

УДК 621.438-226.2:669-172

Расчётное исследование влияния анизотропии характеристик материала на прочность монокристаллических лопаток турбин с помощью разработанной модели ползучести

Васильев Б. Е.^{1,*}

[*b_vasilyev@ciam.ru](mailto:b_vasilyev@ciam.ru)

¹Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова, Москва, Россия

В статье описывается способ учёта анизотропии характеристик сопротивления ползучести и длительной статической прочности при проведении прочностных расчётов монокристаллических лопаток турбин. Данный способ базируется на определении и использовании эквивалентного направления напряженного состояния и был программно реализован в виде подпрограммы для ANSYS. Проведенные сравнительные расчёты с использованием разработанной модели ползучести с учётом и без учёта анизотропии характеристик сопротивления ползучести и длительной статической прочности показали существенное влияние анизотропии свойств материала лопаток на ее прочностные характеристики.

Ключевые слова: лопатки турбин, монокристалл, анизотропия, ANSYS

Введение

В связи с широким применением монокристаллического литья при производстве лопаток высокотемпературных турбин актуальной является задача разработки модели ползучести для анизотропных материалов для более корректной оценки кинетики напряженно – деформированного состояния (НДС) и вытяжки монокристаллических лопаток турбин в условиях эксплуатации.

В настоящее время ввиду отсутствия общепринятых подходов к учёту анизотропии характеристик монокристаллических сплавов при расчётах прочности лопаток турбин используются изотропные модели поведения материалов или модель анизотропии Хилла, что может приводить к существенным ошибкам. Результаты сравнительных численных исследований растяжения плоского образца с надрезом и сопоставления их с экспериментальными данными [1] показали, что модель Хилла (коэффициенты определялись согласно [2]) приводит к погрешностям до 30% и не чувствительна к вторичной ориентации.

Описываемые в литературе модели на основе кристаллографического (КГ) подхода сложны в реализации и требуют большого числа экспериментальных данных. Например, в работе [3] используется от 30 до 42 переменных (в зависимости от числа рассматриваемых систем скольжения).

Применяемые при производстве лопаток высокотемпературных турбин монокристаллические сплавы характеризуются кубической симметрией свойств, т.е. кристаллографическая решетка имеет три взаимно ортогональные плоскости симметрии (рис. 1, а). Выделяют три основных семейства КГ направлений, являющихся вершинами стереографического треугольника: $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ (рис. 1, б).

Кристаллографические оси монокристалла $[100]$, $[010]$, $[001]$ эквивалентны в отношении упругих и механических свойств монокристалла. Значение модуля упругости в произвольном направлении $\mathbf{n}$ определяется с помощью зависимости [4]:

$$E_n = 1/[S_{11} - 2 \cdot (S_{11} - S_{12} - 0.5 \cdot S_{44}) \cdot L],$$

где S_{11} – S_{44} – компоненты тензора упругих податливостей, L – ориентационный фактор:

$$L = l_1^2 \cdot l_2^2 + l_2^2 \cdot l_3^2 + l_3^2 \cdot l_1^2, \quad (1)$$

где $l_1 = \cos(\mathbf{n} \wedge X)$, $l_2 = \cos(\mathbf{n} \wedge Y)$, $l_3 = \cos(\mathbf{n} \wedge Z)$ – направляющие косинусы.

Ориентационный фактор характеризует направление $\mathbf{n}$ относительно осей монокристалла, равен нулю в направлениях осей куба $\langle 001 \rangle$ и достигает максимального значения $1/3$ при направлениях диагоналей куба $\langle 111 \rangle$.

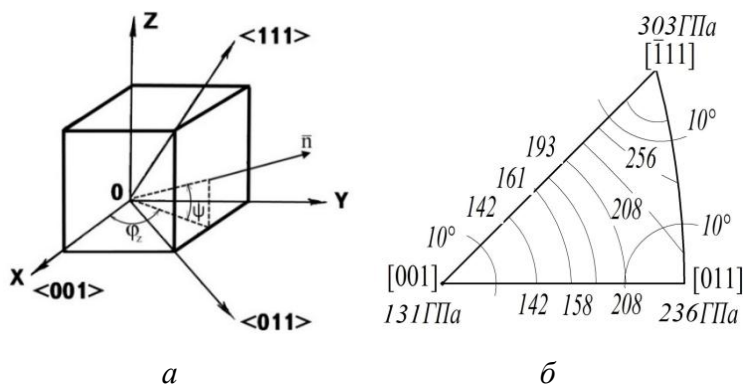


Рис. 1. Оси монокристалла (а) и стереографический треугольник (б)

В технической литературе вопрос ползучести монокристаллических сплавов на никелевой основе освещен недостаточно хорошо, что можно объяснить, как тем, что повышенный практический интерес к таким сплавам появился относительно недавно, так и большим разбросом экспериментально определенных характеристик сопротивления ползучести, при котором затруднительно отделить влияние ориентации на результаты от влияния разброса. Но, в последнее время, задача учета анизотропии характеристик сопротивления ползучести становится все более актуальной, поэтому во многих лабораториях ведутся экспериментальные работы по её исследованию. Между тем большинство этих исследований посвящено изучению анизотропии характеристик ползучести на примере ортотропных материалов, на базе испытаний цилиндрических

образцов при совместном действии внутреннего давления и дополнительной осевой силы [5-7].

1. Метод исследования

1.1 Предлагаемая модель ползучести

Применяемые в авиационной отрасли при определении кинетики НДС лопаток турбин модели ползучести не позволяют корректно учесть анизотропию характеристик монокристаллических сплавов и описать всё разнообразие кривых ползучести одним уравнением. Вид кривой ползучести определяется не только химическим составом сплава, но и условиями испытаний (в зависимости от которых участки кривой, соответствующие одной или двум стадиям ползучести могут отсутствовать). Дополнительной проблемой при проведении расчётов является ограниченный набор экспериментальных данных, т.е. характеристики материала известны для узкого диапазона напряжений и температур [8]

Предварительно экспериментально получены характеристики сопротивления ползучести на образцах трех кристаллографических ориентаций (КГО) [001], [011], [111] из перспективного жаропрочного никелевого монокристаллического сплава. Испытания проведены для 15-20 образцов каждой КГО в широком диапазоне температур (650°C – 1100°C) и напряжений (рис. 2).

