

УДК 621.431.75

**Моделирование методом сглаженных частиц повреждения  
посторонними предметами полрой лопатки вентилятора  
газотурбинного двигателя**

**Нихамкин М.Ш.\* , Воронов Л.В.\*\* , Любчик О.Л.\*\*\***

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

*(ПНИПУ), Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990, Россия*

*\*e-mail: [nikhamkin@mail.ru](mailto:nikhamkin@mail.ru)*

*\*\* e-mail: [leonid-v-voronov@yandex.ru](mailto:leonid-v-voronov@yandex.ru)*

*\*\*\* e-mail: [olga-l-voronova@yandex.ru](mailto:olga-l-voronova@yandex.ru)*

**Аннотация**

Статья посвящена проблеме обеспечения стойкости к баллистическим повреждениям посторонними предметами лопаток вентилятора газотурбинных двигателей. Разработана и верифицирована по результатам специальных экспериментов методика численного моделирования высокоскоростного повреждения камнем входной кромки полрой титановой лопатки вентилятора с использованием бессеточного метода сглаженных частиц. Методика позволяет исследовать процессы высокоскоростного соударения лопатки с повреждающим предметом, учитывает деформационное и скоростное упрочнение, возможность разрушения лопатки и повреждающего предмета, позволяет получать геометрические параметры повреждения, поля остаточных напряжений и деформаций.

**Ключевые слова:** лопатка вентилятора, повреждение посторонними предметами, метод конечных элементов, бессеточный метод сглаженных частиц

## **Введение**

Применение рабочих лопаток вентилятора полый сварной конструкции является одной из принципиальных особенностей авиационных газотурбинных двигателей нового поколения [1-3]. Применение таких лопаток позволяет снизить массу, облегчается решение проблемы непробиваемости корпуса вентилятора в случае обрыва лопатки, появляются дополнительные возможности управления собственными частотами для отстройки от резонансных колебаний. Для обеспечения прочностной надежности таких лопаток наряду с проблемами статической и динамической прочности необходима оценка их стойкости к эксплуатационным повреждениям посторонними предметами (ППП). Они могут привести к усталостному разрушению лопаток и стать причиной катастрофических последствий. Мировой опыт эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей показывает, что ППП в 30...40% случаев является причиной досрочного снятия двигателей с эксплуатации [4].

Исследованию процессов ППП лопаток посвящен широкий круг экспериментальных и расчетных работ [5-16]. Условно, по характеру повреждений, повреждающие предметы разделяют на «твердые тела» (бетонная крошка, камни, крепеж и т.д.), создающие повреждения в виде забоин и «вырывов» материала, и «мягкие тела» (лед, птицы и т.д.), создающие повреждения в виде вмятин и отгибов

[4]. Экспериментальное моделирование процесса ППП обычно состоит в воспроизведении с помощью пневматической пушки соударения постороннего предмета с лопаткой или имитирующим ее образцом и последующем анализе характера и параметров повреждения, полей остаточных напряжений и деформаций, оценке концентрации напряжений и остаточной усталостной прочности [5-7, 11,12, 15-17].

Математическое моделирование [8-14] проводится методом конечных элементов в нестационарной динамической постановке. При этом наибольшую сложность представляет выбор модели деформационного поведения и разрушения как материала лопатки, так и повреждающего предмета. В работе [13] с целью отработки моделей деформационного поведения материала лопатки проведено экспериментально-расчетное моделирование соударения образцов из титанового сплава ВТ6 с абсолютно упругим телом. В работе [14] сделана попытка расчетного моделирования баллистического повреждения входной кромки полноразмерной лопатки вентилятора льдом.

Цель настоящей работы состояла в разработке методики численного моделирования повреждения лопатки камнем, выявлении закономерностей повреждения, оценки влияния кинематических параметров повреждающего предмета на характеристики повреждения.

### **Постановка задачи**

Объектом проведенного исследования является полая крупногабаритная широкохордная рабочая лопатка вентилятора (рис.1). Лопатка изготавливается из

титанового сплава ВТ6 методом совмещения сверхпластической формовки и сварки давлением) [1,2].



Рис.1. Объект исследования - полая крупногабаритная рабочая лопатка вентилятора

Разработка методики расчетного моделирования производилась на основании численной реализации экспериментов по высокоскоростному повреждению образцов-имитаторов входной кромки лопатки вентилятора из сплава ВТ6 с использованием установки на базе газовой пушки (рис. 2).

Экспериментальные образцы, имитирующие входную кромку лопатки, (рис. 3) представляли собой пластину высотой 100 мм постоянного сечения, соответствующего профилю входной кромки лопатки вентилятора на высоте 1/3 длины пера лопатки от корневого сечения, с двумя технологическими хвостовиками.

