

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА  
НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ С УЧЕТОМ  
ЭВОЛЮЦИИ  $\gamma$  И  $\gamma'$  ФАЗ

Выполнил: студент ак. г. 63602/1 А.И. Грищенко

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доц А.С. Семёнов



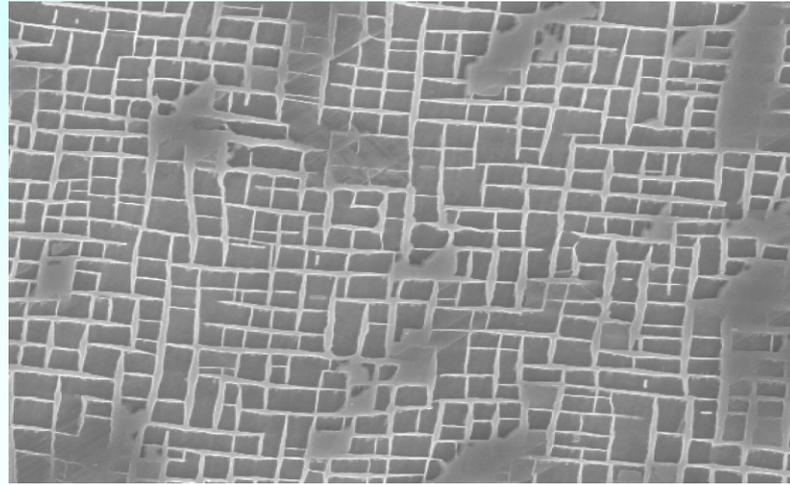
2015



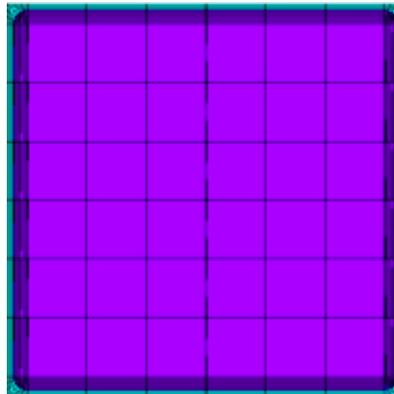
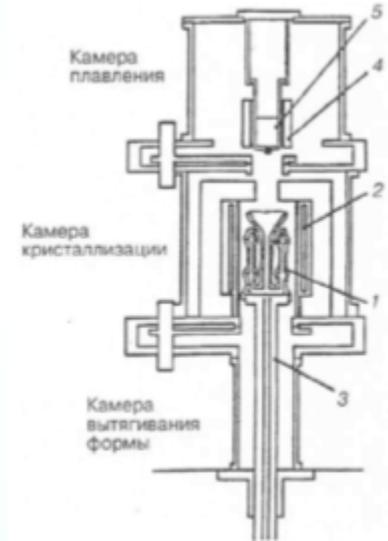
## Содержание

1. Введение
2. Определение параметров модифицированной модели ползучести Нортона с учетом поврежденности
3. Результаты моделирования процессов неупругого деформирования монокристаллических сплавов без учета эволюции  $\gamma$  и  $\gamma'$  фаз
4. Результаты моделирования процессов неупругого деформирования монокристаллических сплавов с учетом эволюции  $\gamma$  и  $\gamma'$  фаз
5. Выводы

