

УДК 629.7.017.1

М.Ш. Нихамкин, О.Л. Любчик, Л.В. Воронов, И.В. Семенова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ОТРАБОТКА СПОСОБА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА БИОМАССОЙ НА ОСНОВЕ БЕССЕТОЧНОГО МЕТОДА СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Рассматривается проблема оценки стойкости лопаток вентилятора газотурбинного двигателя к повреждению птицами. Для снижения затрат на проведение сертификационных испытаний разрабатывается методика численного моделирования высокоскоростного повреждения лопаток. Исследование направлено на отработку способа моделирования повреждения лопатки вентилятора биомассой на основе бессеточного метода сглаженных частиц в условиях, близких к эксплуатационным.

Ключевые слова: высокоскоростное повреждение, кинематическое упрочнение, модель Купера – Саймондса, метод конечных элементов, SPH-метод.

M.Sh. Nikhamkin, O.L. Lyubchik, L.V. Voronov, I.V. Semenova

Perm National Research Polytechnic University

THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF FAN BLADE BIOMASS DAMAGE MODELLING BASED ON SMOOTH PARTICLE HYDRODYNAMICS

The article is concerned with the problem of estimating the bird impact resistance of gas-turbine engine fan blades. The methodology of high rate blade damage numerical modeling is developed to reduce the cost of certification testing. This investigation is directed at the development of technology of fan blade biomass damage modeling based on smooth particle hydrodynamics in the conditions similar to serviceable condition.

Keywords: high rate damage, kinematic hardening, Cowper – Symonds model, finite element method, SPH-method.

Рабочие лопатки вентилятора относятся к числу основных деталей газотурбинных двигателей. Ярко выраженная тенденция к повышению надежности и безопасности авиационных судов отражается на требованиях стойкости лопаток вентилятора, в том числе и полый конструкции, к повреждению посторонними предметами (ППП). Актуальность проблемы подтверждается высоким процентом досрочного снятия двигателей с эксплуатации по причине ППП.

Посторонние предметы могут быть условно разделены на две группы: «мягкие тела» (биомасса, лед, вода) и «твердые тела» (кусочки бетона, гравий, металлические элементы). В настоящем исследовании внимание акцентировано на процессе повреждения лопатки вентилятора при попадании постороннего предмета – биомассы – в газоздушный тракт двигателя. Как показывает практика, после соударения с «мягкими телами» повреждения представляют собой вмятины и вмятины с разрывами [1] (рис. 1). При сертификации двигателей обязательным является проведение испытаний на стойкость к повреждениям. В соответствии с требованиями АП-33 предусмотрены испытания на попадание птиц массой до 2,75 кг при осевой скорости 100 м/с.



Рис. 1. Повреждение рабочих лопаток вентилятора двигателя ПС-90А от попадания птицы [1]

Для успешного проведения дорогостоящих сертификационных испытаний на стадии проектирования двигателя рациональным является проведение моделирующих расчетов. В случае моделирования повреждения лопатки вентилятора биомассой имеем дело с двумя объектами, один из которых (лопатка) ведет себя в соответствии с законами механики деформируемого твердого тела. Поведение другого объекта (биомассы) в общем случае должно рассматриваться иначе, поскольку механические свойства биомассы изменяются в зависимости от режима нагружения. На низких скоростях биомасса не может в общем рассматриваться как однородная и гомогенная. Однако на высоких скоростях становится возможным пренебрежение этой неоднородностью и гетерогенностью и биомасса может рассматриваться как гомогенная жидкость, налетающая на препятствие [2].

Постановка задачи

Отработка способа моделирования повреждения лопатки вентилятора полрой конструкции биомассой производилась на тестовой задаче в следующей постановке: повреждающий предмет – биомасса в форме куба размером $25 \times 25 \times 25$ мм движется под углом 90° к поверхности пластины размерами 200×75 мм и толщиной 1 мм по направлению к кромке в ее среднем сечении со скоростью 500 м/с (рис. 2). Пластина жестко закреплена в основании. Материал пластины – титановый сплав ВТ6. Свойства биомассы на основании источников [3, 4] полагаются близкими к свойствам воды.