Исследовали два варианта повреждающего предмета (ПП), имитирующего камень: кварцевый шар  $\phi 10$ мм и гранитный шар  $\phi 20$ мм.

Методика эксперимента заключается в следующем. Образец закрепляется консольно за технологический хвостовик в устройстве позиционирования. Повреждающий предмет (кварцевый шар, гранитный шар) разгоняется в разгонной трубе газовой пушки и движется поступательно со скоростью  $V$  по направлению к

входной кромке лопатки. Скорость повреждающего предмета перед соударением фиксировалась электронным измерителем скорости. Процесс соударения фиксировался высокоскоростной видеокамерой с частотой 10000 кадр/с. В экспериментах реализованы скорости соударения до 520 м/с. Остаточные деформации образца вблизи зоны повреждения определялись методом делительных сеток.

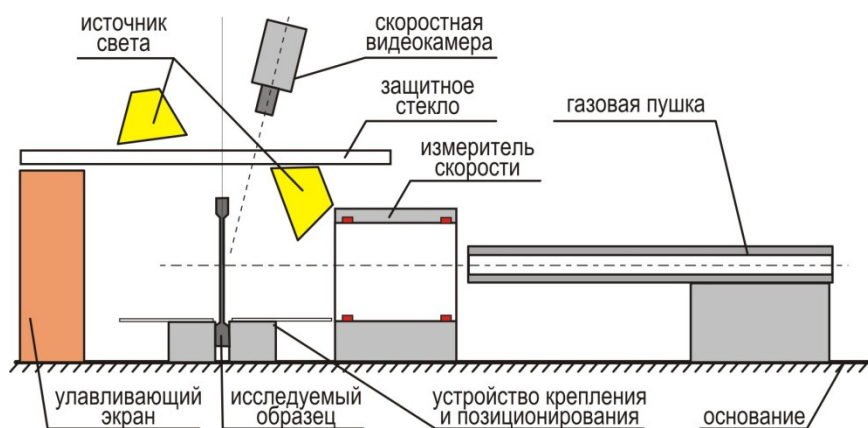


Рис.2. Схема экспериментальной установки

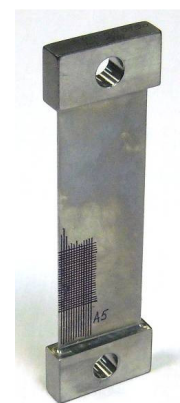


Рис.3. Образец – имитатор входной кромки лопатки

Постановка задачи расчетного моделирования сформулирована следующим образом. Образец-имитатор (рис. 4) из титанового сплава ВТ6 считается жестко закрепленным по боковым поверхностям нижнего технологического хвостовика. Поведение материала образца предполагает возможность появления пластических деформаций и разрушения.

Повреждающий предмет (кварцевый или гранитный шар) движется поступательно по направлению к входной кромке под углом  $\alpha$  к средней линии профиля на высоте  $h$  от нижнего технологического хвостовика. Вектор его скорости  $V_0$  направлен по касательной к дуге окружности, описывающей кромку имитатора.

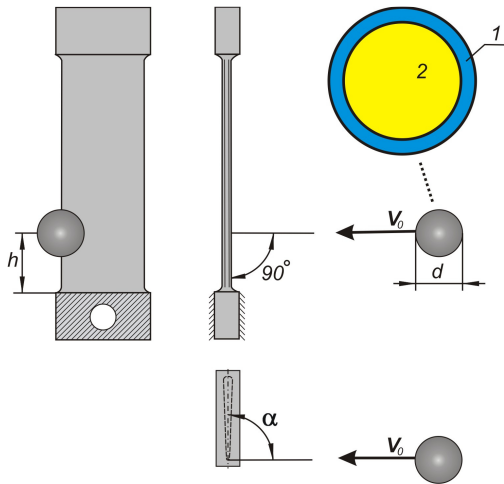


Рис.4. К постановке задачи

математического моделирования

Повреждающий предмет представляется состоящим из оболочки 1 (см. рис. 4) и наполнителя 2. Оболочка толщиной 0,1 диаметра считается упругой, допускается возможность ее разрушения по критерию превышения первым главным напряжением  $\sigma_1$  предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ :  $\sigma_1 > \sigma_{сж}$ . Наполнитель считается жидкостью, обладающей объемной упругостью.

Задача состоит в описании процесса динамического деформирования и разрушения образца и повреждающего предмета при соударении и определении формы и размеров повреждения образца, полей остаточных деформаций и напряжений в нем, а также определении кинематических параметров повреждающего предмета после соударения.

