И.** 82 **Ryabyi V.A., Obukhov V.A., Kirpichnikov A.P., Masherov P.E., and Mogulkin A.I.**
 Методика интегральной диагностики высокочастотного индукционного газоразрядного блока ионного двигателя
 Technique of integral diagnostics for a radio-frequency inductively coupled plasma discharge unit of an RF ion thruster
- Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы**
Aircraft instruments and instrumentation computer complexes
- Арискин Е.О., Никитин А.В., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М.** 87 **Ariskin E.O., Nikitin A.V., Soldatkin V.V., and Soldatkin V.M.**
 Бортовая система измерения параметров вектора ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах вертолета с аэрометрическими и ионно-меточными измерительными каналами
 Onboard system for measuring the parameters of wind vector during parking, starting and takeoff-landing modes for helicopter with aerometric and ion-beacon measuring channels
- Геращенко А.Н., Куликов Н.И., Макаренко А.В.** 94 **Gerashchenko A.N., Kulikov N.I., and Makarenko A.V.**
 Метод оценки энергоэффективности источников энергопитания автономных систем приводов перспективных мобильных объектов
 Method of energy efficiency assessment for power supply sources of autonomous drive systems for perspective mobile objects
- Крылов Д.Л., Солдаткина Е.С.** 99 **Krylov D.L. and Soldatkina E.S.**
 Система воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока
 System of air signals of aircraft with stationary non-protrusive flow receiver
- Технология авиационного производства**
Aircraft production technologies
- Дружинин Г.В., Бодунов Н.М., Бреховских П.В.** 105 **Druzhinin G.V., Bodunov N.M., and Brekhovskikh P.V.**
 Об одном аналитическом решении уравнений Навье – Стокса – Бринкмана применительно к методам трансферного формования
 On an analytical solution of Navier – Stokes – Brinkman equations as applied to transfer molding methods
- Радиотехника и связь**
Radio engineering and communication
- Бачевский С.В., Мартемьянов И.С.** 111 **Bachevskii S.V. and Martem'yanov I.S.**
 Совместная обработка измерений в многопозиционной угломерно-разностно-дальномерной системе пассивной локализации
 Cooperative processing of measurements in multilateral radial – range difference system of passive radiolocation
- ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ**
TECHNICAL NOTES
- Аэро- и газодинамика летательных аппаратов и их двигателей**
Aero- and gas-dynamics of flight vehicles and their engines
- Варсегов В.Л., Шабалин А.С.** 117 **Varsegov V.L. and Shabalin A.S.**
 Выбор оптимальной модели турбулентности при численном моделировании течения в устройстве реверсирования тяги ТРДД решетчатого типа
 Selection of an optimal turbulence model for numerical flow simulation in a cascade type turbofan engine thrust reverser
- Технология авиационного производства**
Aircraft production technologies
- Григорьев С.Н., Козочкин М.П., Окунькова М.А.** 121 **Grigor'ev S.N., Kozochkin M.P., and Okun'kova A.A.**
 Исследование перспектив мониторинга электроэрозионных процессов по изменению параметров вибраций
 Investigation of monitoring perspectives for electroerosion processes by vibration parameter variation
- Халиулин В.И., Хилов П.А., Торопцова Д.М.** 127 **Khaliulin V.I., Khilov P.A., and Toroptsova D.M.**
 О перспективах применения TFP-технологии при производстве авиационных композитных деталей
 Prospects of applying the tailored fiber placement (TFP) technology for manufacture of composite aircraft parts

Журнал «Известия вузов. Авиационная техника» включен в утвержденный ВАК Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Многокритериальный анализ разрушения конструкций летательных аппаратов

С.П. КОВАЛЁВ,

д-р физ.-мат. наук,

В.А. НЕЛЮБ,

В.В. ШЕЛОФАСТ,

д-р техн. наук

(МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Москва)

kovalyov@emtc.ru

mail@emtc.ru

vvshelofast@apm.ru

Предложен новый модульный многоитеративный алгоритм многокритериального анализа разрушения конструкций со сложной геометрией. В целях апробации алгоритма в нем реализован расчет развития трещин по трем критериям: коэффициент интенсивности напряжения, интенсивность выделения упругой энергии и J -интеграл. Рассмотрена реализация алгоритма методом конечных элементов и намечены перспективы альтернативной реализации на базе бессеточных методов.