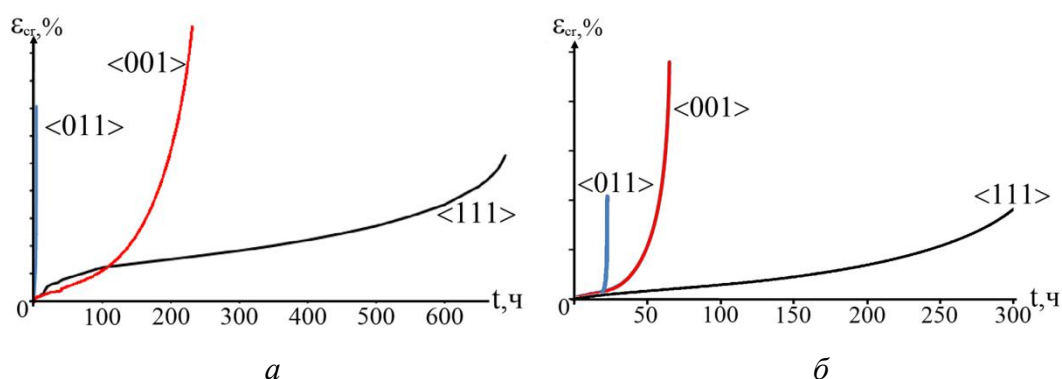


Рис. 2. Первичные кривые ползучести сплава при $T=900^\circ\text{C}$, $\sigma=500 \text{ МПа}$ (а) и $T=1000^\circ\text{C}$, $\sigma=314 \text{ МПа}$ (б)

Для расширения диапазона температур и напряжений, для которого известны характеристики ДСП, в работе применяется способ температурно-временной аппроксимации, основанный на использовании кривых Ларсона-Миллера (ЛМ) [8]. Согласно [4] параметр Ларсона-Миллера P_{LM} определяется следующим образом:

$$P_{LM} = T \cdot (\log_{10} t_p + C) \quad (2)$$

где C – коэффициент, равный, как правило, 20; T – температура материала [K]; t_p – время до разрушения, [ч].

На рис.3 представлены кривые Ларсона – Миллера до разрушения образцов из рассматриваемого сплава трех КГО.

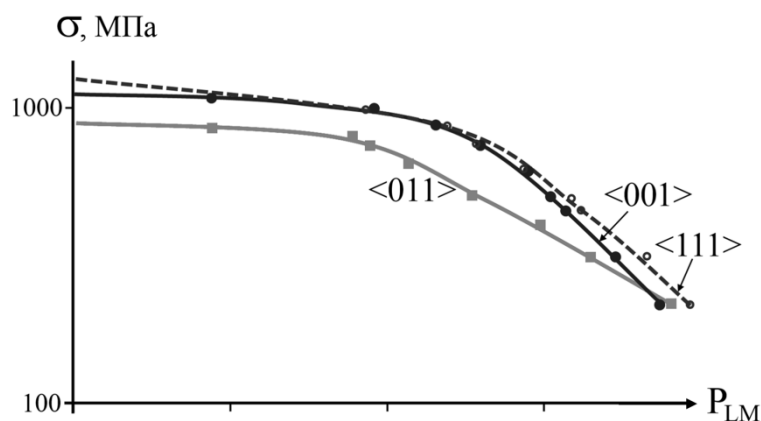


Рис. 3. Кривые Ларсона – Миллера до разрушения для образцов трёх КГО рассматриваемого сплава

Анализ экспериментальных данных показал, что наименее благоприятной по долговечности практически во всем температурно-временном диапазоне для рассматриваемого сплава является ориентация [011]. Соотношение долговечностей и, соответственно, времени до накопления определенного уровня деформаций образцов КГО [001] и [111] изменяется от условий эксперимента.

В целях устранения описанных проблем автором разработана модель ползучести монокристаллических сплавов на никелевой основе [9, 10]. Эта модель основана на использовании эквивалентного направления напряженного состояния (НС) [1]. Таким образом, характеристики сопротивления ползучести определяются не только величинами температуры, напряжения, накопленными деформациями и временем, но и взаимным расположением осей монокристалла и НС (рис. 4, а). С помощью предложенного подхода можно обобщить характеристики, определенные при одноосном растяжении образцов различной КГО, на сложное НС применительно к монокристаллическим сплавам.

Для учёта влияния КГО на характеристики сопротивления ползучести и предел длительной статической прочности принята гипотеза о возможности использования линейной интерполяции для определения этих характеристик по значениям ориентационного фактора L эквивалентного направления НС (T) (рис. 4, а).

$$T = (\sigma_1 \mathbf{e}_1 + \sigma_2 \mathbf{e}_2 + \sigma_3 \mathbf{e}_3) / \sqrt{3} \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ – главные направления тензора напряжений.

Например, для рассматриваемого сплава при температуре 782°C известны значения 19 часовой длительной статической прочности для трех КГО: [001] (949 МПа, $L=0$); [011] (659 МПа, $L=0,25$); [111] (976 МПа, $L=0,33$). Для остальных КГО принято, что значения предела ДСП лежат между этими величинами. На рис. 4, б показано влияние взаимного направления нагрузки и осей монокристалла, выражаемое углами поворота вокруг осей 0X (ось двигателя) и 0Y (окружное направление) на предел ДСП.

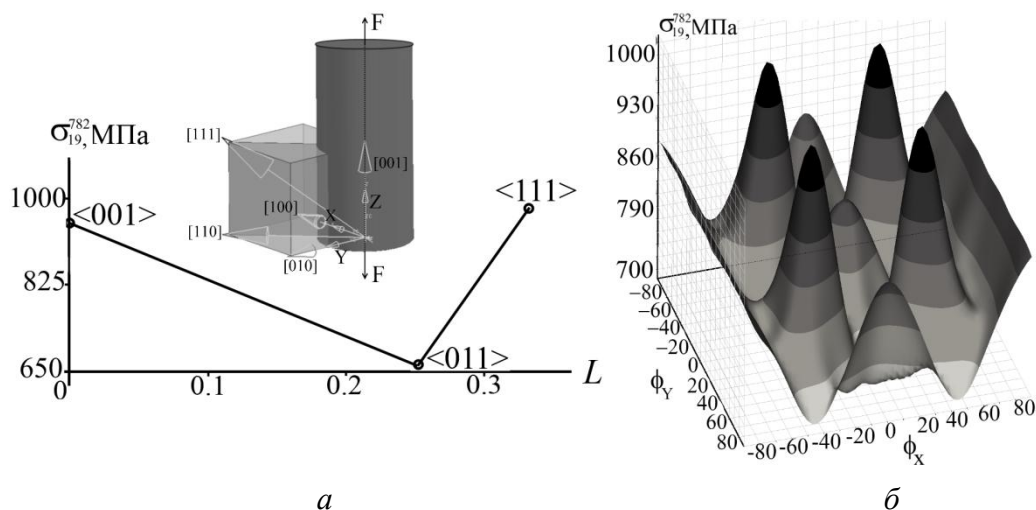


Рис. 4. Зависимость предела ДСП от L (а) и направления усилий относительно осей монокристалла (б)

