

Г. Н. АЗАРОВА, Б. Я. КЛАДНИЦКИЙ, Ю. В. ШЕХТМАН

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОСЕЙ МОНОКРИСТАЛЛА В ЛОПАТКАХ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приводятся результаты исследований по выбору рациональной ориентации осей монокристалла в охлаждаемых рабочих лопатках современных газотурбинных двигателей. Задача решена в трехмерной постановке, что позволило проанализировать напряженно-деформированное состояние при произвольной ориентации осей кристаллизации. Даны рекомендации о предпочтительном направлении осей монокристалла в зависимости от условий эксплуатации.

1. Свойства монокристаллов и особенности их использования в конструкциях газотурбинных двигателей. Повышение рабочих параметров газотурбинных двигателей (ГТД) стимулировало создание новых материалов, способных обеспечить прочность и ресурс деталей в этих условиях. Такими материалами являются монокристаллические сплавы на никелевой основе, обладающие анизотропией упругих и прочностных свойств, причем максимальные значения упругих постоянных реализуются в направлениях, не всегда совпадающих с направлениями максимальных значений прочностных характеристик. Поэтому рациональный выбор ориентации осей кристалла является актуальной проблемой при проектировании деталей ГТД.

Ниже эта проблема решается по отношению к охлаждаемым рабочим лопаткам. Трехмерная постановка задачи (использован комплекс конечноэлементных программ пространственного анализа конструкций¹) позволила учесть сложное взаимодействие всех компонент напряженно-деформированного состояния при произвольной ориентации осей кристаллической решетки.

Основу кристаллической решетки монокристаллических никелевых сплавов составляют ячейки никеля, имеющие гранецентрированную кубическую структуру (ГЦК) (фиг. 1). Обобщенный закон Гука для такого материала имеет вид [1] ($\{\epsilon\}$, $\{\sigma\}$ – векторы деформаций и напряжений, $[S]$ – матрица податливости):

$$\{\epsilon\} = [S] \{\sigma\} \quad (1.1)$$

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T, \quad \{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & & & \\ & \cdot & S_{11} & S_{12} & & \\ & & \cdot & S_{11} & 0 & \\ & & & \cdot & S_{44} & 0 & 0 \\ & & & & \cdot & S_{44} & 0 \\ & & & & & \cdot & S_{44} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$S_{11} = 1/E_x = 1/E_y = 1/E_z = 1/E, \quad S_{12} = -\nu_{xy}/E_x = -\nu_{zx}/E_x = -\nu/E \quad (1.3)$$

$$S_{44} = 1/G_{xy} = 1/G_{yz} = 1/G_{zx} = 1/G$$

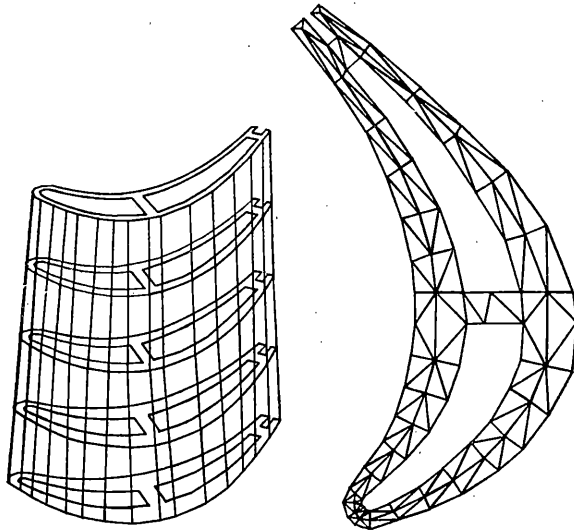
Соотношения (1.2) и (1.3) записаны в предположении, что оси x, y, z совпадают с осями кристалла. Матрица $[S]$ симметрична (явно приведены только компоненты, стоящие выше главной диагонали). При изменении ориентации компоненты $[S]$ преобразуются по тензорным законам, и матрица податливости становится, вообще говоря, полностью заполненной.