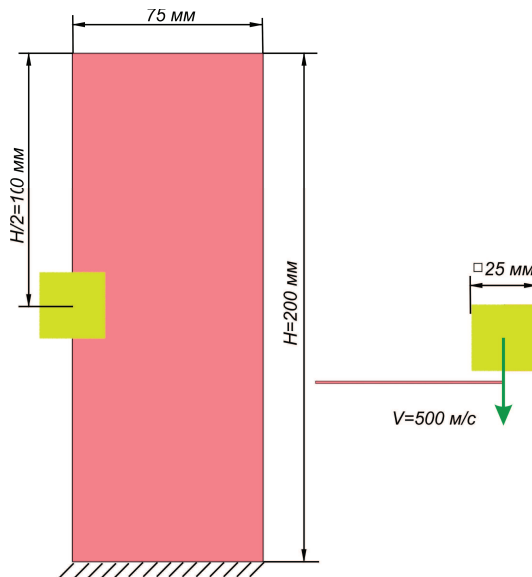


Рис. 2. Схема соударения пластины с биомассой

Для сформулированной выше трехмерной динамической задачи может быть записана математическая постановка. Движение точек среды известно, если известны функции, называемые законом движения точки:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t),$$

где \mathbf{x} – вектор координат точки деформируемой среды; \mathbf{X} – вектор координат точки в начальный момент времени. Для момента времени $t=0$ начальные условия записываются в виде (рис. 3)

$$\mathbf{x}(\mathbf{X}, 0) = \mathbf{X}, \quad \mathbf{x} \in B_{0 \text{ пласт}} \cup B_{0 \text{ п.п}};$$

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{X}, 0) = 0, \quad \mathbf{x} \in B_{0 \text{ пласт}};$$

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{X}, 0) = \mathbf{V}(\mathbf{X}), \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} 0 \\ -500 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ (м/с)}, \quad \mathbf{x} \in B_{0 \text{ п.п}}.$$

Решение трехмерной динамической задачи заключается в разрешении системы уравнений, в которую входит уравнение неразрывности, вытекающее из закона сохранения массы, уравнение сохранения количества движения, внутренней энергии, замыкает систему определяющее соотношение:

– уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i} \mathbf{v}_i = 0, \quad (1)$$

где ρ – истинная плотность среды; \mathbf{v} – вектор скоростей материала. Здесь и далее нижний индекс служит для обозначения координатных направлений, подразумевается суммирование по повторяющимся индексам;

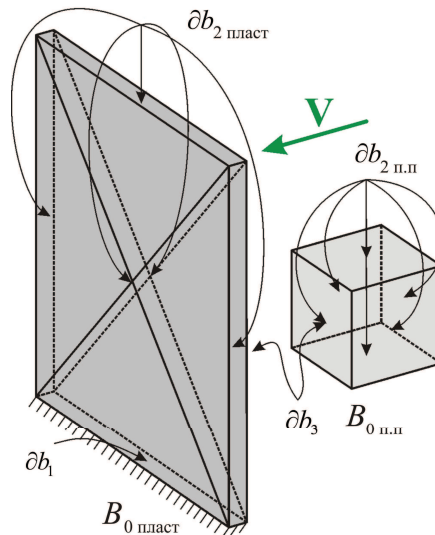


Рис. 3. Схема границ тел для задания начальных и граничных условий

– уравнение сохранения моментов

$$\frac{d}{dt} \mathbf{v}_i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} \boldsymbol{\sigma}_{ij}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений;

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\sigma}_{ij} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}, \quad (3)$$

где e – удельная внутренняя энергия; $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}$ – тензор скоростей деформации,

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial \mathbf{v}_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right); \quad (4)$$

– определяющие соотношения для сплава ВТ6 и биомассы

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = f(\boldsymbol{\epsilon}_{ij}, \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}). \quad (5)$$

Система дополнена граничными условиями (см. рис. 3):

– кинематические граничные условия в случае жесткой заделки повреждаемого образца по границе ∂b_1 :

$$\mathbf{x}(\mathbf{X}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial b_1;$$