В качестве исходных данных для разработанной модели ползучести используются кривые, аналогичные кривым Ларсона-Миллера. Эти кривые задаются для нескольких КГО (по умолчанию соответствующим вершинам стереографического треугольника). По нескольким выбранным экспериментально определённым значениям деформаций ползучести (например, 0,1; 0,2, 0,5, 1 и 2%) строятся соответствующие этим значениям кривые Ларсона-Миллера [9] (рис. 5,б). Для этого в (2) время до разрушения заменяется временем до накопления выбранного уровня деформации ползучести. Наличие изломов кривых Ларсона-Миллера объясняется изменением характера разрушения.

Считается [4], что процессы ползучести развиваются при гомологической температуре $\theta = T_{\text{мат}}/T_{\text{пл}}$ выше 0,3, где $T_{\text{мат}}$ – текущая температура материала, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления сплава. Поэтому принято, что при температурах ниже 450°C и малых временах действия нагрузок (<0,1 часа) все кривые сходятся к значениям кратковременной прочности.

Разработанный подход был программно реализован на языке Fortran и интегрирован в программный комплекс ANSYS в виде пользовательской модели ползучести (USERCREEP) [10].

Процесс расчёта осуществляется дискретными временными шагами, размер которых определяется автоматически решателем ANSYS. В начале каждого временного шага для каждой точки интегрирования конечно-элементной сетки решателем ANSYS в подпрограмму usercreeper передаются значения компонент тензора напряжений, деформации, а также температуры и накопленного структурного параметра (q).

Подпрограммой вычисляются главные значения и направления тензора напряжений, после чего определяется эквивалентное направление НС и его ориентационный фактор. По кривым Ларсона-Миллера для заданных КГО определяются кривые ползучести [8], соответствующие текущему напряжению и температуре. Методом линейной интерполяции определяются характеристики сопротивления ползучести для промежуточных КГО и строится кривая ползучести, которая зависит не только от

параметров теплонапряженного состояния в рассматриваемой зоне лопатки, но и от положения главных осей напряжений относительно осей монокристалла.

Эта кривая используется для расчёта приращения деформации ползучести $\Delta \varepsilon_{cr}$ по величине накопленного структурного параметра (например, поврежденности $\Delta \Pi$). Принцип работы разработанной модели показан на рис. 5. Процесс повторяется до окончания заданного времени действия режима нагружения.

Разработанная модель позволяет учитывать отмечаемую многими исследователями асимметрию свойств материала при сжатии/ растяжении [11]. Однако, ввиду отсутствия данных по разносопротивляемости для рассматриваемого сплава, в данной работе она не учитывается.

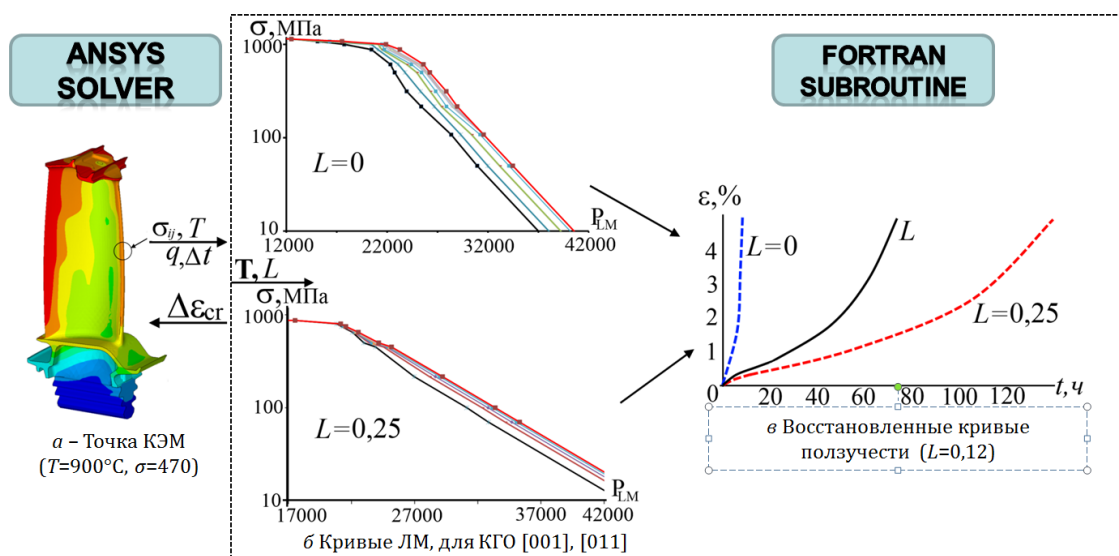


Рис. 5. Графическое описание принципа работы разработанной подпрограммы для моделирования процесса длительного деформирования с использованием кривых Ларсона – Миллера

1.2 Преимущества предлагаемой модели ползучести

Преимущества предлагаемой модели ползучести по сравнению с уже существующими заключаются в следующем.

1. Описанная модель расчета позволяет учесть влияние анизотропии характеристик сопротивления ползучести и знака напряжений на кинетику НДС монокристаллических лопаток турбин в процессе длительной работы.
2. Существующие методы корректно описывают процесс длительного деформирования в очень узком диапазоне теплонапряженного состояния детали (ввиду невозможности описания всего разнообразия кривых ползучести одним уравнением и погрешностей, возникающих при аппроксимации кривой). Данный подход позволяет при использовании ограниченного набора экспериментальных данных и при относительно простой их обработке получить наиболее полное описание характеристик ползучести

(3-х стадий) в широком диапазоне теплонапряженного состояния лопатки, имеющем место в реальных условиях эксплуатации (рис.7,а).

