

УДК 539.3+669

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

©2014 А.С. Семёнов¹, Л.Б. Гецов², С.Г. Семёнов¹, А.И. Грищенко¹

¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
(национальный исследовательский университет)

²Научно - производственное объединение «Центральный котлотурбинный институт»,
г. Санкт-Петербург

Рассматриваются особенности сопротивления кратковременному растяжению/сжатию, ползучести, длительной прочности и термической усталости монокристаллических жаропрочных сплавов на никелевой основе для различных кристаллографических ориентаций и температур. Предложены критерии разрушения с использованием единого представления мер эквивалентных напряжений (деформаций) для кубической сингонии, позволяющие адекватно рассчитывать прочность и долговечность монокристаллических материалов при сложном многоосном неоднородном напряжённом состоянии, характерном для лопаток газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации. Верификация критериев осуществляется как на основе сравнения с результатами экспериментов, так и с прогнозами микромеханической модели.

Монокристаллические жаропрочные сплавы, длительная прочность, термоусталостная прочность, коэффициент анизотропии, пластичность, ползучесть, тензорно-полиномиальный критерий.

Введение

Использование монокристаллических жаропрочных сплавов при изготовлении лопаток газовых турбин современных высокотемпературных авиационных двигателей приводит к необходимости тщательного экспериментального исследования долговечности, сопротивлению деформированию и разрушению для указанных сплавов при статическом и циклическом термомеханическом воздействии, а также требует разработки надёжных моделей неупругого деформирования и разрушения монокристаллических материалов при высоких температурах.

Упругие и пластические свойства, характеристики ползучести, параметры длительной и термоусталостной прочности жаропрочных монокристаллических сплавов демонстрируют ярко выраженную анизотропию [1]. В ряде случаев учёт анизотропии в расчётах может приводить к значительным ошибкам в оценке напряжённо-деформированного состояния, прочности и долговечности. Монокристаллические сплавы на основе никеля на макроуровне обнаруживают свойства кубической симметрии, при которой механические свойства оказываются прак-

тически одинаковыми для трёх взаимно перпендикулярных направлений.

Целью настоящего исследования является анализ возможности введения единой математической формулировки феноменологических критериев пластичности, потенциалов ползучести, критериев статической, длительной и термоусталостной прочности жаропрочных монокристаллических материалов с учётом анизотропии. Рассматривается как традиционный квадратичный критерий Хилла [2], так и введённый в [3] критерий четвёртой степени. Верификация критериев осуществляется как на основе сравнения с результатами экспериментов, так и с прогнозами микромеханической модели. Предложены методы идентификации параметров анизотропии рассматриваемых критериев и представлены результаты исследования изменения указанных параметров с ростом температуры.

Критерий пластичности

Одним из простейших вариантов феноменологических критериев пластичности для ортотропного материала является квадратичный критерий Хилла. Феноменологические модели не учитывают реальных механизмов неупругого деформирования кристаллов и особенностей

эволюции его микроструктуры, используя идеализацию монокристалла анизотропной гомогенной сплошной средой и принимая во внимание только исходную и деформационно индуцированную анизотропию. Использование критерия Хилла [2, 4] для кубической сингонии приводит к следующей формулировке условия текучести:

$$\sqrt{\frac{1}{2}I_1 + K_p I_2} = \sigma_T, \quad (1)$$

$$I_1 = (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2, \quad (2)$$

$$I_2 = \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2, \quad (3)$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжений в системе координат, связанных с кристаллографическими осями $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$; σ_T - предел текучести (обычно выбирается $\sigma_T = \sigma_{0,2\langle 001 \rangle}$); K_p - коэффициент анизотропии предела текучести, который может быть найден из условия перехода материала в пластическое состояние при двух произвольных различных напряжённых состояниях, например по одной из формул:

$$K_p = 3 \left(\frac{\sigma_{0,2\langle 001 \rangle}}{\sigma_{0,2\langle 111 \rangle}} \right)^2, \quad K_p = 4 \left(\frac{\sigma_{0,2\langle 001 \rangle}}{\sigma_{0,2\langle 011 \rangle}} \right)^2 - 1. \quad (4)$$

Для изотропного материала $K_p = 3$.

В этом случае следствием (1) получаем критерий Мизеса. На рис. 1 показаны зависимости K_p от температуры для различных жаропрочных монокристаллических сплавов, полученные на основе экспериментальных данных, представленных в литературе и обработанных с использованием соотношения (4).