– статические граничные условия в случае начального ненапряженного состояния свободной поверхности пластины $\partial b_{2 \text{ пласт}}$ и свободной поверхности повреждающего предмета $\partial b_{2 \text{ п.п}}$:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} \mathbf{n}_j = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial b_{2 \text{ пласт}} \cup \partial b_{2 \text{ п.п}};$$

– контактные граничные условия: на поверхности контакта ∂b_3 компоненты перемещений двух контактирующих поверхностей должны удовлетворять следующему ограничению:

$$(\mathbf{x}_i^1 - \mathbf{x}_i^2) \mathbf{n}_i^1 = 0,$$

где верхние индексы 1 и 2 показывают отношение к двум контактным поверхностям. Нормальные компоненты вектора напряжений на контактирующих поверхностях должны быть равны по модулю и

противоположны по знаку. Условие может быть записано в следующем виде:

$$\sigma_{ij}^1 n_i^1 n_j^1 - \sigma_{ij}^2 n_i^2 n_j^2 = 0.$$

Дискретизация разрешающей системы уравнений

В системах автоматизированного инженерного анализа, предназначенных для решения трехмерных динамических нелинейных задач с использованием численных методов, применяется несколько подходов к описанию движения деформируемой сплошной среды. К ним относятся лагранжевый, эйлеровый, лагранжево-эйлеровый подходы, бессеточный метод сглаженных частиц (в иностранной литературе Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)) [5].

В настоящем исследовании для отработки методов численного моделирования соударения биомассы с лопаткой вентилятора было принято для описания лопатки использовать лагранжевый подход. При использовании лагранжевого подхода для формирования системы уравнений метода конечных элементов применяется принцип виртуальной работы. При этом поля перемещений, скоростей и ускорений в элементах аппроксимируются по дискретным значениям в узлах через функции формы конечного элемента.

Для описания поведения биомассы в исследовании использовался бессеточный метод сглаженных частиц (SPH-метод), разработанный Люси, Гингломом и Монаганом в 1977 году. Метод позволяет избежать искривления конечно-элементной сетки при решении задач с экстремальными деформациями, поэтому широко применяется для решения задач непрерывной механики, моделирования разрушения пластичных и хрупких структур.

С точки зрения вычислений в SPH-методе материал представляется набором частиц $\mathbf{x}_k(t)$ $k \in \{1 \dots M\}$, где $\mathbf{x}_k(t)$ – вектор координат k -й частицы; M – общее количество частиц, заполняющих область Ω и движущихся вдоль поля скоростей \mathbf{v} . Каждая частица является точкой интерполяции, в которой известны свойства материала (координаты, масса, скорость, плотность, давление). Частицы являются вычислительным каркасом, на котором разрешаются управляющие соотношения. Используется интегральное представление характеристик материала в виде

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\tilde{\mathbf{x}}) \delta(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) d\tilde{\mathbf{x}},$$

где δ – дельта-функция Дирака. Вышеприведенный интеграл аппроксимируется интегралом следующего вида:

$$f(\mathbf{x}) \approx \int_{\Omega} f(\tilde{\mathbf{x}}) W(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}, h) d\tilde{\mathbf{x}}$$

с весовой функцией W , или функцией сглаживающего ядра. Поточечная аппроксимация функции $f(\mathbf{x})$ записывается в виде

$$\Pi^h f(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^N w_k(t) f(\mathbf{x}_k) W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k, h),$$

где $w_k = \frac{m_k}{\rho_k}$ – «вес» k -й частицы, равный массе, деленной на плотность;

N – количество соседних к k -й частиц. Соседними к данной k -й частице являются такие частицы, расстояние от которых до данной частицы не превосходит сглаживающей длины h (рис. 4).