С кристаллографической точки зрения упругие свойства монокристаллических материалов полностью описываются тремя компонентами матрицы податливости. Для рассматриваемых материалов зависимость коэффициентов податливости от температуры может быть аппроксимирована полиномами второй степени (T – абсолютная температура):

$$\begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ S_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Коэффициенты податливости естественным образом определяют традиционные характеристики: модуль упругости E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона ν . Для упругих постоянных монокристаллических материалов характерны ярко выраженные зависимости от ориентации соответствующих направлений относительно осей кристалла. Температурно-ориентационные зависимости наблюдаются и для

¹ Азарова Г. Н., Пархаева Н. А., Шехтман Ю. В. Система трехмерного анализа деталей ГТД // Современные проблемы строит. мех. и прочности л. а.: Тез. докл. Всес. конф. М., 1983. С. 121.



Фиг. 4

ной прочности монокристаллических материалов совершенно не изучен, предлагается оценку длительной прочности проводить по максимальному главному напряжению с интерполяцией σ_1 , свойственных различным направлениям, на направление σ_1 . В первом приближении используется линейная интерполяция σ_1 по площади пересекемого вектором σ_1 стереографического треугольника, в терминах которого определены σ_1^{10011} , σ_1^{10111} , σ_1^{11111} . В частном случае, когда σ_1 действует в одном

Таблица

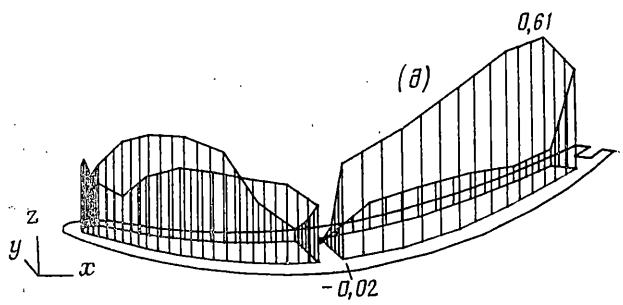
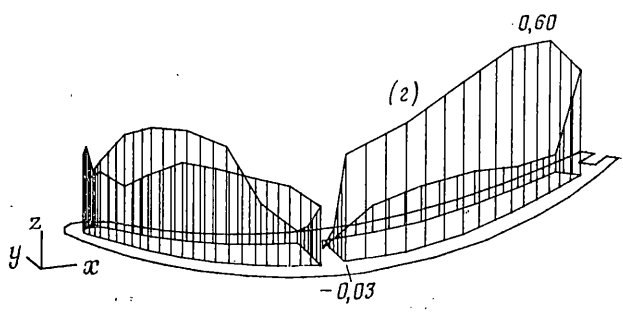
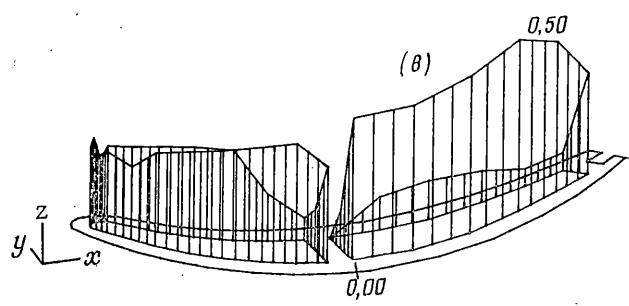
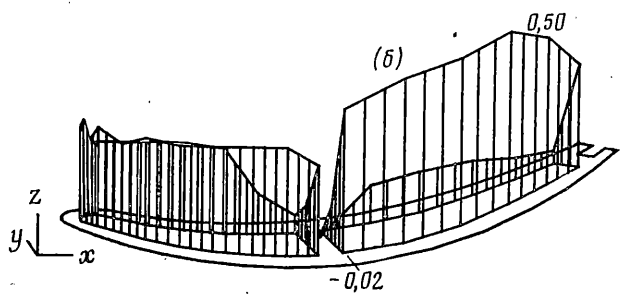
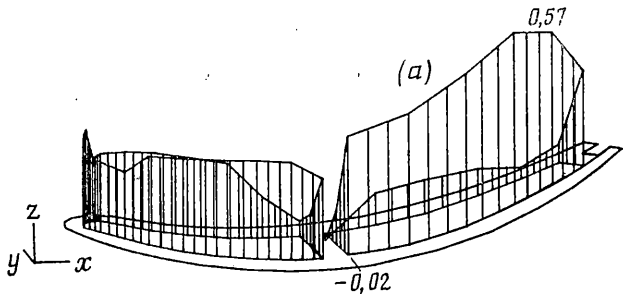
z	x	σ_z	σ_x	τ_{zx}
001	100	56	54	0
	110	74,5	105	0
011	100	106	72,2	0
	011	54,6	52,9	0
111	011	95,4	78,3	0,94
	121	94,6	83,1	13,8
	231	92,7	81,5	12,1

из этих направлений, имеем известную оценку для одноосного напряженного состояния.

