## Анализ термоусталостной прочности лопаток гаотурбинных установок

Работу выполнил: Вилданов Владислав Рафисович Научный руководитель: Семёнов Артём Семёнович

Санкт-Петербургский Государственный Университет Институт прикладной математики и механики Кафедра 'Теоретическая Механика'

Санкт-Петербург, 28.02.2014

(日) (四) (注) (注) (注) (注) (注)

- Широкое применение лопаток (электростанции, авиационные двигатели, паровые и газовые турбинны и.т.д.);
- Монокристаллические сплавы обеспечивают большую жаропрочность и деформационную способность;
- До сих пор не изучены свойства монокристаллических материалов!!!

イロト 不良 トイヨト イヨト

- Широкое применение лопаток (электростанции, авиационные двигатели, паровые и газовые турбинны и.т.д.);
- Монокристаллические сплавы обеспечивают большую жаропрочность и деформационную способность;
- До сих пор не изучены свойства монокристаллических материалов!!!

- Широкое применение лопаток (электростанции, авиационные двигатели, паровые и газовые турбинны и.т.д.);
- Монокристаллические сплавы обеспечивают большую жаропрочность и деформационную способность;
- До сих пор не изучены свойства монокристаллических материалов!!!

$$\nabla\cdot \pmb{\sigma} + \rho \mathbf{f} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{t}^2}$$
— баланс количества движения

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left( \nabla \mathbf{u} \right)^S$$
 — тензор деформаций

 $\boldsymbol{\varepsilon}^{e} = {}^{4}\mathbf{B}\cdot\cdot\boldsymbol{\sigma}$  — упругие деформации

#### А также остальные определяющие соотношения

・ロッ ・雪 ・ ・ ヨ ・ ・ ヨ ・

Санкт-Петербург, 28.02.2014

3

4 / 19

$$\dot{m{arepsilon}}^p = \dot{\lambda} rac{\partial f}{\partial m{\sigma}} -$$
 скорость неупругих деформаций

$$f = \sqrt{rac{3}{2} \left( \mathbf{s} - oldsymbol{
ho} 
ight) \cdot \cdot \left( \mathbf{s} - oldsymbol{
ho} 
ight)} - \sigma_Y \left( \kappa 
ight)$$
 — критерий Мизеса

# Физические модели неупругого поведения монокристаллических материалов

$$\dot{m{arepsilon}}^p = \sum_{lpha=1}^N \dot{\gamma}^lpha \left( \mathbf{l}^lpha \mathbf{n}^lpha 
ight)^{\mathrm{S}} -$$
 скорость неупругих деформаций

 $\dot{\gamma}^{\alpha}=f\left(\tau^{\alpha},\ldots\right)-$ скорость деформации скольжения в  $\alpha$  системе скольжения

 $\tau^{\alpha} = \pmb{\sigma} \cdot \cdot (\mathbf{l}^{\alpha} \mathbf{n}^{\alpha})$  — качательные напряжения в  $\alpha$  системе скольжения

## Физические модели неупругого поведения монокристаллических материалов

Вязко-упругая модель:  $\dot{\gamma}^{\alpha} = A \left| \tau^{\alpha} \right|^{n} (\gamma^{\alpha})^{m} \operatorname{sign}(\tau^{\alpha})$ 

Вязко-пластическая модель:  $\dot{\gamma}^{\alpha} = \operatorname{sign}\left(\tau^{\alpha} - X^{\alpha}\right) \left\langle \frac{|\tau^{\alpha} - X^{\alpha}| - R^{\alpha} - \tau_{0}}{K} \right\rangle^{n}$ 

Упруго-пластическая модель:  $f^{\alpha} = |\tau^{\alpha} - X^{\alpha}| - R^{\alpha} - \tau_0 = 0$ 

Множители, характеризующие изотропное и кинематическое упрочнение:  $R^{\alpha} = bQ \sum_{\beta} h^{\alpha\beta} r^{\beta}, \quad \dot{r}^{\alpha} = (1 - br^{\alpha}) \dot{\gamma}^{\alpha}, \quad h^{\alpha\beta} = H \left[ q + (1 - q) \right) \delta_{\alpha\beta} \right]$  $X^{\alpha} = Cx^{\alpha}, \quad \dot{x}^{\alpha} = \left[ \operatorname{sign} \left( \tau^{\alpha} - X^{\alpha} \right) - Dx^{\alpha} \right] \dot{\gamma}^{\alpha}$ 