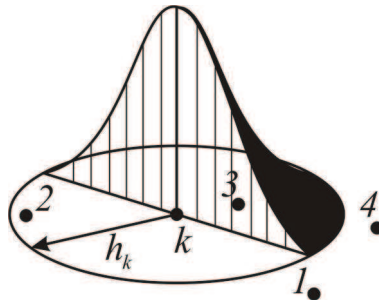


Рис. 4. К заданию весовой функции

К весовой функции предъявляются следующие требования:

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k, h) = 0, \quad (\mathbf{x} - \mathbf{x}_k) > h,$$

$$\int_{\Omega} W(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}, h) d\tilde{\mathbf{x}} = 1,$$

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k, h) \rightarrow \delta \text{ при } h \rightarrow 0.$$

В качестве весовой функции обычно используют полиномиальные сплайны. Задание весовой функции возможно с использованием вспомогательной функции θ – кубического β -сплайна:

$$\theta(y) = C \cdot \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}y^2 + \frac{3}{4}y^3 & |y| \leq 1, \\ \frac{1}{4}(2-y)^3 & 1 < |y| \leq 2, \\ 0 & |y| > 2, \end{cases}$$

где C – постоянная нормализации, которая зависит от размерности пространства. Весовая функция имеет следующий вид:

$$W(\mathbf{x}, h) = \frac{1}{h(\mathbf{x})^d} \theta(\mathbf{x}),$$

где d – размерность пространства; h – сглаживающая длина, изменяющаяся во времени и пространстве.

SPH-метод, как и метод конечных элементов, используется для дискретизации системы разрешающих уравнений (1)–(5). После дискретизации система (1)–(5) принимает вид [6]:

– уравнение неразрывности

$$\rho_l = \sum_k m_k W_{lk},$$

где $W_{lk}(\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_k, h)$ – весовая функция, обозначена для простоты W_{lk} ;

– уравнение сохранения моментов

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{v}_i)_l = \sum_k m_k \left(\frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_l}{\rho_l^2} + \frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_k}{\rho_k^2} \right) \frac{\partial W_{lk}}{\partial (\mathbf{x}_j)_l};$$

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{de_l}{dt} = \frac{1}{2} \sum_k m_k \left((\mathbf{v}_i)_k - (\mathbf{v}_i)_l \right) \left(\frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_l}{\rho_l^2} + \frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_k}{\rho_k^2} \right) \frac{\partial W_{lk}}{\partial (\mathbf{x}_j)_l}.$$

Конечно-элементная модель пластины и SPH-модель биомассы

Решение поставленной трехмерной динамической задачи реализовано при помощи программного комплекса ANSYS с применением встроенного решателя LS-DYNA с явной схемой интегрирования по времени. Для дискретизации пластины используется призматический изопараметрический 8-узловой элемент solid164 первого порядка аппроксимации с тремя узловыми неизвестными. Сетка пластины регулярная с характерным размером элемента 1 мм, по толщине пластины задано три слоя элементов (толщина элемента 0,33 мм) (рис. 5). В модели пластины 45 000 элементов, 61 104 узла.

Биомасса дискретизируется набором частиц. Расстояние между частицами – 0,5 мм, количество частиц в модели – 132 651 (см. рис. 5).

Модель поведения материала пластины

Модель поведения материала конкретизирует общую формулировку физических соотношений $\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij})$. Для описания поведения материала при высоких скоростях деформирования в исследовании используется модель Купера – Саймондса [7], которая учитывает кинематическое упрочнение и позволяет описывать зависимость предела текучести от скорости деформации. В LS-DYNA используемая модель поведения материала реализована в модели Piecewise Linear Plasticity Model (кусочно-линейная пластическая модель).

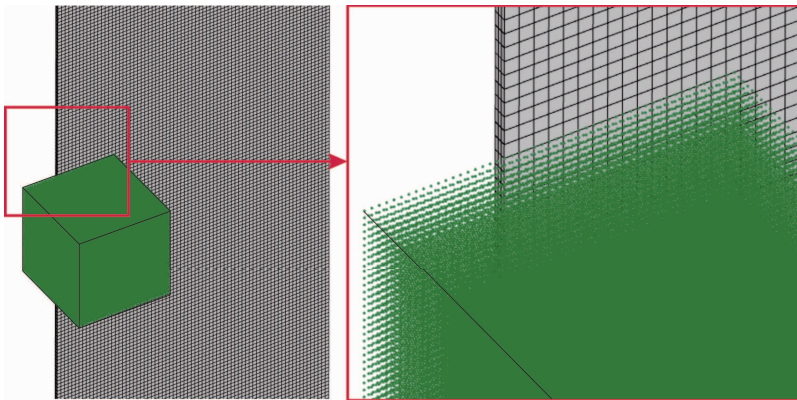


Рис. 5. Конечно-элементная сетка на модели пластины и сглаженные частицы повреждающего предмета – биомассы