### Методика математического моделирования

Поставленная задача представляет собой динамическую задачу механики сплошной среды о контактном взаимодействии двух тел: образца ( $V_{SP}$ ) и повреждающего предмета ( $V_{FO}$ ). Она сводится к разрешению системы уравнений, в которую входят [18]: уравнение неразрывности, вытекающее из закона сохранения массы, уравнение сохранения количества движения, уравнение сохранения энергии, замыкает систему определяющее соотношение:

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

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

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\sigma}_{ij} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}, \quad \mathbf{x} \in V_{SP} \cup V_{FO}, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = f(\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}), \quad \mathbf{x} \in V_{SP} \cup V_{FO}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t)$  - вектор координат точки деформируемой среды,  $\mathbf{X}$  – вектор координат точки в начальный момент времени  $t=0$ ,  $\mathbf{v}$  – вектор скоростей материала,  $\rho$  – истинная плотность среды,  $e$  – удельная внутренняя энергия,  $\boldsymbol{\sigma}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$  – тензоры напряжений, деформаций и скоростей деформации.

Тензор скоростей деформации связан с вектором скорости соотношением:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial \mathbf{v}_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right), \quad (5)$$

Здесь и далее нижний индекс служит для обозначения координатных направлений, подразумевается суммирование по повторяющимся индексам.

В начальный момент времени образец занимает положение, обозначенное  $V_{OSP}$ , а повреждающий предмет  $V_{OFO}$ . Начальные условия при  $t = 0$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\mathbf{X}, 0) &= \mathbf{X}, \quad \mathbf{x} \in V_{OSP} \cup V_{OFO}, \\ \dot{\mathbf{x}}(\mathbf{X}, 0) &= 0, \quad \mathbf{x} \in V_{OSP}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{X}, 0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\mathbf{v}_0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} \in V_{OFO},$$

Система (1- 4) дополнена следующими граничными условиями:

- кинематические граничные условия в заделке образца по границе  $\partial b_1$ :

$$\mathbf{x}(\mathbf{X}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial b_1, \quad (7)$$

– статические граничные условия на свободной поверхности образца  $\partial b_{2SP}$  и повреждающего предмета  $\partial b_{2FO}$ :

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} \mathbf{n}_j = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial b_{2SP} \cup \partial b_{2FO} \quad (8)$$

– контактные граничные условия на поверхности контакта  $\partial b_3$ :

$$(\mathbf{x}_i^1 - \mathbf{x}_i^2) \mathbf{n}_i^1 = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial b_3, \quad (9)$$

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:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}^1 \mathbf{n}_i^1 \mathbf{n}_j^1 - \boldsymbol{\sigma}_{ij}^2 \mathbf{n}_i^2 \mathbf{n}_j^2 = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial b_3. \quad (10)$$

Численное решение поставленной задачи строилось на совместном использовании метода конечных элементов в трехмерной нестационарной динамической постановке и бессеточного метода сглаженных частиц [18].  
Используется явная схема интегрирования по времени.

Для описания поведения образца и внешней оболочки ПП использован метод конечных элементов с лагранжевым подходом к описанию движения деформируемой сплошной среды. Конечно-элементные сетки построены с использованием объемных тетраэдральных 10-ти узловых элементов второго



порядка. Конечно-элементная модель образца (рис.5,а) состояла из 196751 элементов. Оболочка повреждающего предмета (рис.5,б) состояла из трех слоев (101699 элементов) в случае диаметра ПП 10 мм и из шести слоев (353262 элементов) в случае диаметра ПП 20 мм.

Для описания поведения вязко-пластической среды, заключенной внутри оболочки ПП, использован бессеточный метод сглаженных частиц (SPH метод) [18], который позволяет избежать искривления конечно-элементной сетки при решении задач с экстремальными деформациями. Материал дискретизируется частицами, расстояние между которыми составляет 0,2 мм, характер распределения регулярный (рис.5,в). Количество частиц внутри оболочки при диаметре ПП 10 мм – 33371, при диаметре ПП 20 мм – 157618.

