

УДК 539.3

И. Х. БАДАМШИН

## ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ УПРУГОСТИ

Приведена модернизированная обобщенная модель и последовательность расчета на прочность элементов конструкций из эвтектических композитов на примере рабочей лопатки турбины. Основой теоретического расчета упругих и теплофизических характеристик эвтектических композитных материалов лопатки является электростатическая природа упругости. *Прочность; модуль упругости; рабочая лопатка газовой турбины; жаропрочный сплав; монокристалл; поликристалл; эвтектический композитный материал*

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существующие методы расчета на прочность элементов конструкций основаны на теории упругости механики деформируемого твердого тела, которая, в свою очередь, базируется на гипотезе сплошности среды и эмпирических исходных данных.

Исследованиями в области физики твердого тела было показано, что в основе прочности твердых тел лежит равновесие межатомных сил притяжения и отталкивания между зарядами кристаллической решетки. Иначе говоря, прочность определяется электростатическим взаимодействием электронов и ядер атомов кристаллической решетки, в основе которого лежит закон Кулона. Применение этого фундаментального свойства материалов позволяет развить методы расчета на прочность конструкций и перейти в модели поведения материалов от гипотезы сплошности среды к учету сил межатомного взаимодействия на уровне элементарной атомной ячейки.

Такой подход открывает новые возможности теоретически рассчитывать прочностные, упругие и теплофизические характеристики элементов конструкций, в которые входят: модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел упругости, предел текучести, коэффициент теплового расширения, коэффициент теплопроводности, являющиеся исходными данными в расчете напряженно-деформированного состояния деталей. Кроме того, одним из направлений развития нанотехнологий является пол-

ное трехмерное управление структурой материалов на атомном уровне с целью размещения каждого атома на своем месте. В этих условиях важно заранее знать упругие и прочностные свойства нанобъемов монокристаллов с бездефектной структурой.

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой теоретического расчета упругих и теплофизических характеристик эвтектических композитных материалов лопатки является электростатическая природа упругости, определяемая следующими основными допущениями: сила упругости в твердом теле определяется силой межатомного взаимодействия; сила межатомного взаимодействия имеет электростатическую природу; ионная, ковалентная, металлическая и молекулярная химические связи в основе своей являются электростатическими; межатомная связь определяется взаимодействием внешних электронных оболочек и ее конфигурацией [1–6, 11, 12].

Задача решается с помощью модернизированной обобщенной модели расчета на прочность на примере рабочей лопатки турбины и включает следующие этапы:

- 1) расчет упругих, прочностных, теплофизических и физических характеристик нанобъемов нитевидного монокристалла;
- 2) расчет упругих, прочностных, теплофизических и физических характеристик представительного микрообъема эвтектического композитного материала с армирующим волокном из нитевидного (бездефектного) монокристалла;
- 3) расчет напряженно-деформированного состояния макрообъема эвтектического ком-

позита – рабочей лопатки турбины методом конечных элементов; оценка запаса прочности.

При этом результаты расчета нанобъема являются исходными данными для расчета микрообъема, а результаты расчета микрообъема являются исходными данными для расчета макрообъема.

В качестве модельного материала лопатки рассматривается эвтектический композит Ni–NbC. Матрицей в этой композиции является монокристалл никеля Ni, а армирующей фазой (волоком) – нитевидный монокристалл карбида ниобия NbC.

В соответствии с первым этапом решения задачи теоретически рассчитываются модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел упругости, предел текучести, коэффициент теплового расширения, коэффициент теплопроводности составляющих композита. В частности, модуль упругости  $E$  монокристалла карбида ниобия NbC в зависимости от температуры рассчитывается на основе базовой формулы, разработанной автором [7, 8]:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \frac{1}{(a_0 + \Delta a_0)^2},$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд, равный по модулю заряду электрона;  $\pi = 3,14$ ;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Н·м<sup>2</sup> – электрическая постоянная;  $a_0$  – период кристаллической решетки;  $\Delta a_0$  – изменение периода кристаллической решетки;  $r$  – расстояние между ближайшими соседями-атомами.