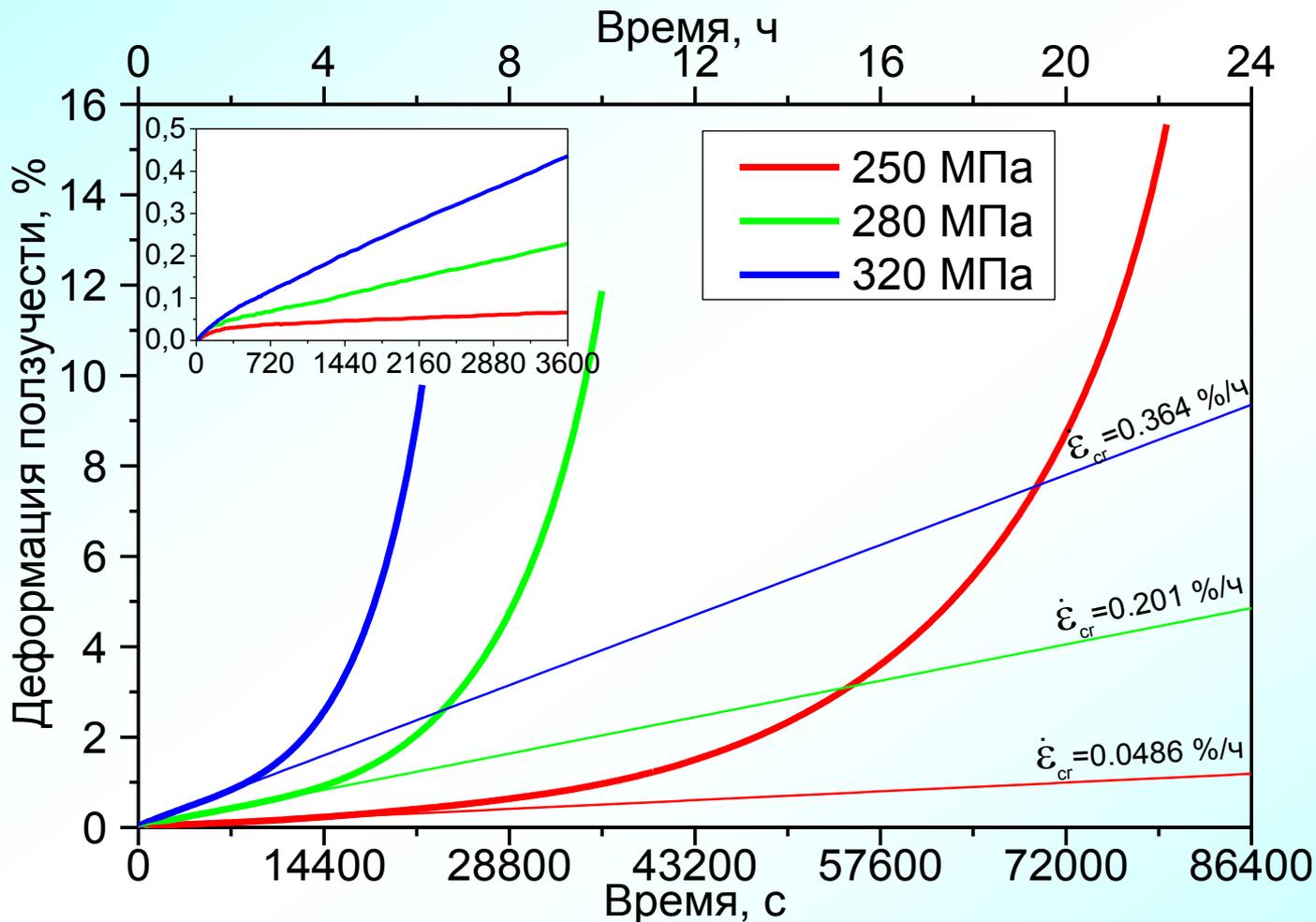
# 1. Введение



1 мкм



## 2. Определение параметров модифицированной модели ползучести Нортона с учетом поврежденности



Кривые ползучести сплава ВЖМ5У, при  $T=1050^{\circ}\text{C}$ .

## 2.1 Модифицированная модель ползучести Нортона

Модифицированная модель ползучести Нортона в форме теории упрочнения с учётом повреждений описывается при одноосном нагружении уравнением:

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = B \frac{\sigma^n}{(1-D)^l} (\varepsilon^c)^m$$

где в простейшем случае поврежденность  $D$  вычисляется по формуле:

$$\frac{dD}{dt} = K \left( \frac{\sigma}{1-D} \right)^q$$

Более сложные варианты:

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = B \frac{\sigma^n}{(1-D)^l} (\varepsilon^c)^m \quad \frac{dD}{dt} = K \frac{\sigma^p}{(1-D)^q}$$

$$\varepsilon^c = \left\{ \frac{1-m}{1-\frac{l}{1+q}} \frac{B}{K(q+1)} \sigma^{n-p} \left[ 1 - \left( 1 - K(q+1)\sigma^p t \right)^{1-\frac{l}{q+1}} \right] \right\}^{\frac{1}{1-m}}$$