Кривые, показанные на рис. 1, имеют монотонно возрастающий характер, изменяясь от минимальных значений из диапазона 1÷2 при комнатной температуре и достигая максимальных значений 3 и выше в области высоких температур. Следует отметить, что при повышенных температурах анизотропия пределов текучести практически вырождается (K_p стремится к 3).

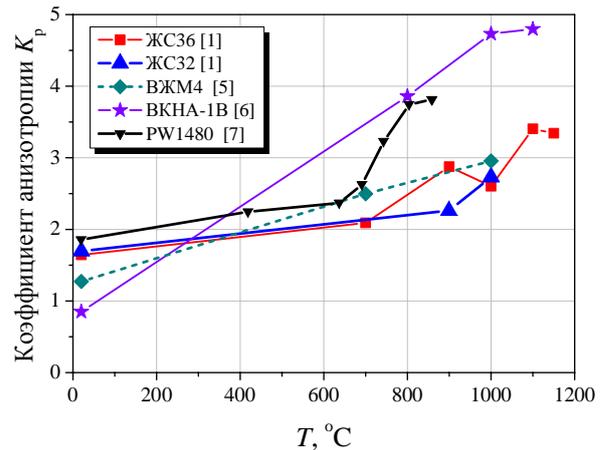


Рис. 1. Зависимость коэффициента анизотропии предела текучести K_p от температуры для различных сплавов

В работе [3] было показано, что использование квадратичного критерия Хилла (1) не позволяет описать наличие минимума у предела текучести для направления нагружения, среднего между $[001]$ и $[011]$, при рассмотрении отклонений в плоскости (100) , наблюдаемого и в экспериментах [7] и при использовании кристаллографического критерия Шмида [8]. Одним из возможных путей устранения указанного недостатка является использование критерия четвертой степени [3]:

$$\mathbf{s}^2 \cdot \mathbf{4N} \cdot \mathbf{s}^2 - (\mathbf{s} \cdot \mathbf{4M} \cdot \mathbf{s})^2 - 1 = 0, \quad (5)$$

где $\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \text{tr} \boldsymbol{\sigma}$ - девиатор тензора напряжений; $\mathbf{1}$ - единичный тензор; $\mathbf{4M}$ и $\mathbf{4N}$ - тензора четвертого ранга, характеризующие анизотропию поверхности нагружения. Для кубической группы симметрии кристалла тензора $\mathbf{4M}$ и $\mathbf{4N}$ (так же, как и тензор упругих модулей) в системе координат, связанной с кристаллографическим базисом, имеют следующую структуру, характеризуемую тремя константами M_{11}, M_{12}, M_{44} :

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ M_{12} & M_{11} & M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ M_{12} & M_{12} & M_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{44} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Уравнение (1) с учётом введённых обозначений может быть переписано в виде:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{s} - 1 = 0, \quad (7)$$

где коэффициенты уравнения (1) могут быть выражены через компоненты тензора \mathbf{M} при помощи соотношений

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{3}{2(M_{11} - M_{12})}} \quad \text{и}$$

$$K_p = \frac{3M_{44}}{2(M_{11} - M_{12})}.$$

Так как в выражениях (7) и (5) используются только девятка, то (7) характеризуется не тремя, а только двумя независимыми константами ($M_{11} - M_{12}, M_{44}$), а (5) - не шестью, а пятью константами ($N_{11}, N_{12}, N_{44}, M_{11}, M_{12}, M_{44}$). Они могут быть найдены из условий совпадения пределов текучести для пяти характерных направлений (например, для ориентаций $[001], [011], [111], [025]$ и $[112]$). Константы материала могут выбираться как из условия совпадения преде-

лов текучести с экспериментом, так и из условия совпадения с прогнозом по закону Шмида при нехватке экспериментальных данных.

Критерий (5), как и критерий Шмида позволяет описать наличие минимума предела текучести (рис. 2) в середине интервала $0 \leq \theta \leq 45^\circ$ между $[001]$ и $[011]$ при рассмотрении различных отклонений в плоскости (100) направления приложения нагрузки от кристаллографической оси $[001]$. При сравнении результатов прогнозов (5) с данными опытов удаётся получить удовлетворительное совпадение (рис. 2), в то время, как критерий (1) (или (7)) не способен описать появления минимума.

Таким образом, оба критерия (1) и (5), в отличие от критерия Мизеса, позволяют учесть анизотропию пределов текучести монокристалла. Критерий (5) является более точным, но требует гораздо больше экспериментальных данных для идентификации.

