

Л. А. МАГЕРРАМОВА, Б. Е. ВАСИЛЬЕВ

ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Применение жаропрочных монокристаллических сплавов для охлаждаемых лопаток турбин позволяет значительно увеличить ресурс ГТД. Современные монокристаллические никелевые сплавы обладают существенной анизотропией свойств, что необходимо учитывать при расчетах напряженно-деформированного состояния и прочности. С помощью конечно-элементных комплексов исследовано влияние азимутальной ориентации кристаллографического направления монокристаллического сплава в турбинных лопатках на их напряженно-деформированное состояние (НДС), статическую прочность и долговечность.
Газовые турбины; монокристаллические лопатки; напряженно-деформированное состояние; прочность

ВВЕДЕНИЕ

В современных высокотемпературных авиационных газотурбинных двигателях широко используются лопатки турбин, отливаемые методом направленной кристаллизации и монокристаллического литья [1–3].

Основными достоинствами этих сплавов являются: увеличенное сопротивление высокотемпературной ползучести за счет исключения границ между зёрнами, уменьшенная по сравнению с обычными материалами с равноосной структурой величина модуля упругости в кристаллографическом направлении $\langle 001 \rangle$, что значительно уменьшает термические напряжения и увеличивает сопротивление малоциклового усталости.

Кристаллографическая решетка монокристаллических сплавов имеет три взаимно ортогональные плоскости симметрии (рис. 1). Такие сплавы обладают анизотропией свойств, поэтому ориентация монокристалла по отношению к действующим нагрузкам играет существенную роль.

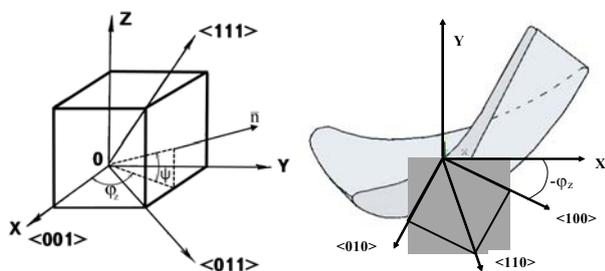


Рис. 1. Кристаллографическая ориентация монокристаллического сплава в лопатке

При производстве монокристаллических лопаток газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов с гранецентрированной

кубической решеткой регламентируется аксиальная кристаллографическая ориентация (КГО) продольной оси рабочей лопатки. При этом продольная ось монокристаллической лопатки должна совпадать с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$, отклонение от заданной КГО не должно превышать установленного значения. Таким образом, используется такая пространственная ориентация кристаллографической решетки монокристалла в теле лопатки, при которой четыре грани куба монокристалла расположены параллельно действию центробежной нагрузки.

Регламентация азимутальной КГО отливки лопатки в настоящее время, как правило, отсутствует. Вместе с тем азимутальная КГО также может оказывать влияние на прочностную надежность лопатки.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ В УПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ

Для монокристаллических никелевых сплавов с кубической симметрией матрица податливости $[S]$ в системе координат X, Y, Z , совпадающих с осями упругой симметрии монокристалла, имеет вид [1]:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}$$

Коэффициенты этой матрицы определяются выражениями:

$$S_{11} = 1/E, \quad S_{12} = -\mu/E, \quad S_{44} = 1/G,$$

где E, μ, G – три независимые константы: соответственно модуль упругости, коэффициент Пуассона и модуль сдвига монокристалла для его главных осей упругой симметрии X, Y, Z .

Задавая такую матрицу податливости [4], можно описать модель упругого поведения материала с гранецентрированной решеткой.

На примере двух охлаждаемых лопаток турбин, отлитых из монокристаллического сплава ЖС32 (№1) и DD3 (№2) с ориентацией кристаллографической оси $\langle 001 \rangle$ в направлении оси лопатки (ось Z), проведены расчетные исследования влияния азимутальной ориентации на напряженно-деформированное состояние (НДС) и статическую прочность при условии упругого деформирования.

На рис. 2 приведено поле температур и эквивалентных напряжений по Мизесу (σ) для лопатки №1. Там же обозначены зоны с высоким уровнем напряжений. Эти зоны для данной лопатки в заданных условиях эксплуатации лимитируют ее долговечность.