В соответствии с моделью Piecewise Linear Plasticity производная тензора напряжений по времени записывается в виде

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij} = \boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\nabla} + \boldsymbol{\sigma}_{ik} \boldsymbol{\omega}_{kj} + \boldsymbol{\sigma}_{jk} \boldsymbol{\omega}_{ki},$$

где $\boldsymbol{\omega}_{kj}$ – тензор спин,

$$\boldsymbol{\omega}_{kj} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \mathbf{x}_j} - \frac{\partial \mathbf{v}_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right);$$

$\boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\nabla}$ – коротационная производная Яуманна, используемая для учета вращения среды как абсолютно жесткого тела,

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\nabla} = \mathbf{C}_{ijkl} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{kl},$$

где \mathbf{C}_{ijkl} – матрица упругих коэффициентов физических соотношений.

В тензоре напряжений $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ выделяют шаровую и девиаторную части:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = -P\delta_{ij} + \mathbf{s}_{ij},$$

где P – давление; \mathbf{s}_{ij} – компоненты девиатора напряжений. В упругом материале коротационная производная Яуманна девиатора тензора напряжений Коши имеет вид

$$\mathbf{s}_{ij}^{\nabla} = 2G\dot{\boldsymbol{\epsilon}}'_{ij},$$

давление

$$P = -K \ln V,$$

где $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}'$ – девиатор тензора скоростей деформации; G – упругий модуль сдвига; K – объемный модуль; V – относительный объем (отношение текущего объема к начальному).

Компоненты девиатора напряжений обновляются упруго до тех пор, пока удовлетворяют функции текучести

$$\varphi = \frac{1}{2} \mathbf{s}_{ij} \mathbf{s}_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0.$$

где σ_y – динамический предел текучести.

В соответствии с моделью кинематического упрочнения Купера – Саймондса определяется значение динамического предела текучести:

$$\sigma_y = \sigma_0 \beta, \quad \beta = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}},$$

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\mathbf{s}}_{ij} \cdot \dot{\mathbf{s}}_{ij}},$$

где σ_0 – статический предел текучести; β – масштабирующий коэффициент; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; C, P – константы материала.

Если девиатор напряжений не удовлетворяет функции текучести, то вычисляется приращение эффективной пластической деформации

$$\Delta \varepsilon_{\text{eff}}^p = \frac{\left(\frac{3}{2} \mathbf{s}_{ij}^* \cdot \mathbf{s}_{ij}^* \right)^{\frac{1}{2}} - \sigma_y}{3G + E_p},$$

где модуль пластического упрочнения E_p определяется через модуль упругости E и модуль упрочнения E_t :

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t}.$$

Для удовлетворения функции текучести пробные значения девиатора напряжений \mathbf{s}_{ij}^* масштабируются:

$$\mathbf{s}_{ij} = \frac{\sigma_y}{\left(\frac{3}{2} \mathbf{s}_{ij}^* \cdot \mathbf{s}_{ij}^* \right)^{\frac{1}{2}}} \mathbf{s}_{ij}^*.$$

В таблице приведены принятые в расчетах по данным [8–10] характеристики материала пластины – титанового сплава ВТ6.

Характеристики сплава ВТ6, принятые в расчетах (по данным [8–10])

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Плотность ρ , кг/м ³	4,43·10 ³
2	Модуль упругости E , МПа	122 630
3	Коэффициент Пуассона μ	0,3
4	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	910

Окончание таблицы

№ п/п	Характеристика	Значение
5	Модуль упругости E , МПа	307
6	C	20 000
7	P	3

На рис. 6 представлена билинейная модель деформирования титанового сплава ВТ6 с учетом скоростного упрочнения при скорости деформации $\dot{\epsilon}=10^4$.