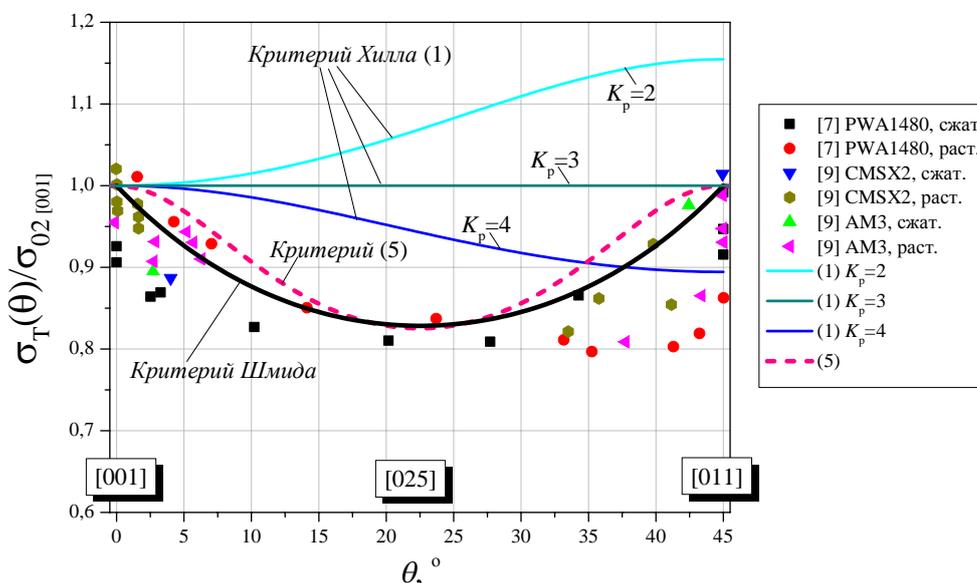


Рис. 2. Сравнение зависимости предела текучести для критерия (5) с экспериментальными данными при различных углах отклонения нагрузки от направления $[001]$ в плоскости (100)

Силовой критерий статической прочности

Силовые феноменологические критерии, аналогичные критериям второй (1) и четвёртой степени (5), могут быть введены в рассмотрение при анализе статиче-

ской прочности монокристаллических сплавов. При анализе статической прочности в условиях наличия развитых зон пластичности рассматриваемый далее деформационный критерий является более предпочтительным. Использование сило-

вого квадратичного критерия для кубической сингонии приводит к следующей формулировке условия статической прочности:

$$\sqrt{\frac{1}{2}I_1 + K_B I_2} = \sigma_B, \quad (8)$$

где σ_B - предел прочности (обычно выбирается $\sigma_B = \sigma_{B\langle 001 \rangle}$); K_B - коэффициент анизотропии предела прочности, который может быть найден по пределам кратковременной прочности при двух произвольных различных напряжённых состояниях, например по одной из:

$$K_B = 3 \left(\frac{\sigma_{B\langle 001 \rangle}}{\sigma_{B\langle 111 \rangle}} \right)^2, \quad K_B = 4 \left(\frac{\sigma_{B\langle 001 \rangle}}{\sigma_{B\langle 011 \rangle}} \right)^2 - 1. \quad (9)$$

Для изотропного материала $K_B = 3$. На рис. 3 показаны зависимости K_B от температуры для различных жаропрочных монокристаллических сплавов, полученные на основе данных, представленных в литературе и обработанных с использованием соотношения (9). Следует отметить сходство кривых, представленных на рис. 1 и рис. 3. Коэффициент анизотропии пределов прочности также является возрастающей функцией температуры, стабилизируясь при повышенных температурах около значения 3, соответствующему изотропному материалу.

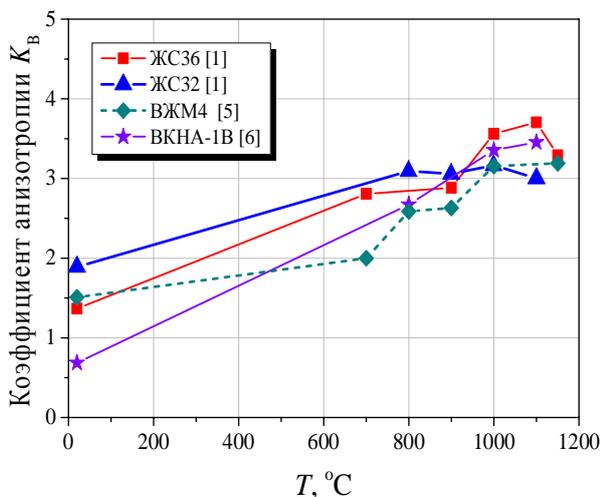


Рис. 3. Зависимость коэффициента анизотропии пределов прочности K_B от температуры для различных сплавов