3. При определении характеристик материала в других, отличных от стандартных, КГО, модель может быть адаптирована.
4. В случае отсутствия данных по анизотропии характеристик ползучести, модель позволяет проводить расчёты для изотропных материалов ($L(T)=0$).

1.3 Граничные условия и конечно-элементная модель

На примере рабочей лопатки ТВД с развитой конвективно-пленочной системой охлаждения в программном комплексе ANSYS с применением разработанной модели ползучести проведены расчёты кинетики НДС с учётом и без учёта анизотропии характеристик сопротивления ползучести и ДСП.

С целью исследования влияния анизотропии только этих характеристик на прочность лопатки, при расчёте упруго-пластического НДС материал принят изотропным.

Для проведения расчетов МКЭ твердотельные модели разбиты на гексагональные и тетраэдральные элементы второго порядка, позволяющие проводить расчеты с учетом геометрической, физической нелинейности и ползучести. В областях концентрации напряжений сетка сгущена.

Исходя из ТУ на процесс литья лопатки (аксиальная КГО – [001], отклонение не более 10° ; азимутальная ориентация не регламентируется) принято, что оси монокристалла совпадают с осями лопатки XYZ.

Для упрощения расчётов рассмотрена изолированная лопатка, на контактные грани нижнего зуба хвостовика которой было задано условие отсутствия перемещений (А на рис. 6,б). В дальнейшем рассматривалась только часть лопатки, содержащая трактовую полку и профильную часть лопатки (зелёный цвет на рис 6,а).

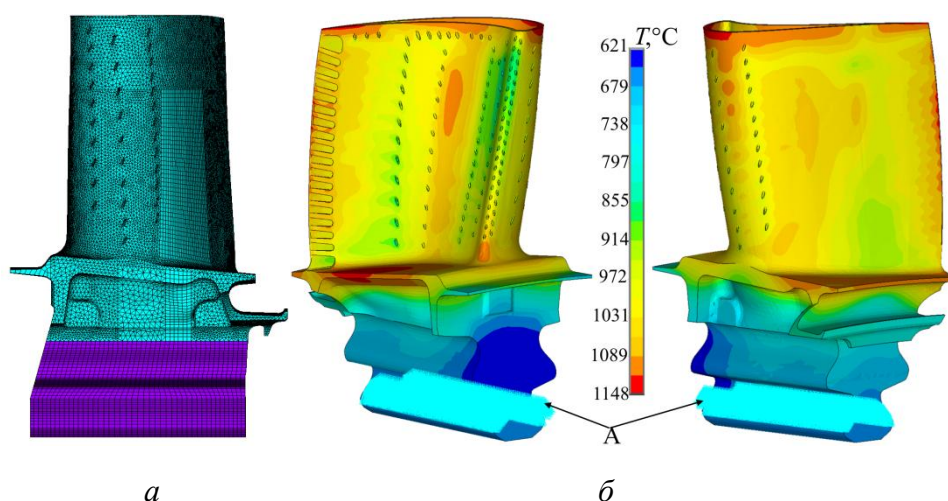


Рис. 6. (а) КЭМ; (б) поле температур лопатки и условия закрепления на расчётном режиме

После окончания расчётов в каждом узле КЭМ по изменяющимся на каждом шаге напряжениям определены эквивалентные для всего рассматриваемого интервала времени напряжения σ_m [10]. Под эквивалентным понимается некоторое условное напряжение, которое постоянно действуют в течение всего рассматриваемого времени работы и приводит к поврежденности, равной поврежденности, получаемой истинными изменяющимися во времени напряжениями ($\sigma_{Mis}(t)$), действующими на каждом временном интервале. Эквивалентные напряжения вычислялись с помощью формулы [12].

$$\sigma_m = \sqrt[m]{\frac{1}{t_\Sigma} \int_0^{t_\Sigma} [\sigma_{Mis}(t)]^m dt},$$

где m - показатель степени кривой длительной прочности, t_Σ время работы на режиме.

В общем случае, коэффициент запаса ДСП в работе определялся по формуле:

$$K_m = \frac{\sigma_{dl}(T, t, L(\mathbf{T}))}{\sigma_m} \quad (4)$$

где σ_{dl} - предел длительной статической прочности, определяемый для данной температуры, продолжительности и эквивалентного направления НС относительно осей монокристалла (для изотропных тел $L(\mathbf{T})=0$, $\sigma_{dl} = \sigma_{dl<001>}$).

2. Результаты

2.1 Анализ напряженного состояния в упруго-пластической постановке

Проведены предварительные расчёты НДС в упруго-пластической постановке без учёта анизотропии механических характеристик. Для каждого узла КЭМ определено направление вектора $\mathbf{T}$ (3) и значение его ориентационного фактора $L(\mathbf{T})$ (1). Этот параметр может быть применен для оценки допустимости рассмотрения материала как изотропного.

На рис. 7,а показана гистограмма распределения параметра L , где каждому диапазону значений этого параметра (0-0,05; 0,05-0,10 и т.д.) приведено количество узлов КЭМ (N).

Также проведена оценка вида НС, основанная на расчёте критерия Лоде – Надаи (рис. 7,б), который рассчитывается по формуле:

$$\mu = 2 \cdot (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) - 1$$

Для различных видов напряжённого состояния μ меняется в интервале $[-1;1]$: $\mu = -1$ для одноосного растяжения, $\mu = 0$ для чистого сдвига; $\mu = 1$ для одноосного сжатия.