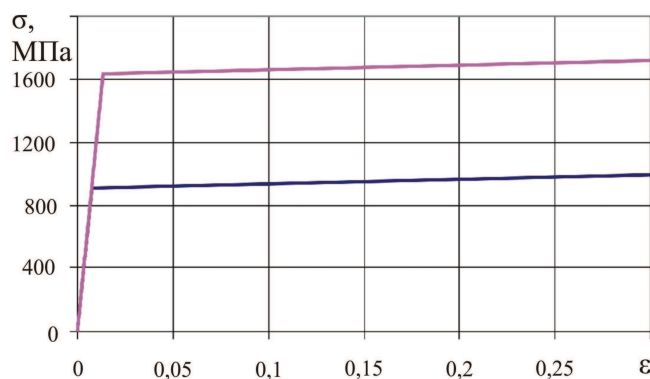


Рис. 6. Модель деформирования титанового сплава ВТ6: нижняя кривая – при статическом нагружении; верхняя кривая – с учетом скоростного упрочнения при $\dot{\epsilon}=10^4$

Разрушение материала лопатки моделируется удалением элементов, в которых эффективная пластическая деформация ϵ_{eff}^p превышала предельное значение $\epsilon_B = 0,4$, принятое по экспериментальным данным.

Модель поведения материала биомассы

Определяющими соотношениями будут две независимые составляющие: уравнение состояния (зависимость, связывающая давление и плотность) как мера объемной сжимаемости и зависимость девиаторных компонент тензора напряжений от девиаторных компонент тензора деформаций как мера формоизменения.

Для моделирования биомассы используется реализованная в LS-DYNA модель материала MAT_NULL. Характер его поведения под нагрузкой аналогичен реакции вязкопластического материала с нуле-

выми компонентами девиатора напряжений. В модели материала MAT_NULL использована плотность биомассы 900 кг/м^3 . Для определения зависимости давления от изменения объема используется уравнение состояния воды, заданное таблично.

Результаты

В результате моделирования процесса соударения пластины с биомассой получены поля напряжений и деформаций в процессе соударения, значения пластических деформаций и остаточных напряжений, геометрические параметры повреждения.

На рис. 7 представлен процесс соударения пластины с биомассой и распространение волн нормальных напряжений σ_y . В процессе соударения биомасса охватывает значительную часть кромки пластины, отгибая ее в сторону направления удара и образуя вмятину. Характер деформирования пластины в процессе соударения зависит от используемого критерия разрушения. В принятой постановке критерием разрушения является предельная деформация, поэтому оценка распределения напряжений носит качественный характер. В зоне вмятины с внешней стороны возникают значительные растягивающие напряжения, достигающие значения 2000 МПа. По границам вмятины на рис. 7 видна обширная область сжимающих напряжений от -240 до 1200 МПа. Частицы биомассы в процессе соударения «разлетаются». Соударение длится около 190 мкс.

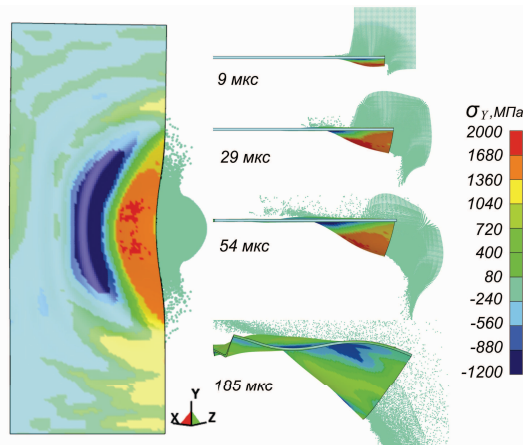


Рис. 7. Процесс соударения пластины с биомассой

Повреждение, полученное моделированием, представляет собой вмятину-отгиб, занимающую большую часть пластины. Размеры показаны на рис. 8. Зоны пластических деформаций располагаются на кромке, на краях вмятины-отгиба и в местах заделки пластины (см. рис. 8).

При значительных перемещениях точек кромки пластины (прогиб 30 мм) вследствие ее деформирования максимальные значения пластической деформации не превышают 10 %.