Из условия разрушения  $D(t=t_f)=1$ :

$$t_f = \frac{1}{(q+1)K\sigma^p}$$

Тогда:

$$\varepsilon^c = \left\{ \frac{1-m}{1-\frac{l}{1+q}} B \sigma^n t_f \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{t_f} \right)^{1-\frac{l}{q+1}} \right] \right\}^{\frac{1}{1-m}}$$

Или::

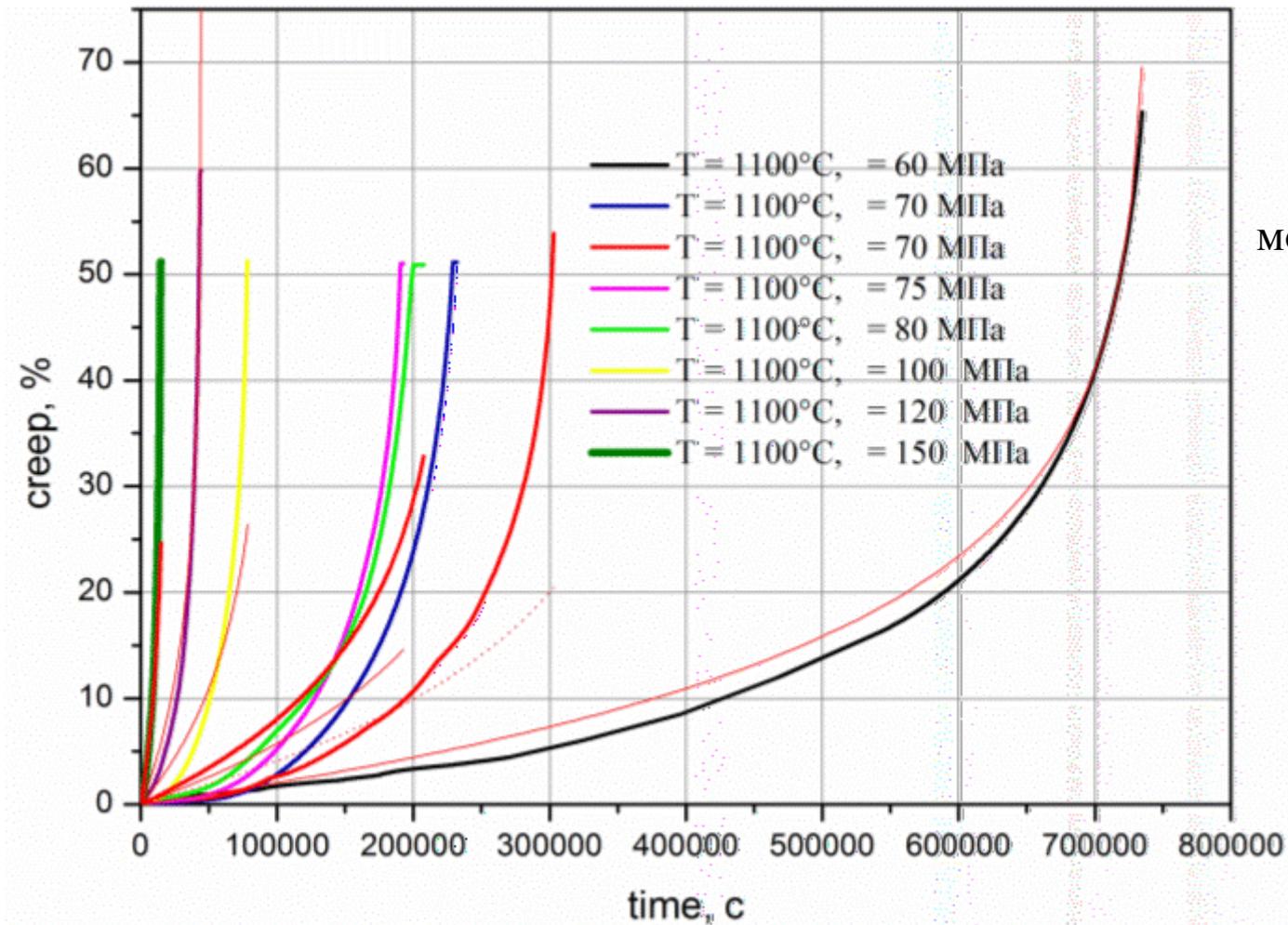
$$\varepsilon^c = \left\{ A \sigma^x \left[ 1 - \left( 1 - K_1 \sigma^p t \right)^v \right] \right\}^{m_1}$$