Деформационный критерий статической прочности

При оценке кратковременной статической прочности в условиях сложного напряжённого состояния при наличии развитых пластических деформаций рационально применение деформационных критериев. Обобщением используемых при оценке деформационной способности поликристаллических материалов критериев Ханкука-Маккензи [10] или Махутова Н.А. [11] соответственно являются соотношения:

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_{r\langle 001 \rangle} 1.7 \exp\left(-\frac{1.5\sigma_{mean}}{\sigma_{eq}}\right), \quad (10)$$

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_{r\langle 001 \rangle} \frac{K_e \sigma_{eq}^2}{3\sigma_1 \sigma_{mean}}. \quad (11)$$

Здесь $\varepsilon_{r\langle 001 \rangle}$ - предельная деформация (деформационная способность) в направлении $\langle 001 \rangle$, определяемая из опытов при кратковременном растяжении; $\sigma_{mean} = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$ - среднее напряжение; σ_1 - максимальное главное значение тензора напряжений; K_e - характеристика состояния материала (при хрупком состоянии $K_e = 1$, при вязком - $K_e = 1,2$); величины ε_{eq} и σ_{eq} определяются при помощи выражений:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{9}J_1 + \frac{1}{K_r}J_2}, \quad (12)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}I_1 + K_r I_2}, \quad (13)$$

$$J_1 = (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2, \quad (14)$$

$$J_2 = \gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2, \quad (15)$$

где ε_{ij} - компоненты тензора деформаций в системе координат, связанных с кристаллографическими осями $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$; $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$; K_r - коэффициент анизотропии деформационной способности при

кратковременном статическом нагружении, для определения которого может быть использована любая из формул:

$$K_r = 3 \left(\frac{\epsilon_{r(111)}}{\epsilon_{r(001)}} \right)^2, \quad K_r = 9 \left[4 \left(\frac{\epsilon_{r(001)}}{\epsilon_{r(011)}} \right)^2 - 1 \right]^{-1}. \quad (16)$$

Формула (10) и ей подобные основаны на механизме образования и развития пор, формула (11) является эмпирической и нуждается в экспериментальной проверке применительно к монокристаллическим сплавам.

Для изотропного материала $K_r = 3$. На рис. 4 показаны зависимости K_r от температуры для различных жаропрочных монокристаллических сплавов, обработанные с использованием соотношения (16).

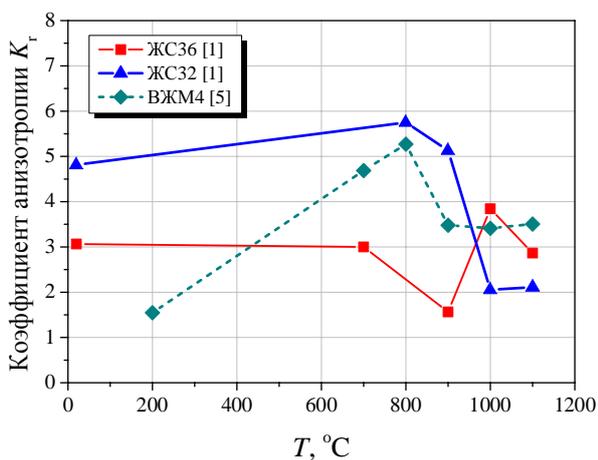


Рис. 4. Зависимость коэффициента анизотропии деформационной способности K_r от температуры для различных сплавов

Наблюдается значительный разброс экспериментальных данных. Точность результатов для K_r оказалась значительно ниже, чем при вычислении K_p и K_B , что затрудняет поиск характерных зависимостей. Просматривается тенденция стремления K_r к 3 при повышенных температурах.