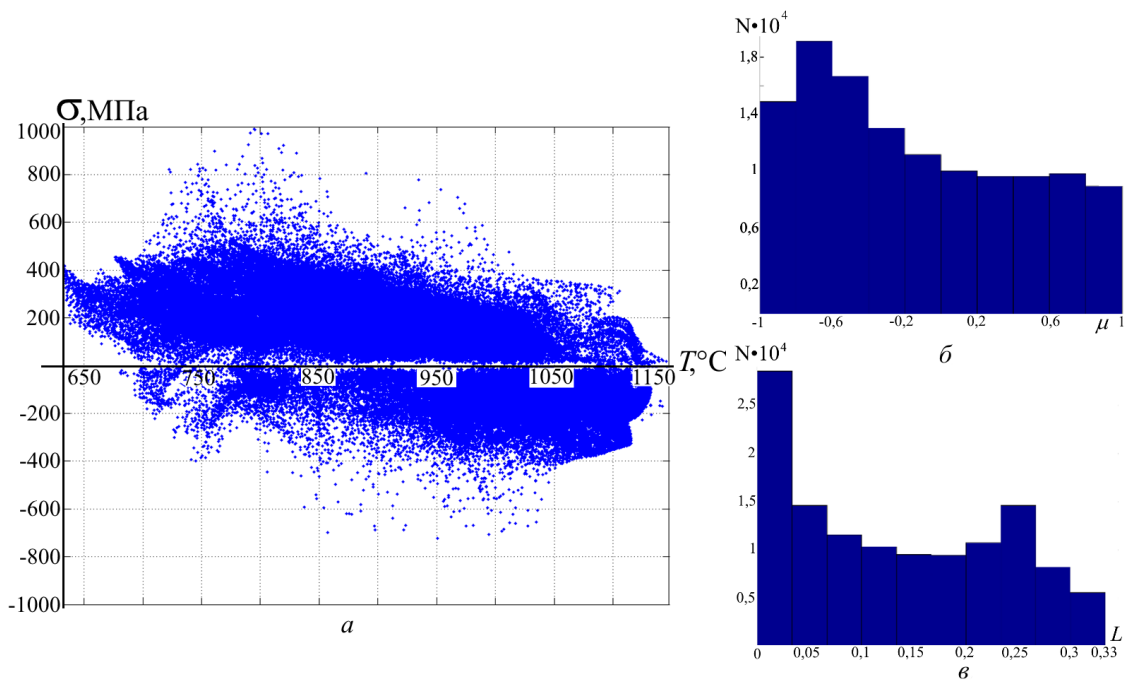


Рис. 7. (а) - соотношение между температурами и напряжениями Мизеса (знак соответствует знаку среднего нормального напряжения) в каждом узле КЭМ, (б) и (в) гистограммы распределения параметра μ и $L(T)$

Анализ результатов показал, что для рассматриваемой лопатки НС существенно трехмерно. Кроме того, что для более 70% по количеству узлов КЭМ, необходимо учитывать анизотропию характеристик ($L(T)$ более 0,05).

После проведения расчётов и обработки результатов во всех узлах КЭМ исходя из распределения значения коэффициентов запаса ДСП выявлены следующие «критические» зоны лопатки (рис. 8):

1. в нижнем выходном канале на выходной кромке;
2. в перфорационном отверстии на внутренней части лопатки.
3. на ребре лопатки в зоне высоких температур;
4. на галтели между трактовой полкой и профильной частью на входной кромке;
5. на галтели между трактовой полкой и профильной частью на выходной кромке.

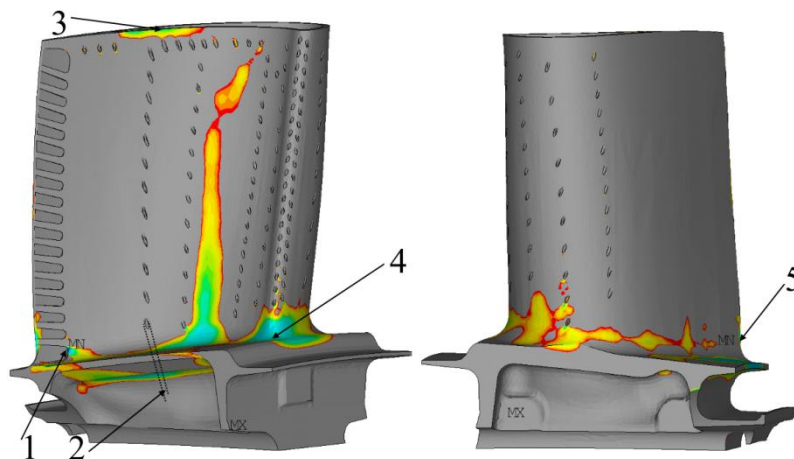


Рис. 8. Положение критических зон

Время работы на расчётном режиме – 19 часов.

В таблице 1 приведены результаты расчетов в критических зонах лопатки: напряжений в упруго-пластической постановке в начальный момент времени (σ_{Mis}), параметр $L(T)$, а также для двух вариантов расчёта – запасы ДСП (K_m) по эквивалентным за 19 часов напряжениям Мизеса (σ_m). Вариант 1 – расчёт без учёта анизотропии характеристик сопротивления ползучести и ДСП, вариант 2 – с учётом. Индексы 1 и 2 в приведенных обозначениях здесь и далее соответствуют номерам вариантов расчета.

Таблица 1. Результаты расчёта в «критических» зонах лопатки

	Зона	1	2	3	4	5
	$T, ^\circ\text{C}$	1035	782	1100	1082	1051
	σ_{Mis}	654	1010	263	366	428
	$L(T)$	0,13	0,25	0,21	0,30	0,01
Вар 1	σ_{m1}	290	845	121	157	215
	$\sigma_{\partial 11}$	318	949	202	226	283
	K_{m1}	1,42*	1,12	2,17*	1,87*	1,72*
Вар 2	σ_{m2}	279	833	144	190	213
	$\sigma_{\partial 22}$	298	663	214	232	284
	K_{m2}	1,39*	0,80	1,93*	1,59*	1,73*

* с учетом поправочного коэффициента ввиду преобладающих напряжений сжатия.

3. Обсуждение

Результаты расчётов с учётом и без учёта анизотропии характеристик сопротивления ползучести и ДСП были проанализированы и сравнены. На рис. 9 приведены кривые релаксации напряжения в зонах №2 и 4 с течением времени для двух вариантов расчёта.