Вычислительная механика разрушения, интенсивность выделения энергии, модульная структура алгоритма, метод конечных элементов, бессеточные методы

Современные программные средства моделирования разрушения конструкций отличаются значительной трудоемкостью в применении и предъявляют высокие требования к квалификации инженеров-расчетчиков. Фактически эти средства предоставляют широкий набор расчетных инструментов, основанных на существенно различных физических предпосылках и вычислительных методах, создавая проблему выбора инженером того или иного инструмента для решения стоящей перед ним конкретной задачи. Кроме того, квалифицированная ручная работа инженера требуется для подстройки расчетной сетки конечных элементов (КЭ), на которые разбивается модель конструкции, причем изменение геометрии может требовать многократной ручной подстройки в одном сеансе расчета [1].

При моделировании конструкций из традиционных материалов выбор и ручная подстройка инструментов упрощаются благодаря большому объему накопленного опыта практического применения физических моделей и оценки степени их соответствия реальным процессам. Однако для проектирования сложных конструкций из современных материалов, которые одновременно подвергаются разноплановым физическим воздействиям (например, механическому, тепловому и электромагнитному), не хватает комплексных промышленных программных средств со способностью самостоятельно принимать решение об адекватности тех или иных моделей и методов и автоматически настраивать их. В настоящей работе предложен новый многоитеративный алгоритм многокритериального анализа разрушения конструкций, предназначенный для применения в составе таких средств. От алгоритма такого рода требуется в первую очередь не столько поддержка тех или иных конкретных методов вычислительной механики разрушения, сколько обеспечение простоты и универсальности с точки зрения как программной реализации, так и работы пользователя-расчетчика.

Современные материалы характеризуются высокой прочностью (прочность при растяжениях не ниже 1920 МПа) и небольшим удельным весом (плотность до 1600 кг/м³). К таким материалам относятся керамика и композиты, синтетические кристаллы и пластики и др. Современные материалы разрабатываются по новым или усовершенствованным методикам, позволяющим варьировать состав материала в зависимости от выполняемых функций. Благодаря системному подходу к расчету состава по функциям появилась новая научная дисциплина – материомика. Методы ее были изначально нацелены на анализ биоматериалов, но перспективны и в отношении неорганики [2]. Такие материалы особенно востребованы в аэрокосмической отрасли благодаря комплексу уникальных свойств [3, 4]. Важнейшую роль в проектировании авиационных конструкций играют достоверные оценки условий возникновения критического состояния, динамики образования трещин и разрушения [5, 6]. Автоматический многокритериальный анализ разрушения способен внести значительный вклад, в частности, в повышение прочности обшивки летательных аппаратов.

1. Критерии разрушения конструкций

Физические модели процессов разрушения конструкций, учитывающие различные эффекты и воздействия, позволяют сформулировать различные критерии разрушения – условия, при которых начинается необратимый рост трещин и других дефектов. Большинство критериев разрушения сводятся к сравнению некоторой величины, производной от параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции, с критическим значением, устанавливаемым экспериментально для различных материа-

лов [7]. Базовым параметром НДС является тензорное поле напряжений $\sigma_{ij}(\mathbf{x})$, где \mathbf{x} пробегает компактное множество $\Omega \subseteq \mathbb{R}^3$, представляющее геометрическую модель конструкции. Поле напряжений находится из уравнения теории упругости, в линейном случае имеющего вид

$$\Sigma_j \partial_j \sigma_{ij} + b_i = 0, \quad (1)$$

где b_i – векторное поле внешних сил с учетом граничных условий на участках границы конструкции $\partial\Omega$. В нелинейных задачах в это уравнение добавляются те или иные нелинейные члены. С помощью обобщенного закона Гука можно переходить от поля напряжений к векторному полю перемещений (деформаций) и обратно.

Наиболее прямым критерием разрушения в заданной точке является сравнение значения первого главного напряжения σ в этой точке с пределом прочности σ_B . Однако такая оценка оказывается слишком грубой. Она не учитывает особенности процесса формирования и распространения трещин, поэтому устанавливаются более сложные критерии. Например, предлагается сравнивать с σ_B некоторое эффективное среднее значение фактического напряжения [8]. Тщательное физическое описание сил, действующих на линейную трещину длины a , приводит к одному из самых известных критериев разрушения – проверке достижения критического значения коэффициента интенсивности напряжения (КИН), который вычисляется по формуле

$$K = \sigma \sqrt{a} Y, \quad (2)$$

где Y – подходящая функция геометрии конструкции и трещины (тарировка).