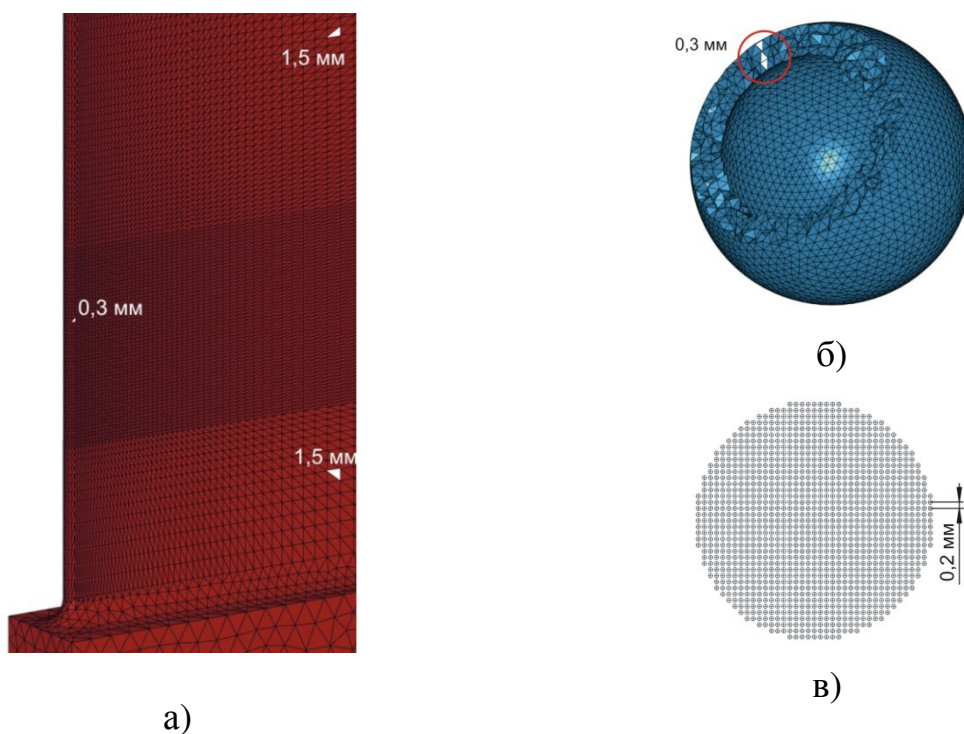


Рис. 5. Конечно-элементная модель образца (а) и оболочки ПП (б) и дискретизация среды внутри оболочки ПП (в)

Метод конечных элементов сводит решение системы уравнений (1) – (5) к матричному уравнению:

$$\mathbf{M} \mathbf{a} = \mathbf{F}_{\text{int}} + \mathbf{F}_{\text{ext}}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{a}$  – вектор узловых ускорений;  $\mathbf{M}$  – матрица масс;  $\mathbf{F}_{\text{int}}$  и  $\mathbf{F}_{\text{ext}}$  – векторы внутренних и внешних сил:

$$\mathbf{M} = \sum_e \int_{V_e} \rho \mathbf{N} \mathbf{N}^T dV, \quad \mathbf{F}_{\text{int}} = \sum_e \int_{V_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV, \quad \mathbf{F}_{\text{ext}} = \sum_e \left[ \int_{V_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV + \int_{\partial b_1} \mathbf{N}^T \mathbf{t} dS \right], \quad (12)$$

где  $\mathbf{N}$  – матрица интерполяции, составленная из функций формы конечного элемента,  $\mathbf{B}$  – матрица градиентов,  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{t}$  – векторы объемных и поверхностных усилий в элементе, суммирование – по всем конечным элементам.

В SPH методе сплошную среду представляют набором  $M$  частиц, каждая из которых характеризуется вектором координат  $\mathbf{x}_k(t)$   $k \in \{1..M\}$ . Каждая частица является точкой интерполяции, в которой известны координаты, масса, скорость, плотность, давление. Частицы являются вычислительным каркасом, на котором разрешается краевая задача. После дискретизации с использованием SPH метода уравнения (1)-(3) принимают вид [18]:

$$\rho_l = \sum_k m_k W_{lk}, \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{v}_i)_l = \sum_k m_k \left( \frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_l}{\rho_l^2} + \frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_k}{\rho_k^2} \right) \frac{\partial W_{lk}}{\partial (\mathbf{x}_j)_l}, \quad (14)$$

$$\frac{de_l}{dt} = \frac{1}{2} \sum_k m_k \left( (\mathbf{v}_i)_k - (\mathbf{v}_i)_l \right) \left( \frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_l}{\rho_l^2} + \frac{(\boldsymbol{\sigma}_{ij})_k}{\rho_k^2} \right) \frac{\partial W_{lk}}{\partial (\mathbf{x}_j)_l} \quad (15)$$

где  $m_k$  – масса частицы,  $\rho_l$  – плотность,  $W_{lk}$  весовые функции.

Особенность задачи – граничные условия контакта в зоне соударения повреждаемого образца и ПП, изменяющиеся во времени размеры и форма площадки контакта, нагрузки на этой площадке. Контакт между поверхностями образца и оболочки ПП, образованными конечными элементами, моделируется с помощью алгоритма штрафа [19]. В случае, когда одна поверхность (образца) образована конечными элементами, а другая (ПП) частицами, контакт описывается моделью мягкой реакции связи [19].