Критерий длительной прочности

Коэффициент запаса длительной прочности n_σ для монокристаллических лопаток определялся выражением

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{R<001>}}{\bar{\sigma}_{es}} = \frac{\sigma_{R<001>}}{m_{e<001>} \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t [\sigma_{eq}(\tau)]^{m_{e<001>}} d\tau}}.$$

Здесь $\sigma_{R<001>} = f(T, t)$ - предел длительной статической прочности при растяжении в направлении $\langle 001 \rangle$; $m_{e\langle 001 \rangle}$ - показатель степени кривой длительной прочности для кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$; σ_{eq} - эквивалентное напряжение, задаваемое аналогично (1) на основе квадратичного критерия:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} I_1 + K_R I_2}, \quad (17)$$

где K_R - коэффициент анизотропии длительной статической прочности, который может быть найден по формулам, аналогичным (2):

$$K_R = 3 \left(\frac{\sigma_{R\langle 001 \rangle}}{\sigma_{R\langle 111 \rangle}} \right)^2, \quad K_R = 4 \left(\frac{\sigma_{R\langle 001 \rangle}}{\sigma_{R\langle 011 \rangle}} \right)^2 - 1. \quad (18)$$

На рис. 5 приведены значения K_R для пределов длительной прочности для сплава ВЖМ4, полученные регуляризацией с использованием кривых Ларсона-Миллера на основе данных испытаний на длительную прочность при температурах 750-1150°C образцов с различной кристаллографической ориентацией.

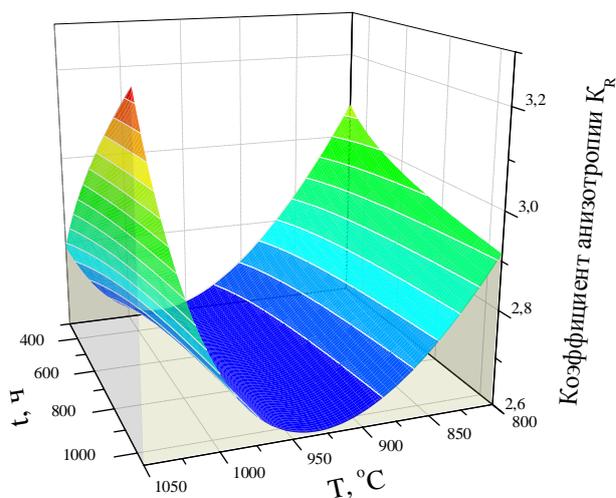


Рис. 5. Зависимость коэффициента анизотропии длительной прочности K_R сплава ВЖМ4 от времени до разрушения и температуры

На рис. 6 для пределов длительной прочности на базе 100 ч. показаны зависимости K_R от температуры для различных жаропрочных монокристаллических сплавов, полученные с использованием соотношения (18)₁. В отличие от зависимостей K_p и K_B , для K_R наблюдается наличие минимума при температурах 900-1000°C, вызванного микроструктурными изменениями (формированием «рафт»-структуры).

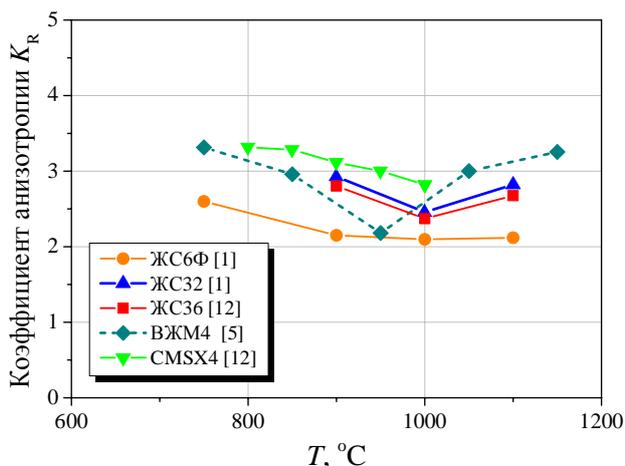


Рис. 6. Зависимость коэффициента анизотропии длительной прочности K_R от температуры для различных сплавов

Критерий многоциклового усталости

Зависимости $K_{-1}(T)$ (рис. 7), аналогичные $K_p(T)$ и $K_B(T)$ (рис. 1 и 3), наблюдаются и при использовании квадратичного критерия при исследовании многоциклового усталости монокристаллического сплава:

$$\sqrt{\frac{1}{2}I_1 + K_{-1}I_2} = \sigma_{-1}, \quad (19)$$

где σ_{-1} - предел выносливости (обычно выбирается $\sigma_{-1} = \sigma_{-1(001)}$); K_{-1} - коэффициент анизотропии предела выносливости, который может быть найден по одной из формул:

$$K_{-1} = 3 \left(\frac{\sigma_{-1(001)}}{\sigma_{-1(111)}} \right)^2, \quad K_{-1} = 4 \left(\frac{\sigma_{-1(001)}}{\sigma_{-1(011)}} \right)^2 - 1. \quad (20)$$