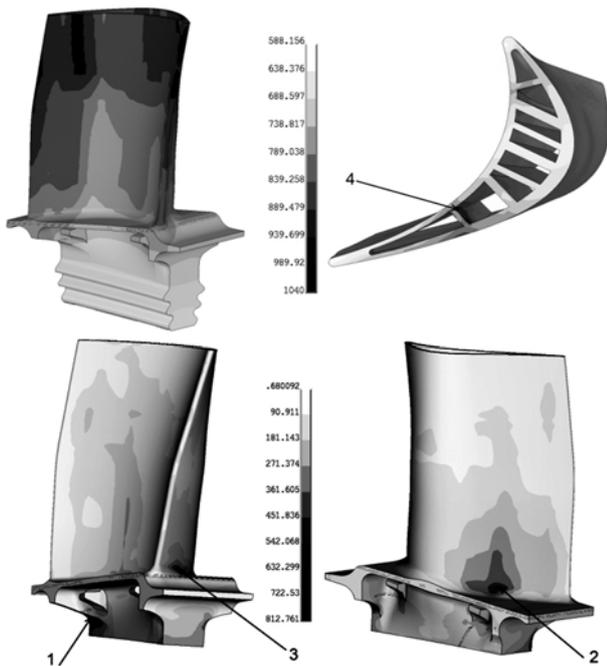


Рис. 2. Температурное поле (вверху слева) и эквивалентные напряжения по Мизесу

Коэффициент запаса кратковременной статической прочности (K_m) и повреждаемость по долговечности (D_t) за 100 часов определялись по свойствам сплава для оси $\langle 001 \rangle$:

$$K_m = \sigma_b / \sigma, \quad D_t = (1/K_m)^m, \quad (1)$$

где σ_b – предел кратковременной прочности, σ – действующие напряжения Мизеса, m – показатель степени уравнения кривой длительной прочности $\sigma^m \cdot t = \text{const}$, где t – длительность (час).

Влияние азимутальной ориентации

Азимутальная ориентация определяется углом φ_z , т.е. углом между направлением $\langle 100 \rangle$ в плоскости поперечного сечения лопатки и осью двигателя (рис. 1 справа). Проведены расчеты НДС при изменении угла φ_z в лопатке от -90 до $+90^\circ$ (рис. 3). При этом лопатка не имеет аксиального отклонения от направления $\langle 001 \rangle$.

Для зон 1 и 5 установлено влияние угла азимутальной ориентации на величины запаса и повреждаемости по долговечности (рис. 4, 5). Зависимости минимального K_m и максимальной D_t от угла φ_z определялись по всей лопатке.

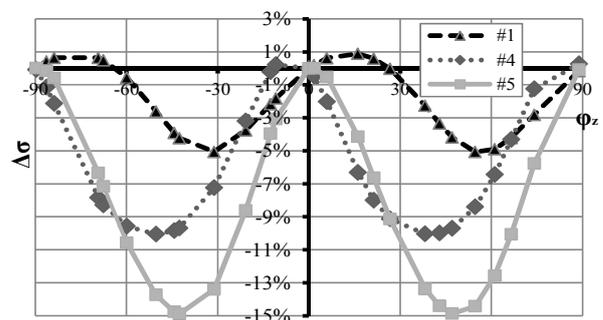


Рис. 3. Влияние угла φ_z на изменения напряжений в зонах 1, 4, 5 лопатки

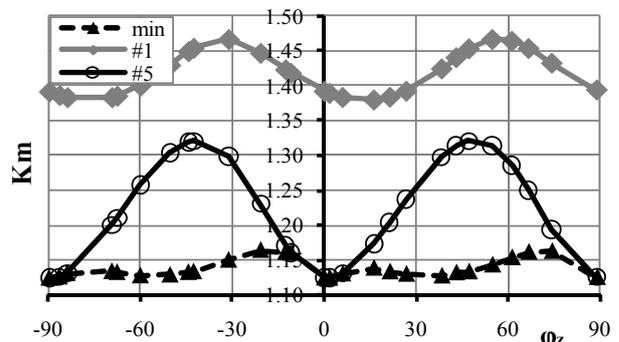


Рис. 4. Влияние азимутальной ориентации на K_m в зонах 1, 5 и минимальный K_m по лопатке

Для углов $\varphi_z \sim -50$ и 40° $\text{Min}K_m = 1,116$. При угле азимутальной ориентации -22° или 74° расчетное значение запасов кратковременной прочности по напряжениям и долговечности повышаются соответственно на $\sim 3,5\%$ и $\sim 35\%$.