### **Определяющие соотношения**

Для описания деформационного поведения и разрушения материала образца-имитатора – титанового сплава ВТ6 – использовали модель упруго-пластического материала с линейным деформационным упрочнением. Особенностью условий баллистического повреждения лопаток является высокая скорость деформации – до  $10^6 \text{ с}^{-1}$  [20]. Существуют несколько моделей разной степени сложности, описывающих кинематическое упрочнение металлов [13, 21-23]. В работе [13] проведена верификация модели Джонсона-Кука (Johnson and Cook) с использованием экспериментальных данных о высокоскоростном соударении пластины со стальным шаром, и показано, что деформационное поведение и разрушение сплава ВТ6 в рассматриваемых условиях хорошо описывается этой моделью.

В модели Джонсона-Кука динамический предел текучести  $\sigma_Y$  зависит от эффективной пластической деформации  $\varepsilon_{eff}^p$ , скорости ее изменения  $\dot{\varepsilon}_{eff}^p$  и температуры  $T$  [22]:

$$\sigma_Y(\varepsilon_{eff}^p, \dot{\varepsilon}_{eff}^p, T) = \left[ \sigma_{Y_0} + A(\varepsilon_{eff}^p)^n \right] \cdot \left[ 1 + C_1 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right], \quad (16)$$

где  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$  и  $T_0 = 298 \text{ К}$  - референтные скорость деформации и температура,  $T_{melt}$  - температура плавления,  $\sigma_{Y_0}$  - предел текучести при комнатной температуре,  $A$ ,  $C_1$ ,  $n$ ,  $m$  - константы.

В качестве критерия разрушения используется сопряженная модель Джонсона-Кука на базе кумулятивного закона накопления поврежденности  $d$  [21]; разрушение соответствует состоянию, когда  $d=1$ :

$$d = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{eff}^p}{\varepsilon_f^p}, \quad \varepsilon_f^p = \left[ d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{\sigma_I}{\sigma_{II}}) \right] \cdot \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left( 1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right), \quad (17)$$

где  $\varepsilon_f^p$  - критическая интенсивность пластических деформаций,  $d_i$  ( $i=1...5$ ) - характеристики материала,  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$  - первый и второй инварианты тензора напряжений.

Механические характеристики материала и параметры модели Джонсона-Кука, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики сплава ВТ6 в модели Джонсона-Кука (по данным [13, 21])

$E$ , МПа	$\mu$	$\sigma_{Y_0}$ , МПа	$A$ , МПа	$n$	$m$
114000	0,342	1098	1092	0,93	1,1
$C_1$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
0,014	0	0,526	-0,82151	0	0

Для моделирования деформационного поведения и разрушения повреждающих предметов (кварцевого и гранитного шаров) одновременно используется сочетание двух моделей материалов. Для описания поведения оболочки используется модель упругого тела, возможность разрушения оболочки проверяется по критерию  $\sigma_1 > \sigma_{сж}$ . Для материала, заключенного внутри оболочки ПП, задаются плотность и модуль объемной упругости  $K$ . Предварительные численные эксперименты показали необходимость корректировки характеристик кварца и гранита [24] для достижения соответствия расчетных и экспериментальных результатов. С учетом этого, в вычислительных экспериментах для моделей материала кварца и гранита были использованы следующие параметры (таблица 2).

Таблица 2.

#### Механические характеристики ПП

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$\mu$	$\sigma_{сж}$ , МПа	$K$ , МПа
Кварц	2674	110000	0,25	2400	37000
Гранит	2626	90000	0,25	1400	40000

#### Верификация методики математического моделирования

Для оценки достоверности математического моделирования проведены расчеты для пяти вариантов соударения, соответствующих экспериментальным данным. Верификация методики моделирования опиралась на сравнительный

анализ расчетных и экспериментальных данных о характере повреждения, его геометрических характеристиках, эффективных пластических деформациях, характере протекания процесса (таблица 3).

Таблица 3.

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик повреждений

№	Параметры эксперимента			Величина отгиба, мм			Глубина забоины, мм			Эффективная остаточная деформация			Наличие трещин	
	ПП	V, м/с	$\alpha, ^\circ$	эксп.	расч.	$\Delta, \%$	эксп.	расч.	$\Delta, \%$	эксп.	расч.	$\Delta, \%$	эксп.	расч.
1	Кварц Ø10мм	515	90	5,4	5,5	1,8	-	-		0,23	0,21	9,1	-	-
2	Кварц Ø 10мм	450	90	6,6	5,5	17	-	-		0.32	0.38	19	+	+
3	Кварц Ø 10мм	396	90	3,9	3,9	0	-	-		0,22	0,35	59	-	+
4	Кварц Ø 10мм	510	135	4,6	5,3	15	4,1	1,8	56	0,24	0,27	13	+	+
5	Гранит Ø 20мм	266	90	11,5	11,4	0.9	-	-		0,19	0,20	5,2	+	+