## Феноменологические модели неупругого поведения монокристаллических материалов

$$f = \sqrt{(\mathbf{s} - \mathbf{X}) \cdot \cdot^4 \mathbf{M} \cdot \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{X})} - R - \sigma_y = 0$$
— поверхность нагружения  
 $\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma}$ — скорость неупругих деформаций

Вязко-упругая модель:  $\dot{\lambda} = A \left( \mathbf{s} \cdot \mathbf{^4M} \cdot \mathbf{s} \right)^{n/2} \lambda^m$ 

Вязко-пластическая модель:  $\dot{\lambda} = \left\langle \frac{\sqrt{(\mathbf{s} - \mathbf{X})^{-4} \mathbf{M} \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{X})} - R - \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{y}}}{K} \right\rangle^{n}$ 

## Феноменологические модели неупругого поведения монокристаллических материалов

Параметры, отвечающие за изотропное и кинематическое упрочнение:

$$\begin{aligned} R &= bQr, & \dot{r} &= (1 - br)\,\lambda, \\ \mathbf{X} &= {}^{\mathbf{4}}\mathbf{C}\cdot\cdot\mathbf{x}, & \dot{\mathbf{x}} &= \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{p}} - {}^{\mathbf{4}}\mathbf{D}\cdot\cdot\mathbf{x} \end{aligned}$$

Тензоры  ${}^{4}\mathbf{M}$ ,  ${}^{4}\mathbf{C}$ ,  ${}^{4}\mathbf{D}$  в системе координат, связанной с кристаллографической ориентацией, имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ M_{12} & M_{11} & M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ M_{12} & M_{12} & M_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{44} \end{bmatrix}.$$

$$D = D_1 \left(\Delta \varepsilon_{eq}^{p}\right) + D_2 \left(\Delta \varepsilon_{eq}^{c}\right) + D_3 \left(\varepsilon_{eq}^{p}\right) + D_4 \left(\varepsilon_{eq}^{c}\right) = 1$$
$$D_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\Delta \varepsilon_{eq_i}^{p}\right)^k}{C_1 \left(T_i\right)}$$
$$D_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\Delta \varepsilon_{eq_i}^{c}\right)^m}{C_2 \left(T_i\right)}$$
$$D_3 = \max_{0 \leqslant t \leqslant t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^{p}}{\varepsilon_r^{p} \left(T\right)}$$
$$D_4 = \max_{0 \leqslant t \leqslant t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_r^{p} \left(T\right)}$$

За эквивалентную деформацию можно взять:

• Максимальная сдвиговая деформация в системе скольжения

$$arepsilon_{ ext{eq}} = \mathbf{n}_{\{\mathbf{111}\}} \cdot oldsymbol{arepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle \mathbf{011} 
angle}$$

• Максимальная главная деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \varepsilon_1$$

• Интенсивность деформаций по Мизесу

$$\varepsilon_{\rm eq} = \sqrt{\frac{2}{9}} \left[ \left( \varepsilon_x - \varepsilon_y \right)^2 + \left( \varepsilon_y - \varepsilon_z \right)^2 + \left( \varepsilon_z - \varepsilon_x \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 \right) \right]$$

• Максимальная сдвиговая деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \right)$$

За эквивалентную деформацию можно взять:

• Максимальная сдвиговая деформация в системе скольжения

$$arepsilon_{\mathrm{eq}} = \mathbf{n}_{\{\mathbf{111}\}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle \mathbf{011} 
angle}$$

• Максимальная главная деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \varepsilon_1$$

• Интенсивность деформаций по Мизесу

$$\varepsilon_{\rm eq} = \sqrt{\frac{2}{9}} \left[ \left( \varepsilon_x - \varepsilon_y \right)^2 + \left( \varepsilon_y - \varepsilon_z \right)^2 + \left( \varepsilon_z - \varepsilon_x \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 \right) \right]$$

• Максимальная сдвиговая деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \right)$$

За эквивалентную деформацию можно взять:

• Максимальная сдвиговая деформация в системе скольжения

$$\varepsilon_{\mathrm{eq}} = \mathbf{n}_{\{\mathbf{111}\}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle \mathbf{011} \rangle}$$

• Максимальная главная деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \varepsilon_1$$

• Интенсивность деформаций по Мизесу

$$\varepsilon_{\rm eq} = \sqrt{\frac{2}{9}} \left[ \left( \varepsilon_x - \varepsilon_y \right)^2 + \left( \varepsilon_y - \varepsilon_z \right)^2 + \left( \varepsilon_z - \varepsilon_x \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 \right) \right]$$