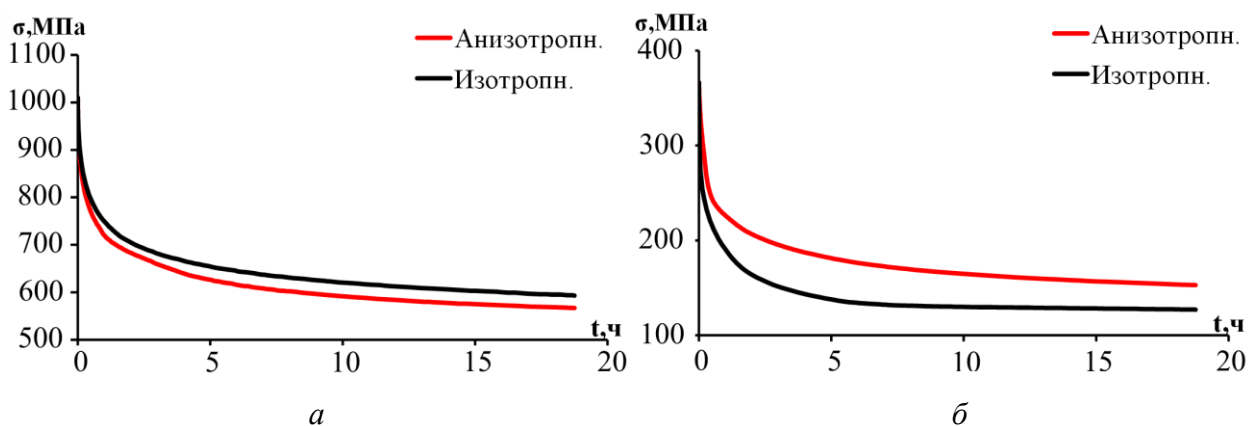


Рис. 9. Кривые релаксации напряжений в зонах №2 (а) и №4 (б) с течением времени.

Для оценки влияния анизотропии характеристик в каждом узле КЭМ рассчитаны параметры $\zeta\sigma$, ζK_m , определяемые как относительное изменение эквивалентных напряжений и коэффициентов запаса при учёте анизотропии:

$$\zeta\sigma = (\sigma_{m2} - \sigma_{m1}) / \sigma_{m1}, \quad \zeta K_m = (K_{m2} - K_{m1}) / K_{m1}$$

Эти величины имеют отрицательные значения, если при учёте анизотропии характеристик значения эквивалентных напряжений или запасов уменьшились.

В таблице 2 приведены значения параметров $\zeta\sigma$, ζK_m для критических мест лопатки.

Таблица 2. Величины относительного изменения эквивалентных напряжений и запасов при учёте анизотропии характеристик сопротивления ползучести и ДСП

Зона	1	2	3	4	5
$L(T)$	0,13	0,25	0,21	0,30	0,01
$\zeta\sigma$ (%)	-3,6	-1,5	19,1	21,1	-0,9
ζK_m (%)	-2,6	-29,1	-11,0	-15,2	1,1

Из таблицы 2 видно, наибольшее изменение величины коэффициента запаса прочности при учёте анизотропии среди рассматриваемых критических зон наблюдается в зоне №2. Это можно объяснить тем, что при температуре, соответствующей температуре в этой зоне, предел ДСП для КГО $\langle 011 \rangle$ намного ниже, чем для двух других КГО (рис. 4). Напряжённое состояние в области концентратора (перфорационного отверстия) сложное, его эквивалентное направление практически соответствует КГО $\langle 011 \rangle$ (рис. 10). При этом следует отметить, что кривые релаксации напряжений (рис.9, а) в этой зоне для двух вариантов расчёта практически совпадают.

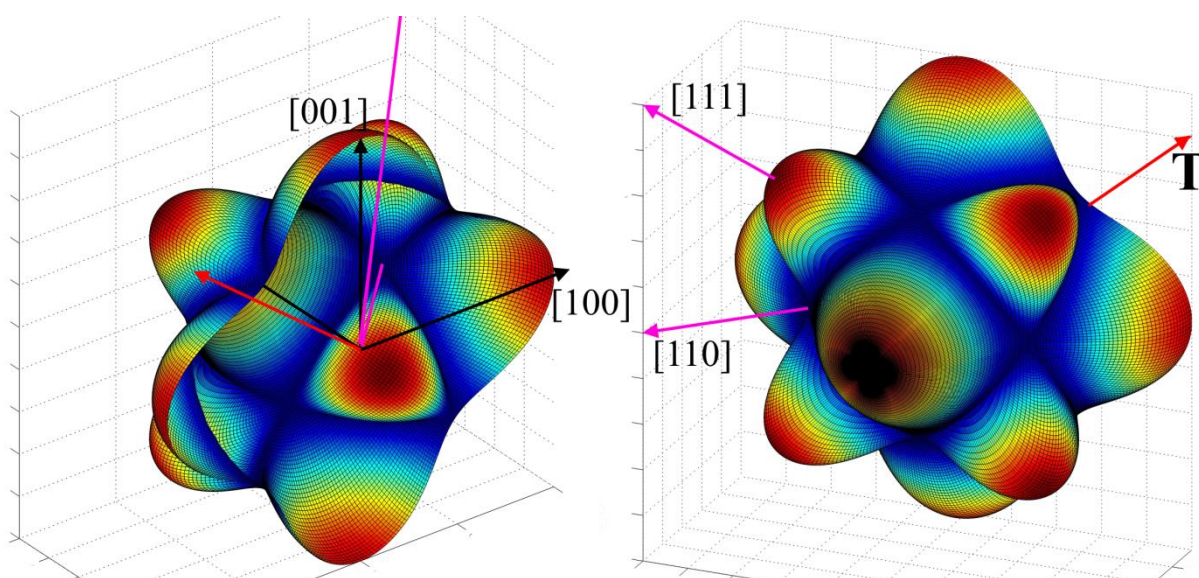


Рис. 10. Указательная поверхность предела ДСП в зоне №2 рассматриваемой лопатки

На рис. 11 показано распределение параметров $\zeta\sigma$, ζK_m по поверхности рассматриваемой части лопатки. На рис. 12, а и 12, б показаны гистограммы распределения этих параметров по узлам КЭ, а на рис. 12, в и 12, г зависимость величин этих параметров от температуры в узлах КЭМ.