Расчетные и экспериментальные данные о характере и параметрах повреждения в целом согласуются между собой. Повреждение в случае соударения образца с кварцевым шаром при скоростях 515 м/с и 396 м/с представляет собой вмятину (рис. 6). При скоростях соударения с кварцевым шаром 450 м/с и 510 м/с, а также с гранитным шаром (при скорости 266 м/с) - вмятину с образованием трещин (см. таблицу 3). Относительная погрешность по величине отгиба кромки не превышает 17%. В случае, когда угол соударения образца с кварцевым шаром составил  $\alpha=135^\circ$ , расчет и эксперимент дают одинаковый тип повреждения в виде забоины со сквозной трещиной (рис. 7). При этом различие в величине отгиба

кромки не превышает 15%, по глубине забоины – значительно больше - 56%. При соударении образца с гранитным шаром  $\varnothing 20$  мм и расчетным и экспериментальным моделированием получено существенное повреждение образца в виде плавной вмятины с отгибом кромки; в месте сопряжения профильной части с технологическим хвостовиком образовалась трещина. Ее длина в расчете - 14,1 мм, в эксперименте - 10,2 мм (рис. 8).

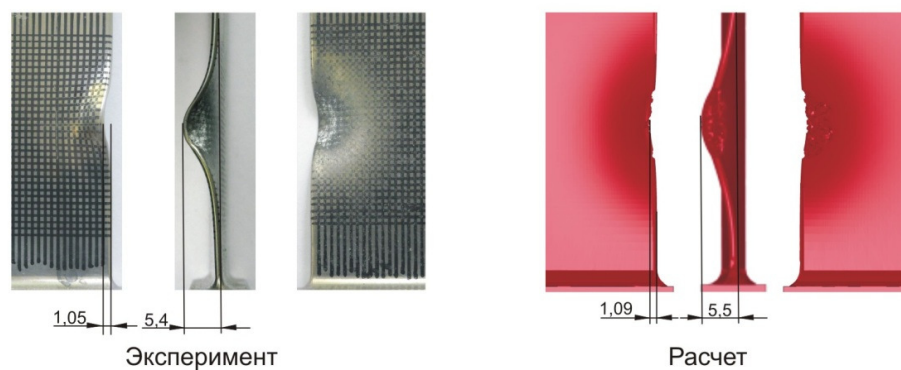


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные результаты моделирования повреждения кварцевым шаром,  $\varnothing 10$ мм,  $V=515$  м/с,  $\alpha=90^\circ$ .

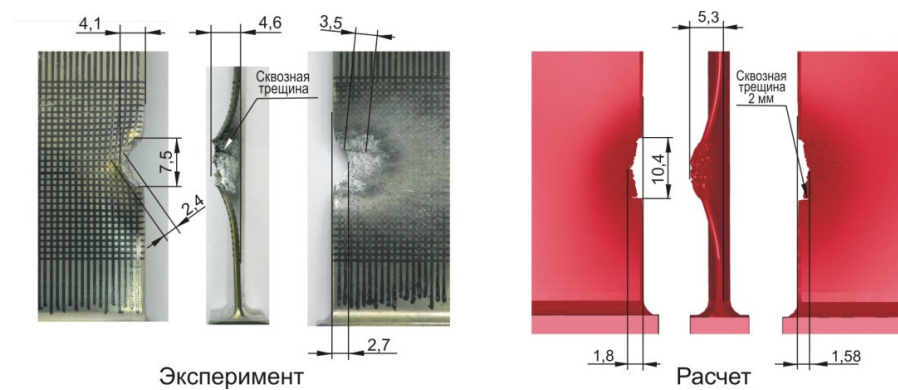


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные результаты моделирования повреждения кварцевым шаром,  $\varnothing 10$ мм,  $V=510$  м/с,  $\alpha=135^\circ$ .