В свою очередь, расчет баланса энергии растущей трещины, проведенный для хрупких материалов, позволил сформулировать энергетический критерий, основанный на расчете интенсивности выделения упругой энергии G по формуле

$$G = \pi \sigma^2 a / E, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга материала. Энергетический критерий допускает модификацию в целях учета тех или иных факторов, таких, как текучесть материала, тепловое воздействие и т.п. Можно принять во внимание геометрическую структуру и физические свойства заполняющего материала в многослойных конструкциях [9]. Также можно учесть, что в подходящем масштабе l_0 реалистичная геометрическая модель трещины представляет собой не линию, а фрактал с характерной шириной H_0 и параметром самоподобия H (параметр Хёрста) [10]. Для фрактальной трещины формула (3) заменяется формулой

$$G = \left(\pi \sigma^2 a / E \right) \left[1 + (2 - H) (H_0 / l_0)^2 (l_0 / a)^{(2H - 2)} \right], \quad (4)$$

которая переходит в формулу (3) в линейном пределе $H_0 \rightarrow 0$.

Эти и другие критерии были проанализированы в целях отбора наиболее адекватных для апробации разработанного алгоритма многокритериального анализа разрушения конструкций летательных аппаратов. Принимались во внимание область применимости критериев, количество подтверждающих экспериментальных данных, доступность критических значений и других коэффициентов, вычислительная ресурсоемкость и прочие аспекты. Были отобраны три критерия, которые в общем случае нелинейной мультифизической задачи не сводятся друг к другу: КИН, G и так называемый J -интеграл.

2. Алгоритм многокритериального анализа разрушения

Компьютерные исследования трещиностойкости и разрушения материалов конструкций в подавляющем большинстве случаев выполняются по одному из двух основных путей [11, 12]:

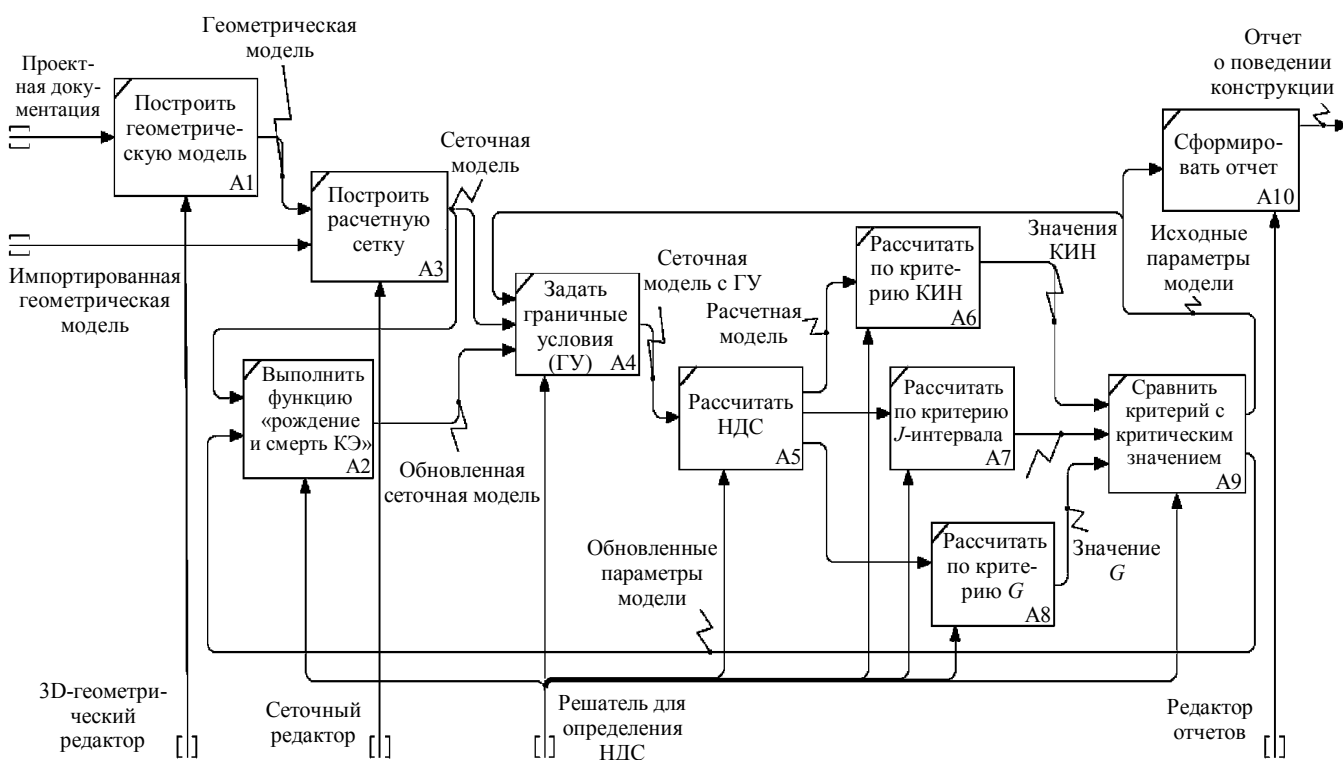
- 1) подробное изучение конкретной трещины, присутствующей в рассматриваемой конструкции;
- 2) исследование процесса роста трещин по упрощенным критериям прочности/разрушения с применением методов типа «рождение/смерть» или методов модификации КЭ расчетной модели.