Поле остаточных напряжений, полученное после окончания соударения и упругой разгрузки, показано на рис. 9. Остаточные напряжения охватывают практически всю пластину. Растягивающие напряжения имеют место на внешней стороне вмятины-отгиба и на недеформированном крае пластины. Их значения изменяются в пределах 0–900 МПа, локально возрастая до 900–1500 МПа. Сжимающие остаточные напряжения локализуются во внутренней области повреждения и распространяются вдоль внешнего края вмятины-отгиба. Их значения достигают –1500 МПа.

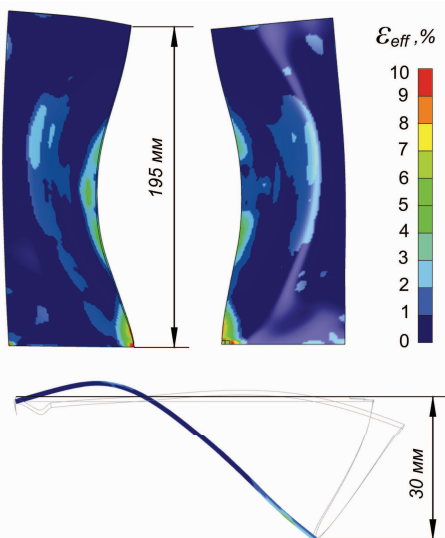


Рис. 8. Пластические деформации и размеры повреждения при соударении пластины с биомассой

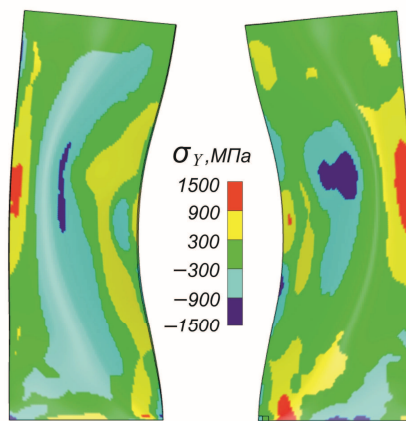


Рис. 9. Остаточные напряжения в пластине

В результате математического моделирования получено повреждение (вмятина), типичное для соударения с «мягкими телами». Сравнение геометрии модельного повреждения пластины от попадания био-

массы с повреждением лопатки вентилятора двигателя ПС-90А от попадания птицы [2] показывает качественное согласование результатов расчета и эксперимента (рис. 10).

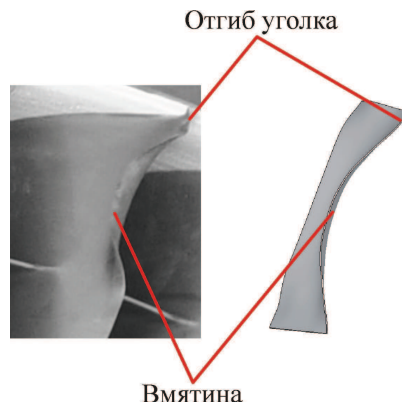


Рис. 10. Сравнение экспериментального повреждения и повреждения, полученного математическим моделированием

В результате проведенного исследования разработана методика математического моделирования повреждения лопатки вентилятора биомассой. Показана эффективность использования бессеточного метода сглаженных частиц применительно к задачам высокоскоростного повреждения лопаток при попадании на вход двигателя птиц. В результате проведенных расчетов получены параметры повреждения пластины, поля пластических деформаций и остаточных напряжений для тестовой задачи. Полученные расчетные данные должны быть верифицированы по результатам дополнительного экспериментального исследования.

Библиографический список

1. Двигатель ПС-90А2, ПС-90А. Расчетная сравнительная стойкость лопаток вентилятора 94-01-2591 и 93-01-001 к попаданию посторонних предметов. Техническая справка № 44650 / ОАО «Авиадвигатель». – Пермь, 2005. – 23 с.
2. Wilbeck J.S. Impact behavior of low strength projectiles. Air Force Materials Lab, Air Force Wright Aeronautical Labs. Report No. AFML-TR-77-134, Wright-Patterson Air Force Base, OH, 1977.

3. Meguid S.A., Mao R.H., Ng T.Y. FE analysis of geometry effects of an artificial bird striking an aeroengine fan blade // International Journal of Impact Engineering. – 2008. – No. 35. – P. 487–498.