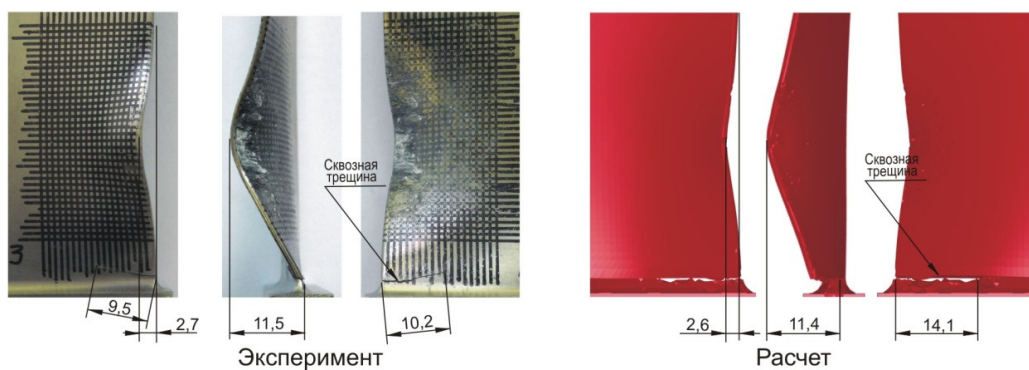


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные результаты моделирования повреждения гранитным шаром,  $\text{Ø}20\text{мм}$ ,  $V=266\text{ м/с}$ ,  $\alpha=90^\circ$ .

Анализ высокоскоростных видеозаписей экспериментов и пошаговых визуализаций расчетных результатов (рис.9) также подтверждает достоверность математического моделирования поведения образца и ПП в процессе соударения: разрушение ПП происходит с образованием мелких фрагментов, направления их движения соответствует эксперименту.

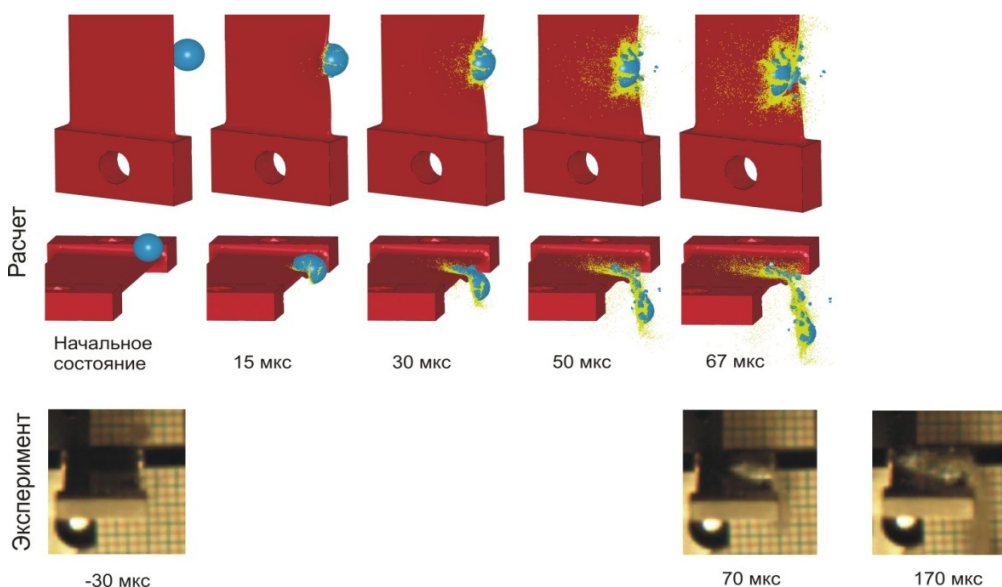


Рис. 9. Видеозапись эксперимента и пошаговая визуализация расчетных данных. Соударение образца с кварцевым шаром,  $\text{Ø}10\text{мм}$ ,  $V=396\text{м/с}$ ,  $\alpha=90^\circ$



Полученные в расчете и эксперименте поля остаточных деформаций (рис. 10) и их максимальные значения (см. таблицу 3) также согласуются между собой. Расхождение по этому параметру лишь в одном случае превышает 20% .

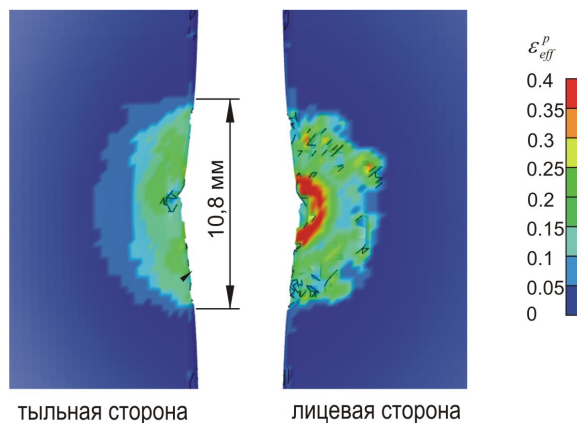


Рис.10. Поле эффективных остаточных деформаций в зоне повреждения образца. Повреждение кварцевым шаром,  $\varnothing 10\text{мм}$ ,  $V=450\text{ м/с}$ ,  $\alpha=90^\circ$

### Выводы

Для описания процесса повреждения лопаток газотурбинных двигателей при соударении с камнями и оценки характера и параметров повреждений может быть использована методика математического моделирования, основанная на совместном применении метода конечных элементов и бессеточного метода сглаженных частиц. Методика верифицирована на серии специально проведенных экспериментов по баллистическому повреждению лопаток. Разработанная методика математического моделирования может быть использована для сравнительного анализа мероприятий по повышению стойкости лопаток к эксплуатационным повреждениям.