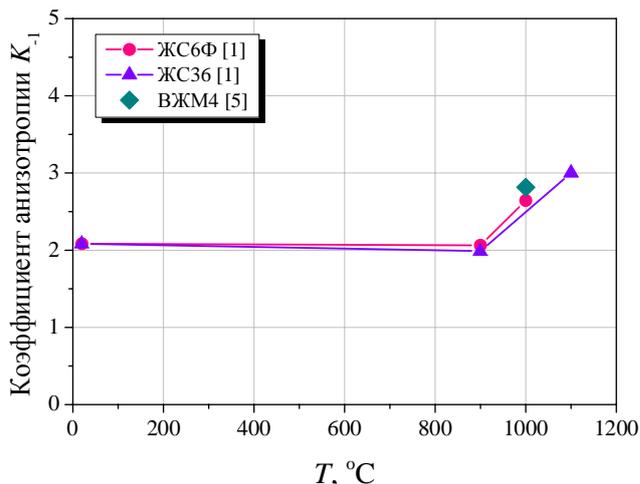


Рис. 7. Зависимость коэффициента анизотропии предела выносливости K_{-1} от температуры для гладких образцов различных сплавов

Критерий термоусталостной прочности

Для прогнозирования термоусталостного разрушения монокристаллических материалов рациональным является использование деформационного критерия [13-14]. Критерием зарождения макротрещин является условие достижения критической величины суммарной меры повреждений, описываемой следующим соотношением:

$$D_1(\Delta \varepsilon_{eq}^p) + D_2(\Delta \varepsilon_{eq}^c) + D_3(\varepsilon_{eq}^p) + D_4(\varepsilon_{eq}^c) = 1. \quad (21)$$

Введённый критерий основывается на линейном суммировании повреждений, вызванных изменением пластической деформации в пределах цикла

$$D_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta \varepsilon_{eq_i}^p)^k}{C_1(T_i)}, \quad (22)$$

изменением деформации ползучести в пределах цикла

$$D_2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta \varepsilon_{eq_i}^c)^m}{C_2(T_i)}, \quad (23)$$

односторонне накопленной пластической деформацией

$$D_3 = \max_{0 \leq t \leq t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_r^p(T)} \quad (24)$$

и односторонне накопленной деформацией ползучести

$$D_4 = \max_{0 \leq r \leq r_{\max}} \frac{\varepsilon_{eq}^c}{\varepsilon_r^c(T)}, \quad (25)$$

где $C_1, C_2, k, m, \varepsilon_r^p, \varepsilon_r^c$ - параметры материала, зависящие от температуры и КГО. Обычно принимают $k=2, m=\frac{5}{4}$, $C_1 = (\varepsilon_r^p)^k, C_2 = (\frac{3}{4}\varepsilon_r^c)^m$, где ε_r^p и ε_r^c - предельные деформации пластичности и ползучести при одноосном растяжении.

В качестве эквивалентной меры деформаций ε_{eq} в (21)-(25) используется выражение:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{9}J_1 + \frac{1}{K_N}J_2}, \quad (26)$$

где K_N - коэффициент анизотропии термоусталостной прочности, который может быть найден по формулам:

$$K_N = 9 \left[4 \left(\frac{\varepsilon_{r(001)}}{\varepsilon_{r(011)}} \right)^2 - 1 \right]^{-1}, \quad K_N = 3 \left(\frac{\varepsilon_{r(111)}}{\varepsilon_{r(001)}} \right)^2. \quad (27)$$

Процесс верификации критерия проводился по данным, полученным для сплавов ЖС36 и ВЖМ4 (рис. 8).

Видно, что прогнозируемая долговечность до образования магистральной трещины отличается от экспериментальной не более чем в 3 раза.

Библиографический список

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М: Машиностроение, 1997. 333 с.
2. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals // Proceedings of the Royal Society of London. 1948. V. 193, no. 1033. P. 281-97.
3. Семёнов А.С. Идентификация параметров анизотропии феноменологического критерия пластичности монокристаллов на основе микромеханической модели // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-

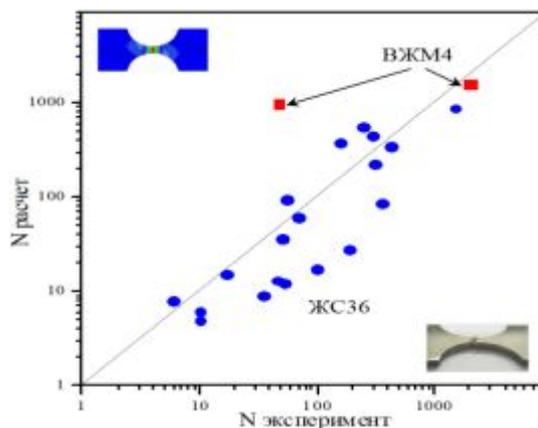


Рис. 8. Сравнение экспериментальных и расчётных значений долговечности сплавов ЖС36 и ВЖМ4