Программные комплексы ANSYS, Abaqus, Nastran предоставляют инженеру-расчетчику широкий набор инструментов как для первого, так и для второго варианта исследований. В первом варианте предполагается, что параметры трещины известны (может быть, приближенно), и делается прогноз ее роста одно-

кратным вычислением значений различных критериев разрушения. Во втором варианте проводится многошаговое по времени моделирование динамики роста трещин, с учетом некоторого упрощенного критерия прочности/разрушения, по достижении которого производится модификация КЭ и связей между КЭ. Как развитие этих подходов разработан новый комплексный алгоритм расчета развития трещин, сочетающий оба варианта и в то же время не приводящий к чрезмерному расходу вычислительных ресурсов.

1. Определение НДС из условия линейного/нелинейного изменения геометрии модели при механических и немеханических воздействиях.
2. Автоматическое/полуавтоматическое нахождение наиболее нагруженного/опасного участка либо ручное задание известного дефекта материала.
3. Нахождение критических значений КИН, интенсивности выделения упругой энергии G , J -интеграла.
4. Определение действительных значений КИН, G , J -интеграла и сравнение их с критическими.
5. Формирование вывода о возможности роста трещины и модификация модели («ослабление/рождение/смерть» одного или нескольких КЭ в опасной зоне и модификация связей).
6. Повторение шагов 1–5 на модифицированной модели либо до момента разрушения исследуемой конструкции, либо до формирования вывода о невозможности дальнейшего роста трещины.

Прежде чем выполнить этот алгоритм, необходимо провести ряд предварительных работ: построить геометрическую модель в 3D-редакторе либо импортировать ее из САД-системы, сгенерировать расчетную сетку КЭ, задать граничные условия. По окончании работы алгоритма расчета развития трещин формируется итоговый отчет о поведении конструкции при рассматриваемом механическом и/или немеханическом воздействии. Блок-схема полного алгоритма многокритериального анализа разрушения конструкций представлена на рисунке.



Такой алгоритм позволяет смоделировать ход процесса развития трещин в многокомпонентных конструкциях со сложной геометрией, находящихся под действием разноплановых физических воздействий, и при этом обеспечить более высокую точность, чем во втором варианте традиционного расчета. Главным достоинством алгоритма является его «мелкогранулярная» модульная структура, позволяющая модифицировать и расширять его во множестве различных аспектов без существенной перестройки процедуры расчета в целом. Например, легко добавить/удалить любой конкретный критерий разрушения, что доказывает многокритериальность алгоритма. Также при необходимости легко заменить обращение к функции «рождение/смерть» КЭ введением когезионных [13], расширенных КЭ [14] и т.п.

Рассмотрим алгоритмы решения основных подзадач: определение НДС (шаги 1, 6) и нахождение наиболее нагруженного участка (шаг 2).

1. Установка начальных значений параметров расчета (точность вычислений, количество шагов по нагрузке).
2. Увеличение нагрузки на один шаг.
3. Вычисление внутренних усилий интегрированием накопленных напряжений в элементах.
4. Вычисление невязки между приложенной нагрузкой, соответствующей одному шагу нагружения, и внутренними усилиями.
5. Нахождение приращения перемещений методом КЭ.
6. Вычисление приращения напряжений по линейным формулам (в предположении упругого поведения материала).
7. Разделение приращений напряжений на упругие и пластические.
8. Накопление напряжений и деформаций.
9. Учет трансляционных перемещений и поворотов.
10. Повторение шагов 2–9 по всему рассчитываемому диапазону нагрузок.