Изменение периода кристаллической решетки  $a_0$  определяется по следующей формуле, разработанной автором [8, 9]:

$$\Delta a_0 = 0,5 \left( \frac{e^2}{\frac{e^2}{a_0} - c'_v \Delta T 2\pi\epsilon_0} - a_0 \right),$$

где  $c'_v$  – теплоемкость атома при постоянном объеме;  $\Delta T$  – изменение температуры.

Коэффициент теплового расширения NbC определяется как

$$\alpha = \Delta a_0 / (a_0 \Delta T).$$

Результаты расчета представлены на графиках (рис. 1, 2).

В соответствии с алгоритмом обобщенной модели получены количественные данные по упругим, прочностным и теплофизическим характеристикам армирующей фазы из карбида ниобия NbC в зависимости от температуры.

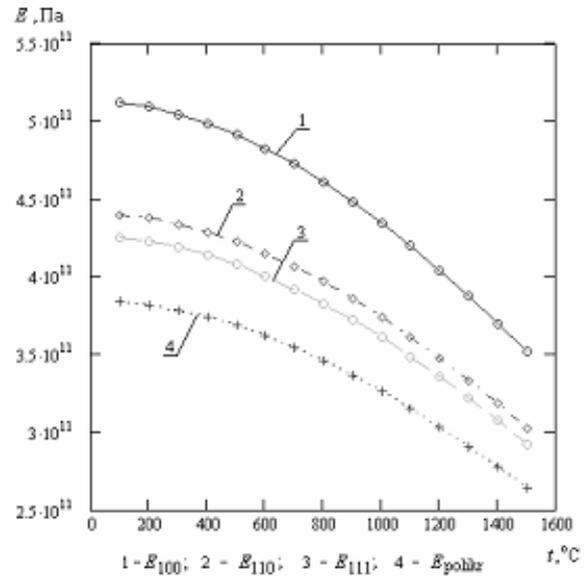


Рис. 1. Теоретическая зависимость модуля упругости NbC от температуры:  
1 –  $E_{100}$ ; 2 –  $E_{110}$ ; 3 –  $E_{111}$

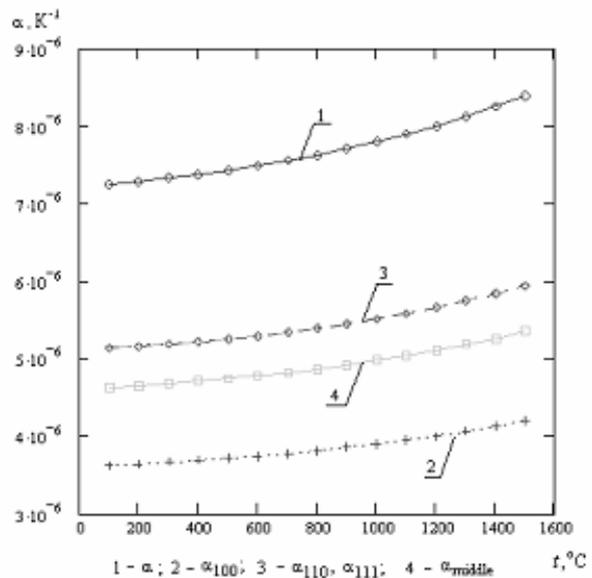


Рис. 2. Теоретическая зависимость коэффициента теплового расширения NbC от температуры:  
1 –  $\alpha$ ; 2 –  $\alpha_{100}$ ; 3 –  $\alpha_{110}, \alpha_{111}$

Аналогично для матрицы на основе никеля Ni определяются упругие, прочностные, теплофизические и физические характеристики.

Необходимо отметить, что как столбчатая, так и дендритная структуры монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов представляют собой матрицу  $\gamma$ -фазы, дисперсионно-упрочненной кубоидными частицами  $\gamma'$ -фазы. Основой твердого раствора является гранецентрированная кристаллическая решетка никеля.

Для расчета упругих характеристик принимаются следующие допущения: материал лопатки имеет монокристаллическую структуру

столбчатого или дендритного вида с кристаллографической ориентацией [001]. Матрицей такого материала является  $\gamma$ -твердый раствор на основе никеля.

Тогда модуль упругости монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов будет определяться матрицей, т. е.  $\gamma$ -твердым раствором, основой которого является никель (табл. 1).