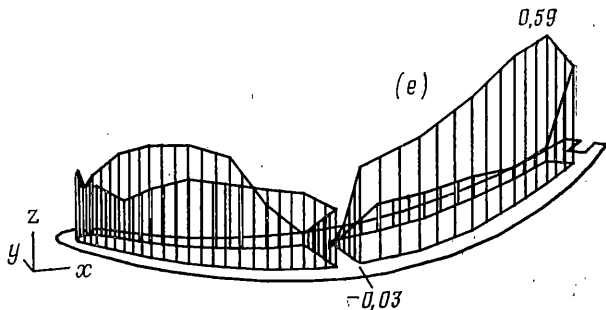
2. Исследование влияния ориентации осей монокристалла на прочность на тонкостенных моделях. Проводить параметрические исследования на реальной лопатке с целью рационального расположения осей монокристалла затруднительно, так как ориентация плоскостей решеток изменяется в разных зонах монокристаллической лопатки в соответствии с естественной закруткой профиля пера. Кроме того, температурное состояние лопатки является существенно неравномерным как по высоте, так и в плоскостях сечений. Поэтому целесообразно провести необходимые расчетные исследования на упрощенных моделях, имитирующих в какой-то мере работу лопаток ГТД.

Влияние ориентации кристаллографических осей на напряженное состояние иллюстрируется расчетом тонкостенной пластины из никелевого сплава с податливостями $S_{11}=0,7654 \times 10^{-4}$ мм²/кг, $S_{12}=-0,292 \times 10^{-4}$ мм²/кг, $S_{44}=0,8587 \times 10^{-4}$ мм²/кг, подверженной температурному воздействию. Перепад температур по толщине равнялся 300°. Термические напряжения в плоскости пластинки в зависимости от аксиальной ориентации (z) и азимутальной (x) представлены в таблице. Видно, что напряженное состояние в тонкой пластинке существенно изменяется не только с изменением аксиальной ориентации, но и с изменением азимутальной ориентации пластинки.

Для более подробного исследования вопросов по применению жаропрочных монокристаллических сплавов в рабочих лопатках турбин авиационных ГТД в качестве расчетной модели рассматривалась шестиугольная полая призма, нагруженная растягивающими усилиями и подверженная температурному воздействию. Схема дискретизации модели по высоте и в сечении представлена на фиг. 2. С помощью этой модели имитировалось сочетание зон плоского напряженно-деформированного состояния с клинообразными зонами, где реализуется приближенно одноосное на-



Фиг. 5 (а-д)



Фиг. 5 (e)

приженное состояние, и наличие переходных зон с трехмерным напряженным состоянием. Для параметрического анализа диапазоны осевой нагрузки, соответствующей напряжениям от центробежных сил, уровней температур и перепада их по стенке принимались близкими к значениям, возникающим в лопатках современных ГТД: осевое растягивающее усилие $F_z=0$; 14; 15; 16 кг/мм²; средний уровень температур $T_m=900$; 1000° С; перепад температуры между внутренним («холодным») и наружным слоями $\Delta T=40$; 80°.

Всевозможные варианты сочетания этих трех параметров были рассмотрены на модели из нивелевого сплава для двух случаев ориентации направленной кристаллизации: а) ось z тела совпадает с кристаллографической осью [001]; б) ось z тела совпадает с кристаллографической осью [111].

Оценивались коэффициенты запасов длительной статической прочности по максимальным главным напряжениям на длительность 100 часов:

$$k_m = \sigma_l / \sigma_1 \quad (2.1)$$

где σ_l — предел длительной прочности, σ_1 — максимальное главное напряжение, обусловленное действием центробежных сил и температурным воздействием.