Подобная организация расчетного алгоритма позволяет учитывать разного рода нелинейности, влияющие механических и немеханических воздействий, модификацию сетки КЭ.

Алгоритм нахождения наиболее нагруженного участка, в частности содержащего трещину, по известному НДС может быть устроен по-разному, в том числе с учетом применяемых видов КЭ. В качестве примера приведем упрощенный вариант, состоящий из следующих шагов.

1. Поиск зоны максимальной концентрации напряжений в объеме тела на основе эквивалентных напряжений по Мизесу.
2. Определение главных напряжений в узле с максимальным эквивалентным напряжением приведением тензора напряжений в этом элементе к главным осям.
3. Предварительное определение направления распространения трещины согласно первой теории прочности.
4. Вычисление размеров трещины.
5. Определение окончательного направления распространения трещины.

3. Альтернативы методу КЭ

Определяющее влияние на точность и вычислительную ресурсоемкость алгоритма, описанного в разд. 2, оказывают шаги, связанные с генерацией и перестройкой сетки КЭ. Для мультифизических расчетов многокомпонентных конструкций со сложной геометрией построить высококачественную сетку, обеспечивающую контролируемую погрешность при относительно невысоких затратах ресурсов, очень трудно [1]. В связи с этим в настоящее время активно развивается ряд методов, альтернативных методу КЭ, получивших общее название бессеточных. Они направлены на проведение инженерных расчетов непосредственно по цельной геометрической модели, без деления на КЭ, что позволяет исключить из алгоритма указанные шаги.

Первые бессеточные методы возникли в вычислительной механике жидкости и газа [15]. Они предписывают разделять сплошную среду на одинаковые ячейки, настолько малые, что внутри них действуют положения физической кинетики. Каждая ячейка рассматривается как контейнер для пучка частиц, и физика задачи описывается балансовыми уравнениями передвижения частиц между ячейками. Дискретизация, необходимая для решения на компьютере, выполняется непосредственно из естественных физических соображений, а не трудоемким выделением искусственных КЭ.

Предлагается применять методы такого рода и для расчета конструкций из твердых материалов. Однако в целом исследование баланса потоков частиц нехарактерно для физики твердого тела. Более перспективными для применения в разработанном алгоритме являются бессеточные методы, в основе которых лежат геометрические соображения [16]. Предположим, что граничные условия на тензор напряжений имеют вид $\sigma_{ij}|_{\partial\Omega} = 0$. Предлагается искать решение уравнения (1) в виде

$$\sigma_{ij}(x) = \omega(x)\varphi_{ij}(x), \quad (5)$$

где ω – заранее заданная функция координат, описывающая геометрию конструкции, положительная внутри множества Ω и обращающаяся в нуль на границе $\partial\Omega$; φ_{ij} – неизвестное тензорное поле, описывающее НДС «бесконечной среды» (т.е. без учета граничного условия). Если в качестве ω используется функция с достаточно «хорошим» поведением, то поле φ может быть найдено из уравнения $\Sigma_j \partial(\omega \varphi_{ij}) + b_i = 0$ либо из его нелинейных аналогов классическими численными методами без разбиения на КЭ, в том числе аппроксимацией конечными суммами базисных функций, интегрированием с равномерным шагом и т.д. Концептуально проводится отделение геометрического представления модели задачи, выраженного функцией ω , от физического представления, выраженного полем φ . Существуют способы учесть в таком подходе и другие виды граничных условий, накладываемых на тензор напряжений.

Вычислительная эффективность такого метода зависит от выбора функции геометрии ω . Разные бессеточные методы предлагают разные критерии и алгоритмы выбора этой функции. Например, в методе Scan&Solve™, реализованном в виде подключаемого компонента для коммерческой системы инженерного анализа «Rhinoceros», $\omega(\mathbf{x})$ пропорционально евклидову расстоянию от \mathbf{x} до границы $\partial\Omega$, причем применяется патентованный алгоритм быстрого вычисления расстояния [1]. В функционально-воксельном моделировании [17] предлагается строить функцию геометрии ω для сложных конструкций, сочетая аналитические и графические приемы, с привлечением средств компьютерной алгебры и геометрии. Функции такого рода способны выразить без искажений реальную форму машиностроительных конструкций для бессеточного расчета нелинейных задач [18].