## **Библиографический список**

- 1.Иноземцев А.А., Мулюков Р.Р., Сафиуллин Р.В., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я, Кокшаров Н.Л., Харин С.А., Морозов М.А. Перспективная технология изготовления полый широкохордной лопатки вентилятора. Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: Сборник статей / Под общей редакцией Анциферова В.Н. – Пермь, Пермский ЦНТИ, 2009, с. 61-65.
- 2.Валиахметов О.Р., Галлеев Р.М., Иванько В.А., Иноземцев А.А., Имаев Р.М., Кокшаров Н.Л., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я, Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Сафиуллин Р.В., Харин С.А. Использование наноструктурных материалов и нанотехнологий для создания полых конструкций. «Российские нанотехнологии», 2010, том 5, № 1-2, с. 102-111.
- 3.Петухов А.Н. Свободная от недостатков предшественников. Двигатель, 2005, № 5, с. 14-15.
- 4.Сиротин Н.Н. Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. - М.: РИА "ИМ-Информ", 2002, 442с.
- 5.Hudak, S.J., Jr. and Chell, G.G. (1999) – A damage Tolerance Approach to FOD Based on the “Worst Case Notch” Concept, in the Proceedings of the 4th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference, Monterey, CA, February 1999.
- 6.Duo´ P., Nowell D., Schofield J. Assessment of foreign object damage (FOD) to aero engine blades. In: Proceeding of the 9th National Turbine Engine HCF Conference, Pinehurst, NC., 2004.

7. Nowell D., Duó P., Stewart I.F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage.- International Journal of Fatigue, 25, 2003, pp. 963-969.
8. Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, Gao Deping. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine. Part II: Numerical Simulation of Bird Impact. - Chinese Journal of Aeronautics, 21, 2008, pp. 328-334.
9. 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, 35, 2008, pp. 487–498.
10. Shmotin Y.N., Chupin P.V., Gabov D.V., Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S. Bird strike analysis of aircraft engine fan, 7th European LS-DYNA Conference, 2009.
11. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Semenova I.V. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades // Proceedings of ASME Turbo Expo 2008 "Power for Land, Sea and Air GT2008". – Berlin, 2008. – GT2008-51493.
12. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Semenova I.V. Effect of blade geometry and foreign object kinetic energy on blades damage // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010 "Power for Land, Sea and Air GT2010". – Glasgow, 2010. – GT2010-22425.
13. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Любчик О.Л., Гладкий И.Л. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011, т. 13, № 4(4), с. 991-997.
14. Нихамкин М.Ш., Семенова И.В., Любчик О.Л., Гладкий И.Л. Моделирование повреждения посторонними предметами полых лопаток вентилятора ГТД. Известия

Самарского научного центра Российской академии наук, 2011, т. 13, № 1(2), с. 226-229.

15. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Семенова И.В. Конев И.П., Плотников Ю.И. Сараева Л.В. Снижение усталостной прочности лопаток компрессора ГТД при повреждении посторонними предметами. *Авиационная промышленность*, 2008, № 1, с. 21-24.

16. Нихамкин М.Ш., Семенова И.В. Концентрация напряжений в лопатках компрессора при повреждении их посторонними предметами. *Известия Вузов Авиационная техника*. 2011, №4, с. 3-6.

17. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Семенова И.В. Экспериментальное исследование процесса повреждения лопаток ГТД посторонними предметами. *Авиационная промышленность*, 2010, № 3, с. 16-19.

18. Stellingwerf R.F., Wingate C.A. Impact modeling with smooth particle hydrodynamics. Los Alamos National Laboratory, MS F645, Los Alamos, NM 87545.

19. Hallquist J. LS-DYNA Theoretical Manual – Livermore Software Technology Corporation – 1999, 498 p.

20. Chen X. Foreign object damage on the leading edge of a thin blade. *Mechanics of Materials*, 37, 2005, pp. 447–457.

21. Dietenberger M., Buyuk M., Kan C-D. Development of a high strain-rate dependent vehicle model. *LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg*, 2005, B-III-1-10.

22. Johnson G.R. and Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings 7th International Symposium on Ballistics, Hague, 1983, pp. 541-547.

23. Lesuer D.R., Experimental Investigations of Material Models for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, DOT/FAA/AR-00/25, 2000, 41p.

24. Котяхов Ф.И. Физика нефтяных и газовых коллекторов. М., «Недра», 1977, 287 с.