• Максимальная сдвиговая деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \right)$$

За эквивалентную деформацию можно взять:

• Максимальная сдвиговая деформация в системе скольжения

$$arepsilon_{\mathrm{eq}} = \mathbf{n}_{\{\mathbf{111}\}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle \mathbf{011} 
angle}$$

• Максимальная главная деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \varepsilon_1$$

• Интенсивность деформаций по Мизесу

$$\varepsilon_{\rm eq} = \sqrt{\frac{2}{9}} \left[ \left( \varepsilon_x - \varepsilon_y \right)^2 + \left( \varepsilon_y - \varepsilon_z \right)^2 + \left( \varepsilon_z - \varepsilon_x \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 \right) \right]$$

• Максимальная сдвиговая деформация

$$\varepsilon_{\rm eq} = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \right)$$

Физическая упруго-пластическая модель. Нагрузки:

нестационарное поле температур $T\left(x,y,z,t\right)$ и максимальная угловая скорость $\omega=650$ об/мин



Вилланов В.Р. (СПБГПУ, ИПММ, каф. ТМ) Анализ термоусталос



ъ

#### Интенсивность напряжений



ъ

イロト 不良 トイヨト イヨト



э



a)t = 150c (пуск),





ъ

- Рассмотрены различные модели неупругого деформирования;
- Для расчётов использовано КЭ моделирование;
- Учтены температурные деформации;
- Учтено влияние кристаллографическая ориентация на НДС;
- Наиболее опасные режимы работы разгон и остановка.

・ロッ ・雪ッ ・ヨッ

- Рассмотрены различные модели неупругого деформирования;
- Для расчётов использовано КЭ моделирование;
- Учтены температурные деформации;
- Учтено влияние кристаллографическая ориентация на НДС;
- Наиболее опасные режимы работы разгон и остановка.

・ロッ ・雪ッ ・ヨッ

- Рассмотрены различные модели неупругого деформирования;
- Для расчётов использовано КЭ моделирование;
- Учтены температурные деформации;
- Учтено влияние кристаллографическая ориентация на НДС;
- Наиболее опасные режимы работы разгон и остановка.

・ロッ ・雪ッ ・ヨッ

- Рассмотрены различные модели неупругого деформирования;
- Для расчётов использовано КЭ моделирование;
- Учтены температурные деформации;
- Учтено влияние кристаллографическая ориентация на НДС;
- Наиболее опасные режимы работы разгон и остановка.

・ロッ ・雪 ・ ・ ヨ ・ ・ ヨ ・

- Рассмотрены различные модели неупругого деформирования;
- Для расчётов использовано КЭ моделирование;
- Учтены температурные деформации;
- Учтено влияние кристаллографическая ориентация на НДС;
- Наиболее опасные режимы работы разгон и остановка.

・ロッ ・雪 ・ ・ ヨ ・ ・ ヨ ・

#### • Расчёт лопатки с использованием других моделей;

- Расчёт лопатки с креплением к диску;
- Сравнение расчётов друг с другом;
- Сравнение расчётов с экспериментальными данными;
- Статьи в высокорейтинговых журналах и магистерская диссертация.

3

イロト 不良 トイヨト イヨト

- Расчёт лопатки с использованием других моделей;
- Расчёт лопатки с креплением к диску;
- Сравнение расчётов друг с другом;
- Сравнение расчётов с экспериментальными данными;
- Статьи в высокорейтинговых журналах и магистерская диссертация.

イロト 不良 トイヨト イヨト

- Расчёт лопатки с использованием других моделей;
- Расчёт лопатки с креплением к диску;
- Сравнение расчётов друг с другом;
- Сравнение расчётов с экспериментальными данными;
- Статьи в высокорейтинговых журналах и магистерская диссертация.

イロト 不可ト イヨト イヨト

- Расчёт лопатки с использованием других моделей;
- Расчёт лопатки с креплением к диску;
- Сравнение расчётов друг с другом;
- Сравнение расчётов с экспериментальными данными;
- Статьи в высокорейтинговых журналах и магистерская диссертация.

イロト 不可ト イヨト イヨト

- Расчёт лопатки с использованием других моделей;
- Расчёт лопатки с креплением к диску;
- Сравнение расчётов друг с другом;
- Сравнение расчётов с экспериментальными данными;
- Статьи в высокорейтинговых журналах и магистерская диссертация.

#### СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!

Вилданов В.Р. (СПбГПУ, ИПММ, каф. ТМ) Ан