В целом есть основания предполагать, что бессеточные методы могут быть полезны при анализе разрушения конструкций летательных аппаратов. Предстоит реализовать и апробировать бессеточные методы на широком классе практически значимых расчетных задач и в случае успеха преодолеть инерцию мышления инженеров и рыночное доминирование систем инженерного анализа, ориентированных на метод КЭ. Реализация методов типа функционально-воксельных в описанном алгоритме станет значительным шагом в этом направлении.

Таким образом, алгоритм, предложенный в настоящей работе, реализуется на базе метода КЭ с привлечением задела в области конечно-элементного анализа, накопленного в МГТУ им. Н.Э. Баумана в тесном сотрудничестве с ООО НТЦ «АПМ» – производителем известной отечественной системы АПМ WinMachine [19]. Алгоритм в настоящее время апробируется в проектировании изделий аэрокосмической отрасли, накапливаются и верифицируются результаты конкретных расчетов. Альтернативная реализация алгоритма на базе бессеточных методов рассматривается в качестве более дальней перспективы.

Настоящая работа выполнена по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.574.21.0117 с Министерством образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) – RFMEFI57414X0117.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Freytag M., Shapiro V., Tsukanov I. Finite element analysis in situ // Finite Elements in Analysis and Design. 2011. Vol. 47. Iss. 9. P. 957–972.
2. Cranford S., Buehler M.J. Biomateriomics. N.Y.: Springer, 2012. 440 p.
3. Nelyub V.A., Berlin A.A. A study of the chemical structure of the surface of carbon fibers before and after oxidation // Polymer Science. Ser. D. 2015. Vol. 8. Iss. 3. P. 175–180.
4. Nelyub V.A. Determination of adhesion interaction between carbon fiber and epoxy binder // Polymer Science. Ser. D. 2015. Vol. 8. Iss. 1. P. 6–8.
5. Глушков С.В., Скворцов Ю.В. Вычисление параметров механики разрушения для цилиндрических панелей с несквозными трещинами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2014. № 3. С. 20–22.
6. Нухамкин М.Ш., Семенова И.В. Концентрация напряжений в лопатках компрессора при повреждении их посторонними предметами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 15–18.
7. Николаева Н.А. Основы механики разрушения. Пермь: ПГТУ, 2010. 102 с.
8. Леган М.А. Трехпараметрический интегральный критерий разрушения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1574–1575.
9. Мовчан Г.В. Исследование складчатых конструкций на ударную нагрузку // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 4. С. 64–65.
10. Alves L.M., de Lacerda L.A. Fractal fracture mechanics applied to materials engineering // Applied Fracture Mechanics. N.Y.: InTech, 2012. P. 67–106.

11. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: механика разрушения. М.: Ленанд, 2014. 456 с.
12. Zehnder A.T. Fracture mechanics. Springer, 2012. 224 p.
13. Camacho G.T., Ortiz M. Computational modelling of impact damage in brittle materials // International Journal of Solids and Structures. 1996. Vol. 33. Iss. 20–22. P. 2899–2938.
14. Moës N., Dolbow J., Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1999. Vol. 46. Iss. 1. P. 131–150.
15. Violeau D. Fluid mechanics and the SPH method. Oxford: Oxford University Press, 2012. 616 p.
16. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. М.: Физматлит, 1962. 709 с.
17. Григорьев С.Н., Локтев М.А., Толок А.В. Построение воксельных моделей геометрических объектов // Прикладная информатика. 2013. № 4. С. 50–55.
18. Лисин Д.А. и др. R-функции в компьютерном моделировании дизайна 3D-поверхности автомобиля // Прикладная информатика. 2011. № 6 (36). С. 78–85.
19. Запрудный А.А. Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine. М.: Изд-во АПМ, 2013. 144 с.

Поступила в редакцию 5.10.15

Multi-Criteria Analysis of Aircraft Structure Fracture

S.P. KOVALEV, V.A. NELYUB, AND V.V. SHELOFAST

A novel modular multistep algorithm is proposed for multi-criteria analysis of fracture of aircraft structures with complex geometries. In order to evaluate the algorithm, the crack growth analysis is realized by the following three criteria, namely, the stress intensity factor, the strain energy release rate, and the J-integral. The algorithm implementation by the finite element method is considered and prospects of alternative implementation based on the meshfree methods are assigned.

Computational fracture mechanics, strain energy release rate, modular algorithm, finite element method, meshfree methods