Заключительные замечания

Предложены модели для расчётного определения сопротивления деформированию и разрушению монокристаллических материалов при сложном многоосном напряженном состоянии с использованием единого представления мер эквивалентных напряжений (деформаций) и проведена их верификация. Сравнение результатов оценки прочности неоптимизированной рабочей охлаждаемой лопатки из монокристаллического сплава с использованием разработанных критериев и критериев для изотропного материала позволило установить неконсервативный характер последних и актуальность учёта анизотропии, соответствующей кубической сингонии.

4. Гецов Л.Б., Михайлов В.Е., Семенов А.С., Кривоносова В.В., Ножницкий Ю.А., Блинник Б.С., Магеррамова Л.А. Расчётное определение ресурса рабочих и направляющих лопаток ГТУ. Ч. 2. Монокристаллические материалы // Газотурбинные технологии. 2011. № 8. С. 18-25.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Труды ВИАМ. 2012. С. 36-52.
6. Булыгин И.П., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Литейный сплав на основе интерметаллида Ni3Al для монокристал-

лических рабочих лопаток турбин ГТД // *Авиационная промышленность*. 1997. № 3-4. С. 61-65.

7. Shah D.M., Duhl D.N. The effect of orientation, temperature and grain size on the yield strength of a single crystal nickel base superalloy // *Superalloys. The Metallurgical Society of AIME*. 1984. P. 105-114.

8. Schmid E., Boas W. *Kristallplastizität mit besonderer Berücksichtigung der Metalle*. Springer. 1935. 373 p.

9. Hoinard G., Estevez R., Franciosi P. Hardening anisotropy of γ/γ' superalloy single crystals-1. Experimental estimates at 650 °C from a homogeneous analysis // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995. V. 43, no. 4. P. 1593–1607.

10. Hancock J.W., Mackenzi A.C. On the mechanisms of ductile failure in high strength steel subjected to multi-axial stress state // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1976. 24, no. 2-3. P. 147-160.

11. Гецов Л.Б., Марголин Б.З., Федорченко Д.Г. Вопросы определения запасов

прочности элементов машиностроительных конструкций при расчётах методом конечных элементов // *Труды НПО ЦКТИ*. Выпуск 296. Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ, 2009. С. 51-66.

12. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Проблемы прочности*. 2002. № 2. С. 5-19.

13. Гецов Л.Б., Семенов А.С. Критерии разрушения поликристаллических и монокристаллических материалов при термоциклическом нагружении // *Труды ЦКТИ*. Вып. 296. Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ, 2009. С. 83-91.

14. Семенов А.С., Гецов Л.Б. Критерии термоусталостного разрушения монокристаллических жаропрочных сплавов и методы определения их параметров // *Проблемы прочности*. 2014. № 1. С. 50-62.

Информация об авторах

Семенов Артём Семёнович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Механика и процессы управления», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. E-mail: Semenov.Artem@googlemail.com. Область научных интересов: теория пластичности, механика разрушения, вычислительная механика.

Гецов Леонид Борисович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно производственное объединение «Центральный котлотурбинный институт». E-mail: guetsov@yahoo.com. Область научных интересов: металлове-

дение и механика жаропрочных материалов.

Семенов Сергей Георгиевич, инженер, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. E-mail: ssgrus@gmail.com. Область научных интересов: экспериментальная механика, механика разрушения, вычислительная механика.

Грищенко Алексей Иванович, студент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. E-mail: gai-gr@yandex.ru. Область научных интересов: теория упругости, теория пластичности, вычислительная механика композитов.

DEFORMATION AND FRACTURE STRENGTH OF SINGLE-CRYSTAL SUPERALLOYS UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING

© 2014 A.S. Semenov, L.B. Getsov, S.G. Semenov, A.I. Grishchenko

Saint Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

The peculiarities of short-term resistance to tension/compression, creep, long-term strength and thermal fatigue of single-crystal superalloys for different crystallographic orientations and temperatures are considered. The failure criteria are proposed using a unified measures equivalent stress (strain) for the cubic system, allowing to compute adequate strength and durability of single crystal materials under complex multi-axial inhomogeneous stress state, which is characteristic for gas turbine engine blades during the operation.