Аналогичные исследования проведены для рабочей лопатки турбины, отлитой методом монокристаллического литья из сплава DD3, поле температур которой показано на рис. 6. Значение напряжений и обозначения исследуемых зон – на рис. 7.

На рис. 8, 9 показано влияние угла азимутальной ориентации в лопатке №2 на K_m и D_t . При изменении φ_z максимальная разница запасов в зоне 2 составляет $\sim 7\%$, в зоне 4 – $\sim 30\%$.

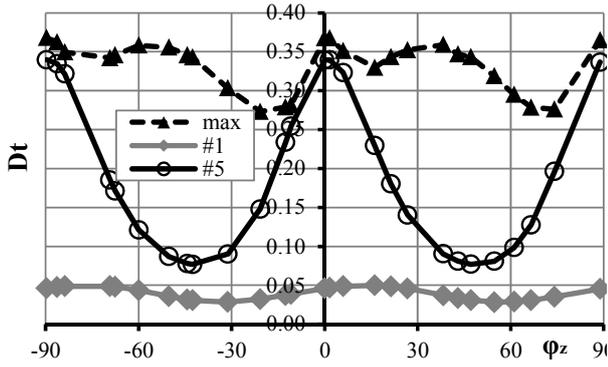


Рис. 5. Влияние азимутальной ориентации на D_t в зонах 1, 5 и максимальную D_t по лопатке

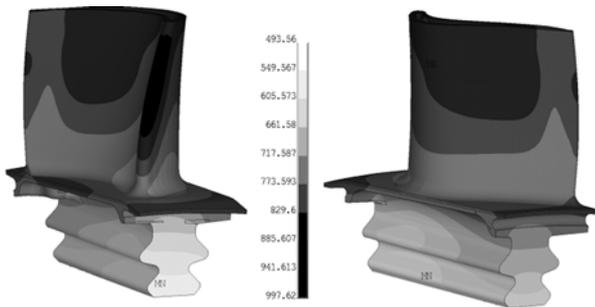


Рис. 6. Температурное поле лопатки № 2

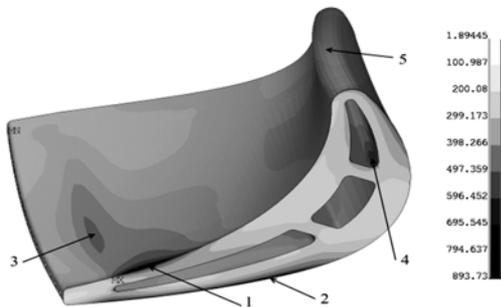


Рис. 7. Напряжения по Мизесу. Обозначение исследуемых зон лопатки №2

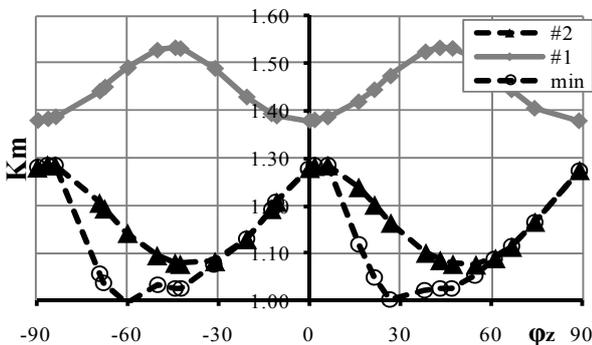


Рис. 8. Влияние азимутальной ориентации на K_m в зонах 1, 2 и минимальный K_m по лопатке

Выбор оптимального значения угла азимутальной ориентации (для этой лопатки 0° или $\pm 90^\circ$) позволяет увеличить значение запаса кратковременной прочности по напряжениям на $\sim 30\%$ и по долговечности в 10 раз.