В результате исследования установлено, что расчетные значения модуля упругости монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов в кристаллографическом направлении [001] имеют удовлетворительную сходимость с экспериментом с погрешностью от 0,9% до 7,8% (табл.1). Полученные результаты позволяют обоснованно использовать модельную композицию Ni-NbC для оценки прочности лопатки в области упругих деформаций из материала типа ВКЛС с кристаллографическим направлением [001].

Необходимо отметить также, что для кристаллографических направлений [110], [111] максимальная погрешность расчета для рассматриваемых материалов (табл. 1) составляет 13,8% (в частности, для сплава ЖС 36 моно).

Таблица 1

Наименование сплава или элемента и направление действия нагрузки	Величина модуля упругости, ГПа		Погрешность, %
	Расчетная	Экспериментальная	
Ni(ГЦК)			
[001]	140,2	138,0	1,6
[110]	210,3	215,0 [12]	2,1
[111]	262,9	262,0	0,3
ЖС 6Ф моно			
[001]	140,2	139 [10]	0,9
[110]	–	220	
[111]	–	305	
ЖС 32 001			
[001]	140,2	135...140 [11]	3,8
[110]	–	–	
[111]	–	280...300	
ЖС 36 моно			
[001]	140,2	130 [10]	7,8
[110]	–	215	
[111]	–	305	

Примечание: экспериментальные значения для ЖС 36 моно и ЖС 6Ф моно взяты из графика в источнике [10]

В соответствии с алгоритмом обобщенной модели прочности вторым этапом расчета лопатки является определение упругих, прочностных, теплофизических характеристик микро-

объема эвтектического композита Ni-NbC: модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , модуля сдвига  $G$ , а также коэффициента теплового расширения  $\alpha$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , плотности  $\rho$  в зависимости от объемной доли волокна в матрице  $\psi$ . Для этого используется расчет по методу смеси с учетом коэффициента Пуассона [13]. В частности, в табл. 2 в качестве примера сведены результаты расчета упругих характеристик композита Ni-NbC с ортотропными свойствами, объемной долей армирующей фазы 10%, при 1100 °С (табл. 2).

Полученные результаты расчета упругих, прочностных, теплофизических и физических характеристик микрообъема эвтектического композита позволяют сформировать исходные данные для термочностного анализа рабочей лопатки турбины из модельного материала композиции Ni-NbC.

Таблица 2

**Ортотропные свойства композита Ni-NbC с объемной долей  $\psi = 10\%$ , при 1100 °С**

Наименование	Обозначение	Размерность	Величина
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	8801
Модуль упругости по оси Z	$E_Z$	ГПа	128,3
Модуль упругости по оси X	$E_X$		93,7
Модуль упругости по оси Y	$E_Y$		93,7
Коэффициент Пуассона в плоскости XZ	$\nu_{XZ}$	–	0,367
Коэффициент Пуассона в плоскости XY	$\nu_{XY}$		0,268
Коэффициент Пуассона в плоскости YZ	$\nu_{YZ}$		0,268
Модуль сдвига в плоскости XZ	$G_{XZ}$	ГПа	46,9
Модуль сдвига в плоскости YZ	$G_{YX}$		36,9
Модуль сдвига в плоскости XY	$G_{XY}$		36,9
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_z$	Вт/м·С	44,94
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_x$	Вт/м·С	8,64
Коэффициент теплового расширения	$\alpha_z$	С <sup>-1</sup>	$8,52 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплового расширения	$\alpha_x$	С <sup>-1</sup>	$10,07 \cdot 10^{-6}$

Напряженно-деформированное состояние лопатки из эвтектического композитного материала рассчитывается с учетом следующих допущений: свойства границ фаз не учитываются, так как армирующая фаза формируется в процессе кристаллизации и представляет собой единое целое с матрицей; эвтектический композит рассматривается как ортотропный материал с бездефектной структурой армирующей фазы; объем лопатки моделируется как однородное ортотропное тело с симметрией относительно срединной поверхности.

Переход в расчетах от нанобъема к микрообъему и макрообъему основан на бездефектной структуре нитевидного монокристалла. Нанобъем – элементарная атомная ячейка – периодически повторяется в нитевидном монокристалле. В поперечном направлении нанобъем, периодически повторяясь, достигает микрообъема. В продольном направлении микрообъем, периодически повторяясь, достигает макрообъема, т.е. длина волокон (армирующей фазы) равна длине пера лопатки.