Single crystal superalloys, creep rupture strength, thermal fatigue resistance, the coefficient of anisotropy, plasticity, creep, the tensor-polynomial criterion.

References

1. Shalin R.E. Svetlov I.L. Kachanov E.B. Toloraiia V.N. Gavrilin O.S. Monokristally` nikel'evy`kh zharoprochny`kh splavov [Single crystals of nickel superalloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1997. 333 p.
2. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals // Proceedings of the Royal Society of London. 1948. V. 193, no. 1033. P. 281–97.
3. Semenov A.S. The identification of anisotropy parameters of phenomenological plasticity criterion for single crystals worked out on the micromechanical model basis // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2014. No. 2(194). P. 15-29. (In Russ.)
4. Getsov L.B., Mihailov V.E., Semenov A.S., Krivonosova V.V., Nozhnitskii Iu.A., Blinnik B.S., Magerramova L.A. Estimated resource definition of blades and vanes of GTU. Part 2. Single-crystal materials // Gas Turbo Technology. 2011. No. 8. P. 18-25. (In Russ.)
5. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting nickel superalloys of a new generation // Proceedings of VIAM. 2012. P. 36-52. (In Russ.)
6. Buly`gin I.P., Buntushkin V.P., Bazy`leva O.A. Cast alloy on the basis of Ni3Al intermetallic compound for single-crystal turbine blades of GTE // Aviatcionnaia promyshlennost`. 1997. No. 3-4. P. 61-65. (In Russ.)
7. Shah D.M., Duhl D.N. The effect of orientation, temperature and gamma prime size on the yield strength of a single crystal nickel base superalloy // Superalloys. The Metallurgical Society of AIME. 1984. P. 105-114.
8. Schmid E., Boas W. Kristallplastizitaet mit besonderer Beruecksichtigung der Metalle. Springer. 1935. 373 p.
9. Hoinard G., Estevez R., Franciosi P. Hardening anisotropy of γ/γ' superalloy single crystals-1. Experimental estimates at 650 °C from a homogeneous analysis // Acta Metallurgica et Materialia. 1995. V. 43, no. 4. P. 1593–1607.
10. Hancock J.W., Mackenzi A.C. On the mechanisms of ductile failure in high strength steel subjected to multi-axial stress state // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1976. V. 24, no. 2-3. P. 147-160.
11. Getsov L.B., Margolin B.Z., Fedorchenko D.G. Voprosy` opredeleniia zapasov prochnosti e`lementov mashinostroitel`ny`kh konstrukcii` pri raschetakh metodom konechny`kh e`lementov // Trudy NPO TsKTI. Vypusk 296. Prochnost` materialov i resurs e`lementov e`nergooborudovaniia. Sankt-Peterburg: NPO TsKTI Publ., 2009. P. 51-66. (In Russ.)
12. Golubovskii` E.R., Svetlov I.L. Time-temperature dependence of long-term strength anisotropy in single crystals of ni-based superalloys // Strength of Materials. 2002. V. 34, no. 2. P. 109-119.
13. Getsov L.B., Semenov A.S. Kriterii razrusheniia polikristallicheskih i monokristallicheskih materialov pri termotcic-

licheskom nagruzhenii // Trudy NPO TsKTI. V. 296. 2009. P. 83-91. (In Russ.)

14. Semenov A.S., Getsov L.B. Thermal fatigue fracture criteria of single crystal heat-

resistant alloys and methods for identification of their parameters // Strength of Materials. 2014. V. 46, no. 1. P. 38-48.

About the authors

Semenov Artem Semenovich, Candidate of Science (physics and mathematics), Associated professor of the Department of «Mechanics and Control Processes», Saint Petersburg State Polytechnical University. E-mail: Semenov.Artem@googlemail.com. Area of Research: theory of plasticity, fracture mechanics, computational mechanics.

Getsov Leonid Borisovich, Doctor of Science (Engineering), chef of sciences NPO CKTI. E-mail: guetsov@yahoo.com. Area of Research: physical metallurgy and mechanics of heat-resistant materials.

Semenov Sergei Georgievich, engineer of the Department «Strength of Materials» of Saint Petersburg State Polytechnical University. E-mail: ssgrus@gmail.com. Area of Research: experimental mechanics, fracture mechanics, computational mechanics.

Grishchenko Alexei Ivanovich, Bachelor in applied mechanics, graduate student of Saint Petersburg State Polytechnical University. E-mail: gai-gr@yandex.ru. Area of Research: theory of elasticity, theory of plasticity, computational mechanics of composites.