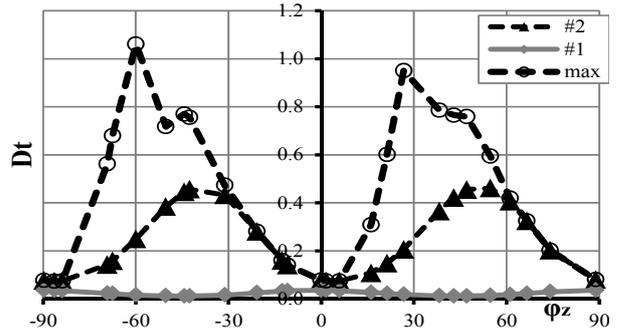


Рис. 9. Влияние азимутальной ориентации на D_t в зонах 1, 2 и максимальную D_t по лопатке

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НДС И ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ПРИ УЧЕТЕ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

Для определения НДС и прочности охлаждаемых лопаток с учетом упруго-пластического поведения материала лопаток можно воспользоваться приближенным подходом, базирующимся на рассмотрении двухосного напряженного состояния в стенке лопатки как суммы двух одноосных напряженных состояний, определяемых отдельно нормальными напряжениями σ_z и σ_s в стенке охлаждаемой турбинной лопатки, отлитой с первичной кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ [5].

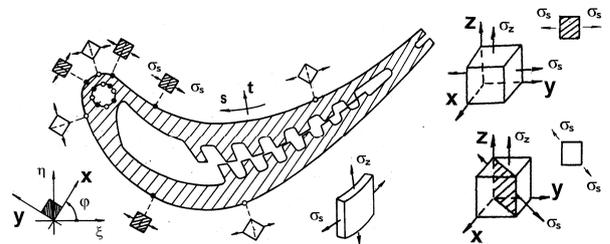


Рис. 10. Напряжения в поперечном сечении

Используя предположение о том, что касательные напряжения τ_{zx} , τ_{zy} в плоскостях действия нормальных напряжений σ_z и σ_s малы, ими можно пренебречь для стенок охлаждаемых лопаток вдали от зон концентрации напряжений. Напряжения σ_s в плоскости поперечного сечения лопатки (рис. 10) по-разному ориентированы $0 \leq \phi_z \leq 45^\circ$, $\psi = 0$ (рис. 1) относительно кристаллографических осей $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$. В расчетах учитывают механические свойства для направлений КГО от $\langle 001 \rangle$ до $\langle 011 \rangle$.

Эквивалентное напряжение по Мизесу в этом случае может быть вычислено по формуле:

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + K_p(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2)$$

Здесь коэффициент анизотропии пластичности для каждой заданной температуры определяется по формуле: $K_p = 4 \cdot (\sigma_{<001>T}^2 / \sigma_{<011>T}^2) - 1$, где $\sigma_{<001>T}$ и $\sigma_{<011>T}$ – пределы текучести для монокристаллического сплава при растяжении в направлении $<001>$ и $<011>$ соответственно.

Зависимость коэффициента анизотропии пластичности для сплава ЖС32 приведена на рис. 11.

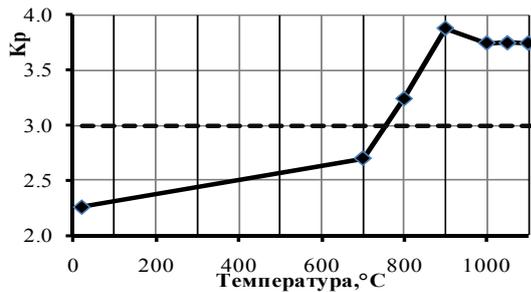


Рис. 11. Значения коэффициента анизотропии пластичности

Штриховая линия на рисунке соответствует изотропному материалу.

Расчетные соотношения ползучести при использовании теории Хилла могут быть представлены в виде, аналогичном формуле (2), в которой K_p заменяется на коэффициент анизотропии ползучести K_c . При известных экспериментальных скоростях ползучести для направлений $<001>$ и $<011>$ ($\xi_{<001>}$, $\xi_{<011>}$), K_c приближенно может быть вычислен по формуле: $K_c = 4 \cdot (\xi_{<011>}^2 / \xi_{<001>}^2) - 1$.

Для сплава ЖС32 кривые скоростей ползучести приведены на рис. 12.