4. Bird strike analysis of aircraft engine fan / Y.N. Shmotin, P.V. Chupin, D.V. Gabov [et al.] // Proceedings of the 7th European LS-DYNA Users Conference [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dynalook.com/european-conf-2009/H-I-03.pdf>.

5. Муйземнек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учеб. пособие. – Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2005. – 106 с.

6. Monaghan J.J. An Introduction to SPH // Computer Physics Communications. – 1988. – No. 48. – P. 89–96.

7. Dietenberger M., Buyuk M., Kan C. Development of a high strain-rate dependent vehicle model // 4th German LS-DYNA Forum. – Bamberg, 2005.

8. ООО «Компоненты двигателя». – URL: <http://www.titanium-valve.com>.

9. Duó P., Korsunsky A.M., Nowell D. Residual Stresses induced by Foreign Object Damage on Gas Turbine Blades: an Experimental Approach // Proc. ICEM 12. 12th International Conference on Experimental Mechanics, Bari, Italy, 29th August – 2nd September 2004.

10. Chen X. Foreign object damage on the leading edge of a thin blade // Mechanics of Materials. – 2005. – No. 37. – P. 447–457.

References

1. *Dvigatel PS-90A2, PS-90A. Raschetnaya sravnitel'naya stoykost lopatok ventilyatora 94-01-2591 i 93-01-001 k popadaniyu postoronnikh predmetov. Tekhnicheskaya spravka № 44650* [The engines PS-90A2, PS-90A. Durability blades comparative rating of fans 94-01-2591 and 93-01-001 when the penetration of foreign objects. Technical certificate № 44650]. OAO Aviadvigatel, Perm, 2009, 23 p.

2. Wilbeck J.S. Impact behavior of low strength projectiles. Air Force Materials Lab, Air Force Wright Aeronautical Labs. Report no. AFML-TR-77-134, Wright-Patterson Air Force Base, OH, 1977.

3. Meguid S.A., Mao R.H., Ng T.Y. FE analysis of geometry effects of an artificial bird striking an aeroengine fan blade. International Journal of Impact Engineering, 2008, no. 35, pp. 487–498.

4. Shmotin Y.N., Chupin P.V., Gabov D.V. [et al.] Bird strike analysis of aircraft engine fan. Proceedings of the 7th European LS-DYNA Users Conference.

5. Muyzemnek A.Y., Bogach A.A. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov udara i vzryva v programme LS-DYNA* [Mathematical modeling of impact and explosion processes in LS-DYNA]. Penzenskiy gosudarstvennyy universitet, 2005, 106 p.

6. Monaghan J.J. An Introduction to SPH. Computer Physics Communications, 1988, no. 48, pp. 89–96.

7. Dietenberger M., Buyuk M., Kan C. Development of a high strain-rate dependent vehicle model. 4th German LS-DYNA Forum, Bamberg, 2005.

8. *ООО «Компоненты двигателя»*. Available at <http://www.titanium-valve.com>.

9. Duó P., Korsunsky A.M., Nowell D. Residual Stresses induced by Foreign Object Damage on Gas Turbine Blades: an Experimental Approach. Proc. ICEM 12. 12th International Conference on Experimental Mechanics, Bari, Italy, 29th August – 2nd September 2004.

10. Chen X. Foreign object damage on the leading edge of a thin blade. Mechanics of Materials, 2005, no. 37, pp. 447–457.

Об авторах

Нихамкин Михаил Шмерович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, зам. заведующего кафедрой «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nikhamkin@mail.ru).

Любчик Ольга Леонидовна (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: olga-l-voronova@yandex.ru).

Воронов Леонид Васильевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: leonid-voronov@yandex.ru).

Семенова Ирина Валерьевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: javeline@mail.ru).

About the authors

Nikhamkin Michail Shmerovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: nikhamkin@mail.ru).

Lyubchik Olga Leonidovna (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: olga-l-voronova@yandex.ru).

Voronov Leonid Vasilyevich (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department_of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: leonid-v-voronov@yandex.ru).

Semenova Irina Valeryevna (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: javeline@mail.ru).

Получено 2.04.2012