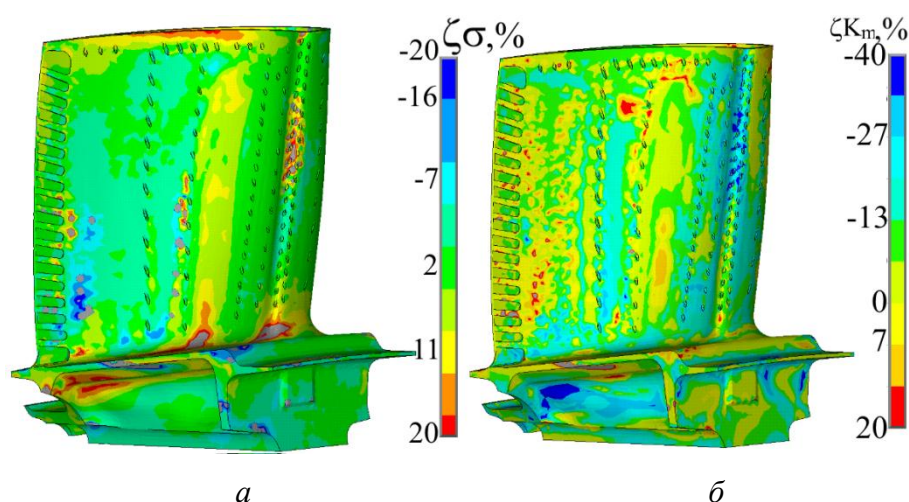


Рис. 11. изменение значений эквивалентных напряжений (*а*) и запасов длительной прочности (*б*) при учёте анизотропии рассматриваемых характеристик

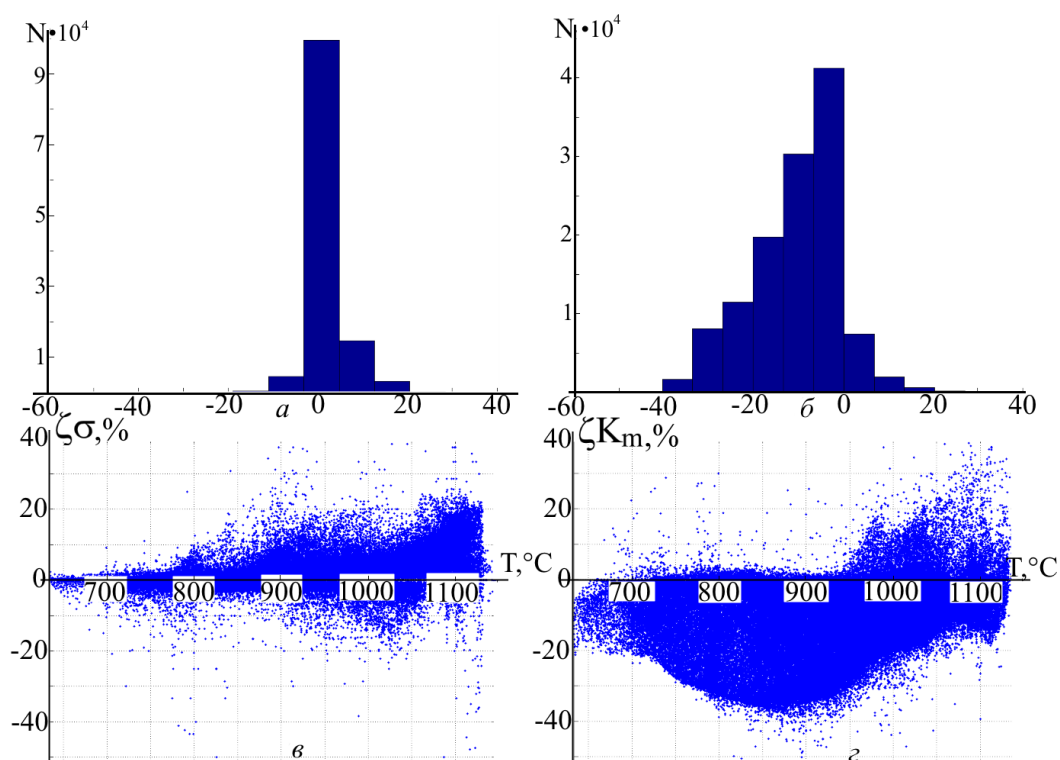


Рис. 12. *а* и *б* - гистограммы изменения эквивалентных напряжений и местных запасов ДСП при учёте анизотропии характеристик; *в* и *г* изменение этих параметров в зависимости от температуры

Анализ результатов показал, что при учёте анизотропии характеристик сопротивления ползучести и ДСП для большей части лопатки произошло увеличение значений эквивалентного напряжения и уменьшение значений коэффициентов запаса. Следует отметить, что диапазон изменения напряжений (-10 – +20%) намного уже по сравнению с диапазоном изменения коэффициентов запаса (-40 – +30%). Наиболее сильное уменьшение коэффициентов запаса соответствует температурам 800 – 900°C, где оно достигает 40%.

Заключение

Разработан метод расчета НДС и ДСП монокристаллических лопаток высокотемпературных турбин, работающих в условиях длительного нагружения. Метод позволяет учитывать в расчетах анизотропию характеристик длительной прочности и сопротивления ползучести материала лопатки на базе ограниченного объема экспериментальных данных. Проведенные сравнительные расчёты с использованием разработанной модели ползучести с учётом и без учёта анизотропии характеристик сопротивления ползучести и ДСП показали существенное влияние анизотропии свойств материала лопаток на ее прочностные характеристики. Уменьшение запасов ДСП может достигать 40% при учете анизотропии свойств материала лопаток по сравнению с результатами расчёта лопатки как изотропной.

Благодарность

Автор благодарен ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ» за предоставленные твердотельные модели и численно определенные поля температур.

Обозначения и сокращения

НДС – напряженно деформированное состояние,
НС – напряженное состояние,
МКЭ – метод конечных элементов,
КЭМ – конечно-элементная модель,
КГО – кристаллографическая ориентация,
ДСП – длительная статическая прочность,
 L – ориентационный фактор,
 T – эквивалентное направление,
 T – температура, [°C],
 t – время, [ч],
 P_{LM} – параметр Ларсона-Миллера,
 σ_{Mis} – эквивалентные напряжения Мизеса [МПа],
 $\sigma_{дл}$ – предел длительной статической прочности [МПа],
 σ_k – напряжения Мизеса в конце работы на режиме [МПа],
 ε_{cr} – деформация ползучести [%],
 v_{cr} – скорость деформации ползучести,
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные значения тензора напряжений [МПа],
 e_1, e_2, e_3 – главные направления тензора напряжений,
[uvw], <uvw> – кристаллографические индексы, характеризующие соответственно направление и семейство кристаллографических направлений