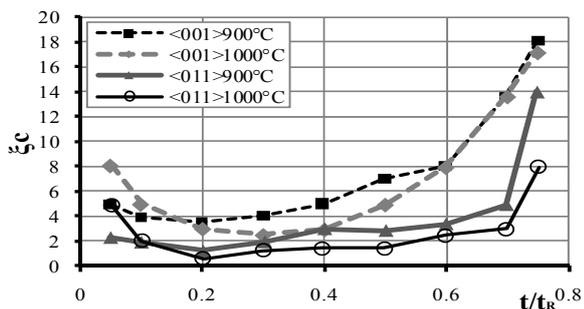


Рис. 12. Кривые скоростей ползучести сплава ЖС32 для направлений $<001>$ и $<011>$

Коэффициент запаса длительной статической прочности определяется по соответствующей формуле (1), в которой σ_b заменяется на $\sigma_{R<001>}$ предел длительной статической прочности монокристаллического сплава при растяжении в направлении $<001>$, а действующее эквивалентное напряжение определяется по формуле аналогичной (2), в которой K_p заменяется на коэффициент анизотропии

длительной статической прочности $K_R = 4 \cdot (\sigma_{R<001>}^2 / \sigma_{R<011>}^2) - 1$. На рис. 13 для ЖС32 приведены значения K_R для разных температур. Штриховая линия соответствует изотропному сплаву.

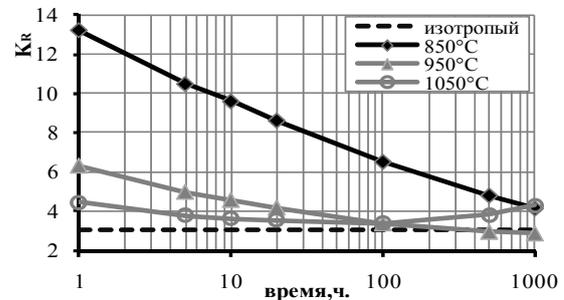


Рис. 13. Значения коэффициента анизотропии длительной статической прочности

Влияние азимутальной ориентации в условиях упругопластического деформирования и ползучести

Проведен расчет НДС с учетом пластичности и ползучести сечения лопатки №3 и определены зависимости запасов длительной статической прочности по напряжениям и повреждаемости по долговечности от азимутальной ориентации монокристалла. Максимальная температура в рассматриваемом сечении $\sim 1014^\circ\text{C}$, разница между максимальной и минимальной температурами $\sim 467^\circ$ (рис. 14).

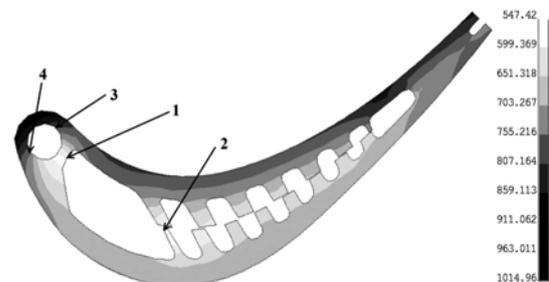


Рис. 14. Поле температур лопатки №3 с обозначенными характерными зонами

На рис. 15 и 16 приведены зависимости запасов длительной статической прочности по напряжениям и повреждаемости по долговечности для зон лопатки 1–4 от угла азимутальной ориентации. Значение показателя степени длительной статической прочности для температуры 840°C в зоне 4 равно 7.8. Для этой зоны в зависимости от изменения угла φ_z максимальная разница K_m составляет $\sim 92\%$, а D_t согласно (1) изменяется на несколько порядков.

Для сечения в целом разница минимальных расчетных K_m в зависимости от угла φ_z – 4,74%, максимальных повреждаемостей по долговечности 13%.

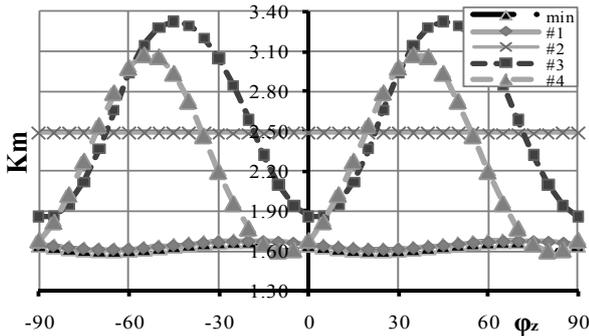


Рис. 15. Зависимость запасов длительной статической прочности по напряжениям от азимутальной ориентации