На фиг. 3 в пространстве указанных параметров показаны области предпочтительной ориентации для двух основных направлений осей кристалла, характеризующихся максимальным различием жесткостных и прочностных характеристик. Поверхность $k_m = \text{const}$ (на фиг. 3 $k_m=1, 2$) указывает область параметров $F_z, T_m, \Delta T$, где конструкция достигает определенного уровня своих функциональных свойств. Видно, что с точки зрения максимальных значений коэффициентов запаса по длительной прочности, направление [111] является предпочтительным в ограниченном диапазоне перепада температур по стенке.

3. Рациональное расположение осей монокристалла в охлаждаемой лопатке. Вопрос о рациональном расположении осей монокристалла требует подробного анализа даже для тел довольно простой формы. Гораздо труднее сделать такой выбор для реальных лопаток современных двигателей, имеющих очень сложную конфигурацию при сочетании зон с различными типами напряженных состояний, температурами и т. п. Тем не менее, результаты параметрического исследования, подобного описанному в п. 2, могут быть полезными при оценке напряженности таких сложных конструкций, как охлаждаемая лопатка турбины.

На фиг. 4 приведена расчетная схема пера рабочей охлаждаемой лопатки, подверженной действию центробежных сил и температурному воздействию. Рассматривались два основных случая расположения оси лопатки: вдоль направлений кристалла [001] и [111]. Для каждого из этих случаев аксиальной ориентации исследовалось изменение напряженно-деформированного состояния при повороте осей кристалла вокруг оси лопатки на угол $\alpha=0, 30, 60^\circ$ (азимутальная ориентация).

Анализ полученных результатов показал следующее. Уровень осевых напряжений при ориентации [111] примерно в два раза выше соответствующих напряжений при ориентации [001]. Несмотря на более высокий уровень σ_1 в направлении кристаллизации [111] по сравнению с [001] коэффициенты запаса по длительной прочности (2.1) в случае совпадения оси лопатки с направлением [001] значительно превосходят коэффициенты запаса при кристаллизации лопатки в направлении [111]. На фиг. 5 представлены по контуру среднего сечения лопатки эпюры величины $1/k_m$ для направлений кристаллизации [001] (а, б, в) и [111] (г, д, е) при повороте осей кристалла на 0, 30, 60°. Вывод о предпочтительности в данном случае осевой ориентации [001] вполне согласуется с результатами параметрического анализа (фиг. 3), поскольку средний уровень напряжений и температур соответствовал изученному диапазону параметров, а значительный диапазон изменения температур (около 200°) при нелинейном характере распределения однозначно свидетельствуют о преимуществе упомянутой ориентации.

Таким образом, параметрический сравнительный анализ напряженности монокристаллической модели позволяет при использовании простых методик оценки напряженности лопатки (например, по теории стержней) и знании ее температурного состояния обоснованно выбрать предпочтительную ориентацию кристаллизации материала лопатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лехницкий С. Г.* Теория упругости анизотропного тела. М., Л.: Гостехиздат, 1959. 300 с.
2. *Светлов И. Л., Суханов Н. Н., Криeko А. И., Роцина И. Н. Хауцинская И. М., Самойлов А. И.* Температурно-ориентационная зависимость характеристик кратковременной прочности, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения монокристаллов сплава ЖС6Ф // Проблемы прочности. 1987. № 1. С. 51–56.
3. *Голубовский Е. Р., Толораия В. Н., Светлов И. Л., Хауцкий К. К., Подъячев А. П.* К вопросу о влиянии кристаллографической ориентации на длительную прочность и ползучесть никелевого сплава. Сообщение 1 // Проблемы прочности. 1987. № 9. С. 11–17.
4. *Толораия В. Н., Криeko А. И., Голубовский Е. Р., Светлов И. Л., Седыx В. А. Хауцкий К. К.* К вопросу о влиянии кристаллографической ориентации на длительную прочность и ползучесть никелевого сплава. Сообщение 2 // Проблемы прочности. 1987. № 9. С. 18–23.

Москва

Поступила в редакцию
19.V.1989