Список литературы

1. Васильев Б.Е. Разработка модели пластичности для монокристаллических материалов для проведения прочностных расчётов лопаток турбин перспективных двигателей // Технология легких сплавов. 2013. № 3. С. 90-100.
2. Ramaglia A.D., Villari P. Creep and Fatigue of Single Crystal and Directionally Solidified Nickel-Base Blades via a Unified Approach Based on Hill48 Potential Function: Part 1 — Plasticity and Creep // ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. Vol. 7A: Structures and Dynamics. 2013. Paper no. GT2013-94675. Art. no. V07AT27A004. DOI: [10.1115/GT2013-94675](https://doi.org/10.1115/GT2013-94675)
3. Méric L., Cailletaud G. Single Crystal Modeling for Structural Calculations: Part 2—Finite Element Implementation // Journal of Engineering Materials and Technology. 1991. Vol. 113, no. 1. P. 171-182. DOI: [10.1115/1.2903375](https://doi.org/10.1115/1.2903375)
4. Каблов Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов. М: Машиностроение, 1998. 464 с.
5. Naumenko K. Modeling of High-Temperature Creep for Structural Analysis Applications: Ph.D thesis. Martin-Luther-Universitat Halle-Wittenberg, 2006. 206 p.
6. Локощенко А.М. Кинетический подход исследования длительной прочности металлов при двухосном растяжении // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 10. С. 128-135.
7. Manu C.C. Finite element analysis of stress rupture in pressure vessels exposed to accidental fire loading: Ph.D thesis. Queen's University, 2008. 211 p.
8. Васильев Б.Е., Магерамова Л.А. Формирование уравнений ползучести сплавов для расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния высокотемпературных лопаток турбин // Вестник Московского Авиационного Института. 2012. Т. 19, № 4. С. 100-108.
9. Васильев Б.Е. Определение расчетной долговечности деталей турбин с помощью пользовательской модели ползучести в конечно-элементном комплексе ANSYS // Инженерный журнал: наука и инновации. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/402.html> (дата обращения 25.02.2015).
10. Васильев Б.Е. Модель ползучести лопаток турбин из монокристаллического суперсплава на никелевой основе: свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2014611870. 12.02.2014.
11. Allan C.D. Plasticity of nickel base single crystal superalloys: PHD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1995. 206 p.
12. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Термопрочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 455 с.

Numerical Study of the Material Characteristics Anisotropy Influence on the Single-Crystal Turbine Blades Strength Using a Developed Creep Model

B.E. Vasilyev^{1,*}

[*b_vasilyev@ciam.ru](mailto:b_vasilyev@ciam.ru)

¹Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranova, Moscow, Russia

Keywords: turbine blade, single-crystal, anisotropy, ANSYS

Currently, there is no creep model of single crystal material in the popular finite element software. That is why the Hill model as well as assumption of blade consideration as isotropic is widely used. Crystallographic model based approaches described in the technical literature are difficult to implement in every day calculations and they require a large amount of experimental data including those of indefinable under tests. Another problems with which structural analysts face are that it is impossible to describe a diversity of creep curves by a single equation and a set of experimental data is limited.

Despite the fact that there are numerous creep models and theories there is no current theory that correctly describes all varieties of creep curves in a wide range of stresses and temperatures, even for isotropic materials.

This paper discusses a novel approach of taking into account material properties anisotropy in combination with ANSYS finite element analysis software to predict the stress–strain state kinetics of single-crystal nickel-based turbine blades. The approach is based on using “equivalent direction” of stress state and has been implemented in ANSYS as a user creep routine.

Thus, using the proposed approach enables us to generalize the characteristics defined under uniaxial tensile tests of specimens with different crystallographic orientations on the complex stress in single crystal blade.

One of the main advantages of the developed creep model, in addition to the possible taking into account the anisotropy of the characteristics, are that it allows using a limited set of experimental data and their relatively easy processing. The model can be adapted to new data in case of obtaining characteristics in different crystallographic orientations. This approach can be easily reduced down to the level of isotropic materials.

Based on comparative calculations results of a single-crystal blade using the developed model with and without consideration of characteristics anisotropy a significant effect of this consideration was shown.

References

1. Vasil'ev B.E. Development of Single Crystal Materials Plasticity Model to Conduct Strength Analysis of Turbine Blades for Advanced Engines. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2013, no. 3, pp. 90-100. (in Russian).
2. Ramaglia A.D., Villari P. Creep and Fatigue of Single Crystal and Directionally Solidified Nickel-Base Blades via a Unified Approach Based on Hill48 Potential Function: Part 1 — Plasticity and Creep. *ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. Vol. 7A: Structures and Dynamics*, 2013, paper no. GT2013-94675, art. no. V07AT27A004. DOI: [10.1115/GT2013-94675](https://doi.org/10.1115/GT2013-94675)
3. Méric L., Cailletaud G. Single Crystal Modeling for Structural Calculations: Part 2—Finite Element Implementation. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1991, vol. 113, no. 1, pp. 171-182. DOI: [10.1115/1.2903375](https://doi.org/10.1115/1.2903375)
4. Kablov E.N. *Zharoprochnost' nikelovykh splavov* [High-temperature strength of Ni-based alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998. 464 p. (in Russian).
5. Naumenko K. *Modeling of High-Temperature Creep for Structural Analysis Applications. Ph.D thesis*. Martin-Luther-Universitat Halle-Wittenberg, 2006. 206 p.
6. Lokoshchenko A.M. Kinetic approach of long-term strength investigation of metals under biaxial tensile. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2005, no. 10, pp. 128-135. (in Russian).
7. Manu C.C. *Finite element analysis of stress rupture in pressure vessels exposed to accidental fire loading. Ph.D thesis*. Queen's University, 2008. 211 p.
8. Vasil'ev B.E., Magerramova L.A. Creep equations forming of alloys for calculations of stress-strain state kinetics of high temperature gas turbine blades. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 100-108. (in Russian).
9. Vasil'ev B.E. Determination of Turbine Components Design Life by Means of User Creep Model Developed by ANSYS Finite-Element System. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 10. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/402.html> , accessed 25.02.2015. (in Russian).
10. Vasil'ev B.E. *Model' polzuchesti lopatok turbin iz monokristallicheskogo supersplava na nikelvoi osnove* [Creep model of single crystal blades]. State registration certificate of computer program, no. 2014611870 RF, 2014. (in Russian).
11. Allan C.D. *Plasticity of nickel base single crystal superalloys. PHD thesis*. Massachusetts Institute of Technology, 1995. 206 p.
12. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Termoprochnost' detalei mashin* [Thermal strength of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 455 p. (in Russian).