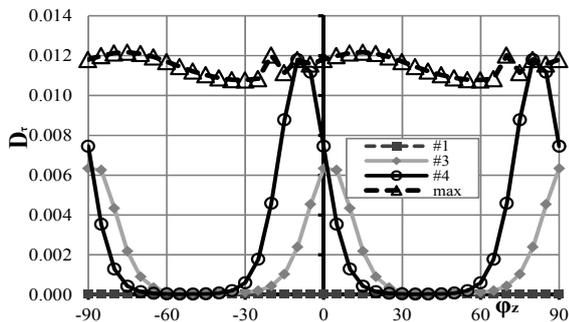


Рис. 16. Влияние азимутальной ориентации на D_t в зонах 1, 3, 4 и максимальную D_t по лопатке

При угле азимутальной ориентации φ_z -20° или $+70^\circ$, достигаются оптимальные запасы статической прочности по напряжениям и долговечности.

На рис. 17 показано изменение накопленных деформаций ползучести (ϵ_c) за 100 часов работы для зон 1, 3 и 4 в зависимости от угла φ_z . Для зоны 4 значение ϵ_c изменяется на порядок в зависимости от азимутальной ориентации. Минимальные деформации ползучести реализуются для углов φ_z от ± 30 до 60° .

Аналогичный расчет проведен для поперечных сечений лопаток №1 и №2 (с относительно невысокими максимальными температурами и градиентами температур), для которых влияние φ_z на K_m оказалось незначительным, а изменение D_t достигло 20%.

ВЫВОДЫ

Для рабочих охлаждаемых лопаток турбин азимутальная ориентация монокристалла оказывает заметное влияние на статическую долговечность, особенно для лопаток с относительно высокими температурами и градиентами температур. Кроме того, положение кристаллографических осей в плоскости поперечных сечений лопаток влияет на уровень накопленных деформаций, что приводит к изменению циклической долговечности.

Необходимо проводить исследования статической и циклической долговечности каждой лопатки для оценки целесообразности выбора оптимальной азимутальной ориентации монокристалла при отливке.

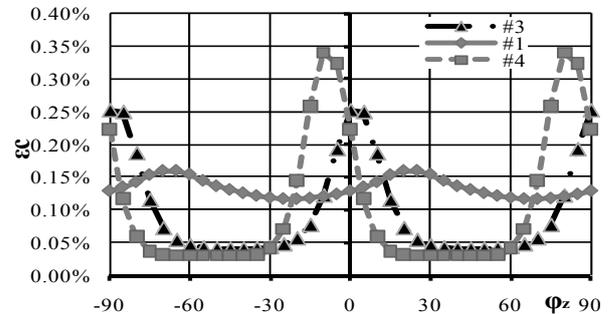


Рис. 17. Изменение ϵ_c за 100 часов работы в зависимости от азимутальной ориентации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
2. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.
3. Голубовский Е. Р., Светлов И. Л., Хвацкий К. К. Влияние аксиальной и азимутальной ориентации на прочностные характеристики жаропрочных никелевых сплавов для монокристаллических лопаток ГТД // Конверсия в машиностроении. 2005. №4-5. С. 113–115.
4. Магеррамова Л. А., Васильев Б. Е. Выбор модели анизотропии сплава для прочностных расчетов монокристаллических рабочих лопаток турбин ГТД с помощью современных программных комплексов // Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей / под ред. Ю. А. Ножницкого, Б. Ф. Шорра, И. Н. Долгополова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. С. 341–350.
5. Nozhnitsky Yu. A., Doulnev R. A., Soundyryn V. G. Damage mechanisms for thermomechanical fatigue of aircraft engines materials. AGARD Conference Prociding 569. 1996.

ОБ АВТОРАХ

Магеррамова Любовь Александровна, дипл. инж.-механик (МАИ), начальник сект. прочности лопаток ГТД в ЦИАМ им. П. И. Баранова, канд. техн. наук (1980), ст. науч. сотр. (1985). Иссл. в области прочности охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток, в том числе из монокристаллических сплавов.

Васильев Борис Евгеньевич, дипл. инж.-конструктор (МГТУ им. Н. Э. Баумана), инж. 1-й кат. в ЦИАМ им. П. И. Баранова. Иссл. в области прочности охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток турбин, в том числе из монокристаллических сплавов.