Для расчета упругого напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов используется типовое распределение температуры в продольном и в поперечном направлении по толщине пера неохлаждаемой лопатки. Задаются трехмерная геометрия лопатки, конечно-элементная сетка, граничные условия и нагрузка от инерционных и газовых сил.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результатом термочувствительного анализа является определение запасов прочности лопатки из модельного материала Ni-NbC, а также исследование влияния технологических, эксплуатационных факторов на конструкционную прочность лопатки из эвтектических композитов различного состава при разных режимах работы двигателя. В частности, в табл. 3 приведены максимальные эквивалентные напряжения в соответствующих сечениях и запасы прочности лопатки из модельного композита Ni-NbC с объемной долей армирующей фазы 10% и 50%.

В результате исследования установлено, что при изменении объемной доли армирующей фазы с 10% до 50% максимальные эквивалентные напряжения снижаются, а запас прочности увеличивается. В частности, в корневом сечении при 900 °С максимальное эквивалентное напряжение со 140 МПа снижается до

128 МПа, соответственно запас прочности повышается с 2,43 до 2,66 (табл. 3).

Таблица 3  
Результаты расчета и запасы прочности лопатки из Ni-NbC

Наименование параметра	Величина параметра при $t, ^\circ\text{C}$		
	900	1000	1100
Предел длительной прочности, $\sigma_{100}^t$ , МПа	340	210	120
Максимальные эквивалентные напряжения при $\psi = 10\%$ , МПа	140	124	91,2
Запас прочности при $\psi = 10\%$	2,43	1,69	1,32
Максимальные эквивалентные напряжения при $\psi = 50\%$ , МПа	128	106	78,2
Запас прочности при $\psi = 50\%$	2,66	1,98	1,53

#### ВЫВОДЫ

Разработанный метод и модернизированная обобщенная модель позволяют исследовать влияния технологических, металлургических и эксплуатационных факторов на конструкционную прочность лопатки из эвтектических композитов различного состава при разных режимах работы двигателя, в частности, оценивать изменение запасов прочности лопатки в зависимости от:

- объемной доли армирующей фазы (волокна);
- направления кристаллизации эвтектического композита [001], [011], [111], которое влияет на его упругие и теплофизические характеристики;
- остаточных термических напряжений на границе волокно-матрица.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела. М.: Наука, 1965. 366 с.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
3. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000. 494 с.
4. Кикоин И. К., Кикоин А. К. Физика. М.: Просвещение, 1998. 191 с.
5. Бокштейн С. З. Строение и свойства металлических сплавов. М.: Металлургия, 1971. 496 с.
6. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. 2. Мир, 1975. 399 с.
7. Бадамшин И. Х. Способ определения модуля упругости монокристаллов в зависимости от темпе-

ратуры: Пат. 2328715 РФ, МКИ6 G 01 N 3/00. Заявлено 09.01.2007; Опубл. 10.07.2008, Бюл. № 19.

8. **Бадамшин И. Х.** Расчет упругих и теплофизических характеристик металлов и их тугоплавких соединений для оценки остаточных термических напряжений в эвтектических композитах и теплозащитных покрытиях // Тяжелое машиностроение. 2007. № 4. С. 33–34.

9. **Бадамшин И. Х.** Способ определения коэффициента линейного теплового расширения: Пат. 2271534 РФ, МКИ6 G 01 M 25/00. Заявлено 01.11.2004; Опубл. 10.03.2006, Бюл. № 7.

10. **Ножницкий Ю. А., Голубовский Е. Р.** Обеспечение прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД // Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение: тр. междунар. науч.-техн. конф. М: ВИАМ, 2006. 378 с.

11. **Гецов Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1996.

12. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: Справочник. М.: Metallurgia, 1976. 600 с.

13. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов: Учеб. пособие / В. В. Васильев [и др.]. М.: МАИ, 1985. 218 с.

#### ОБ АВТОРЕ



**Бадамшин Ильдар Хайдарович**, дипл. инж. по авиац. двиг. (УАИ, 1979). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двиг. и уст. (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. испытаний и прочности ГТД.