, где ::

$$A = \frac{1-m}{1-\frac{l}{1+q}} \frac{B}{K(q+1)} \quad x = n-p \quad K_1 = K(1-q) \quad p = 1 - \frac{l}{q+1} \quad m_1 = \frac{1}{1-m}$$

В данном исследовании рассматривается вариант  $n=l$ ,  $m_1=1$  –установившаяся ползучесть

# Сплав ВИНЗ

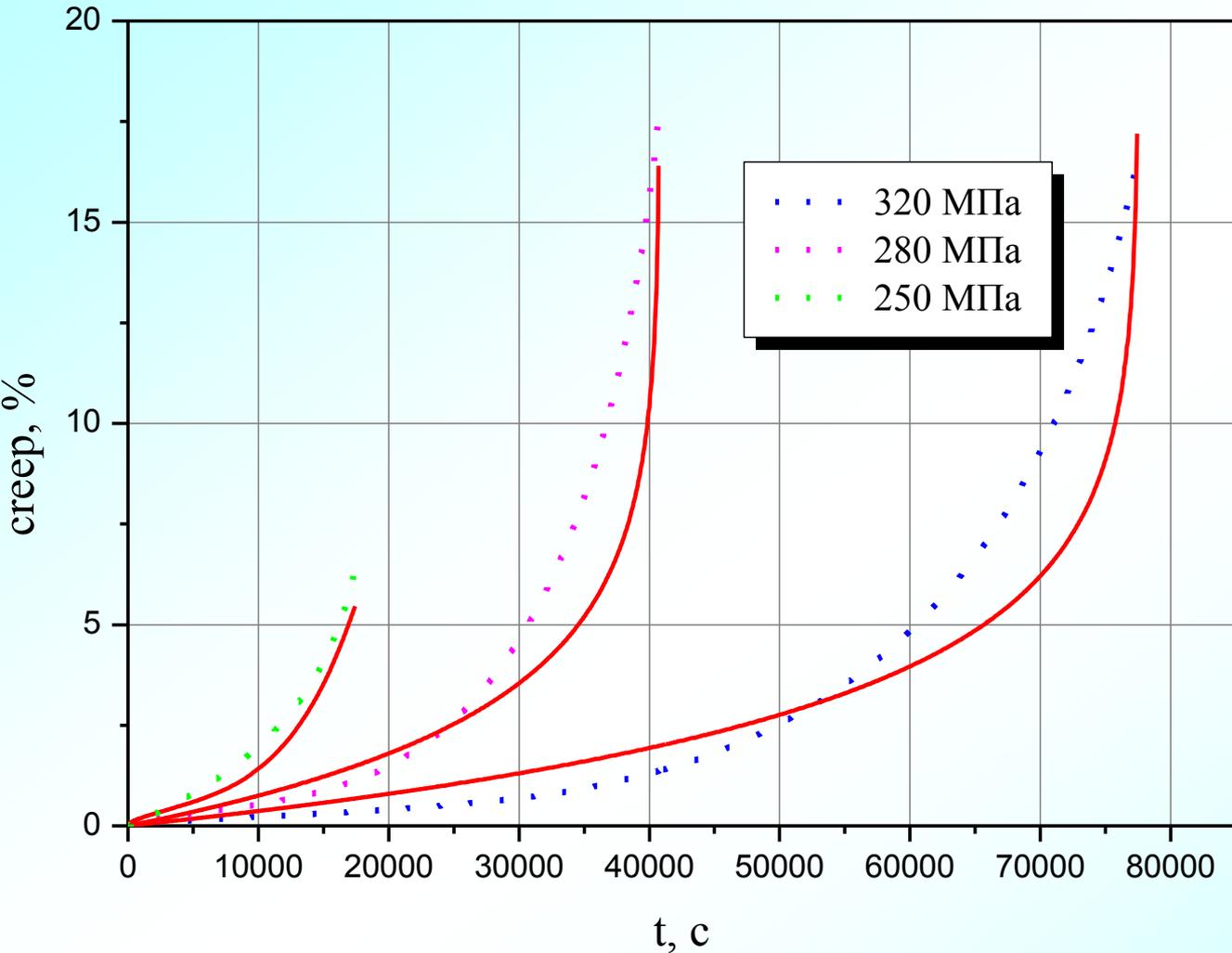


Значения параметров модели:

$K_1$	8.16E-14
$p$	4.06E+00
$v$	3.00E-03
$A$	4.45E+03
$x$	1.32E-02

СКО: 0.16

# Сплав ВЖМ4

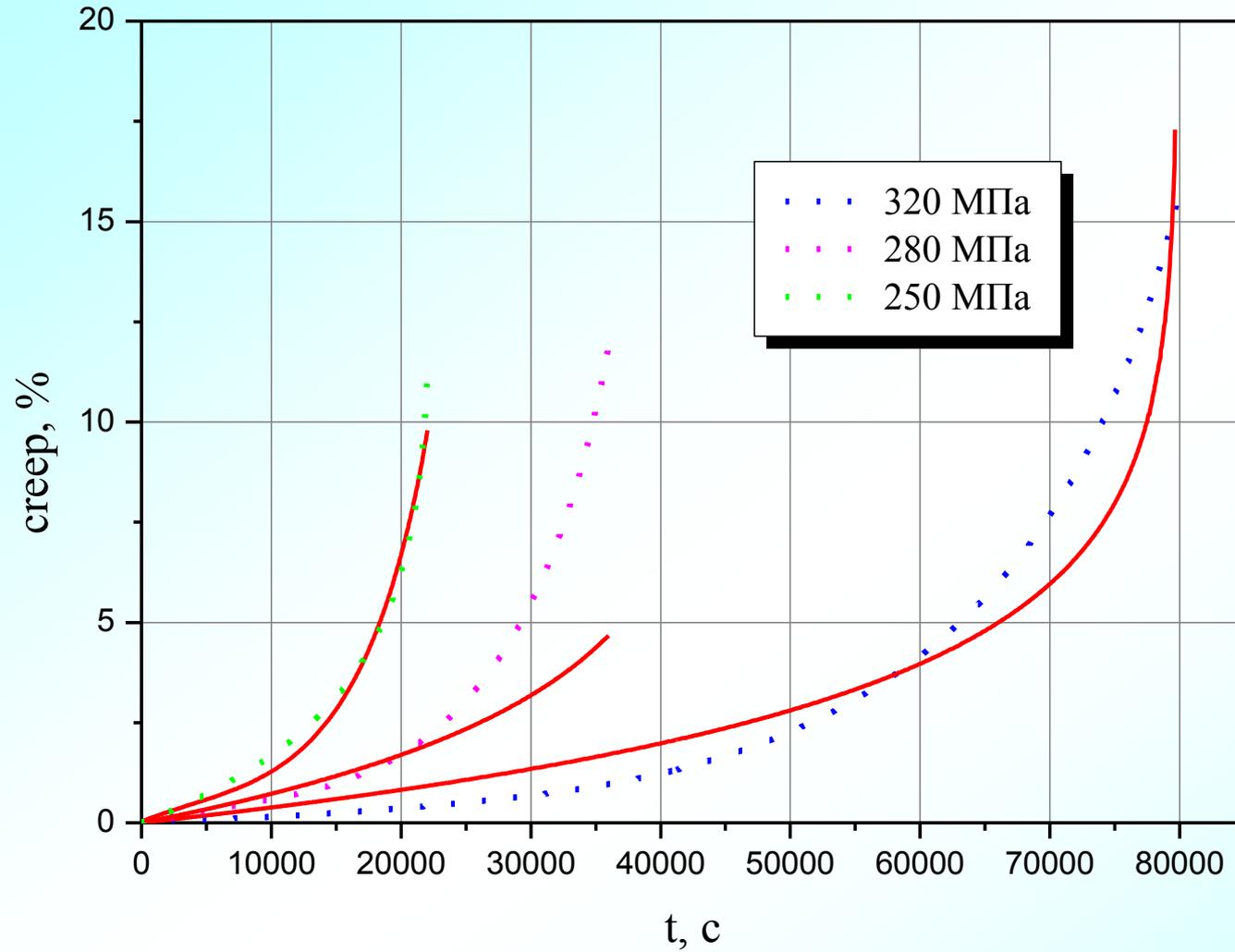


Значения параметров  
модели:

$K_1$	3.37E-19
$p$	5.66E+00
$v$	1.17E-03
$A$	2.32E+03
$x$	3.30E-05

СКО: 0.17

# Сплав ВЖМ5У

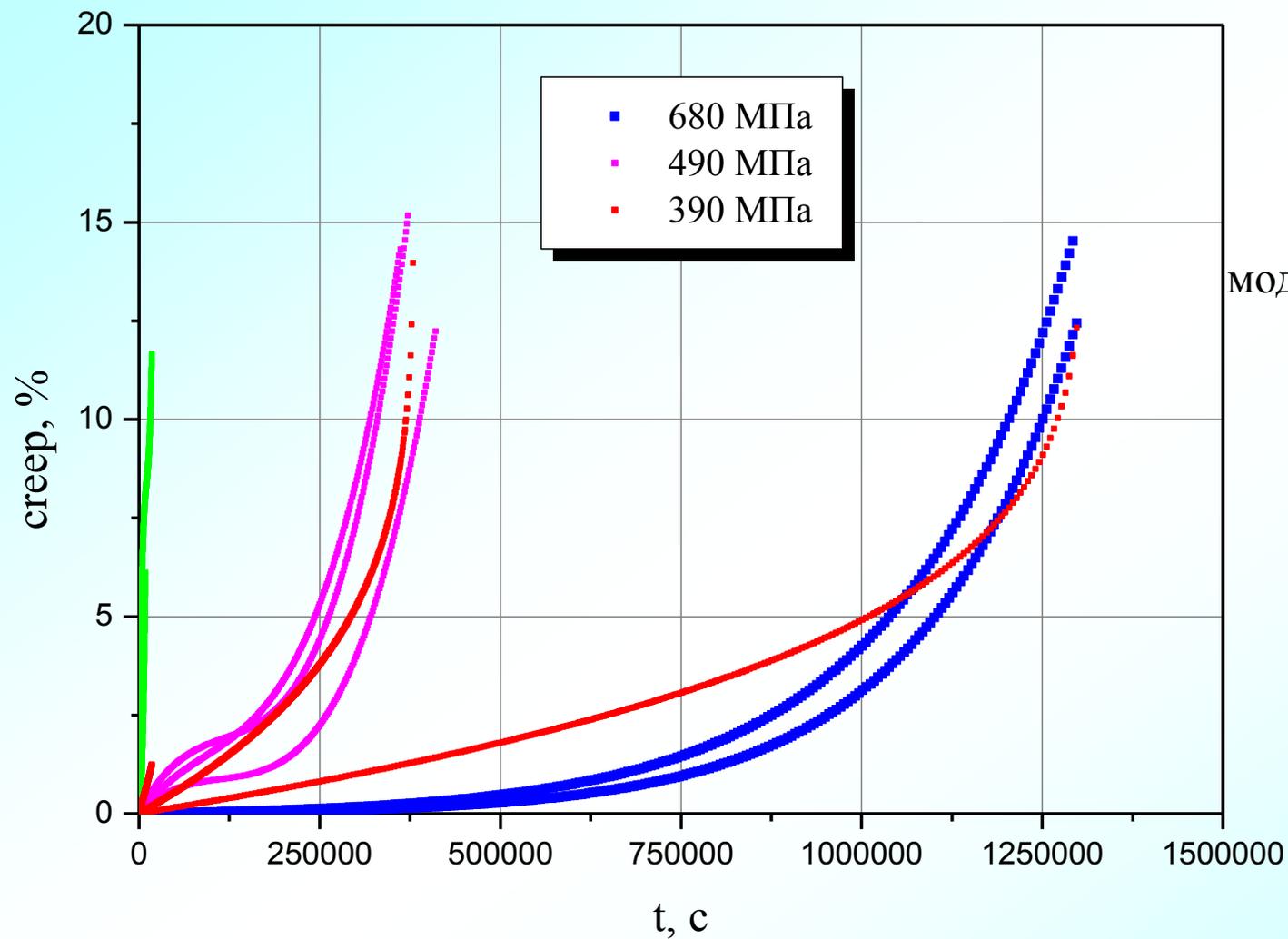


Значения параметров  
модели:

$K_1$	6.20E-18
$p$	5.32E+00
$\nu$	2.58E-03
$A$	1.11E+03
$x$	9.69E-05

СКО: 0.17

# Сплав ЖС36

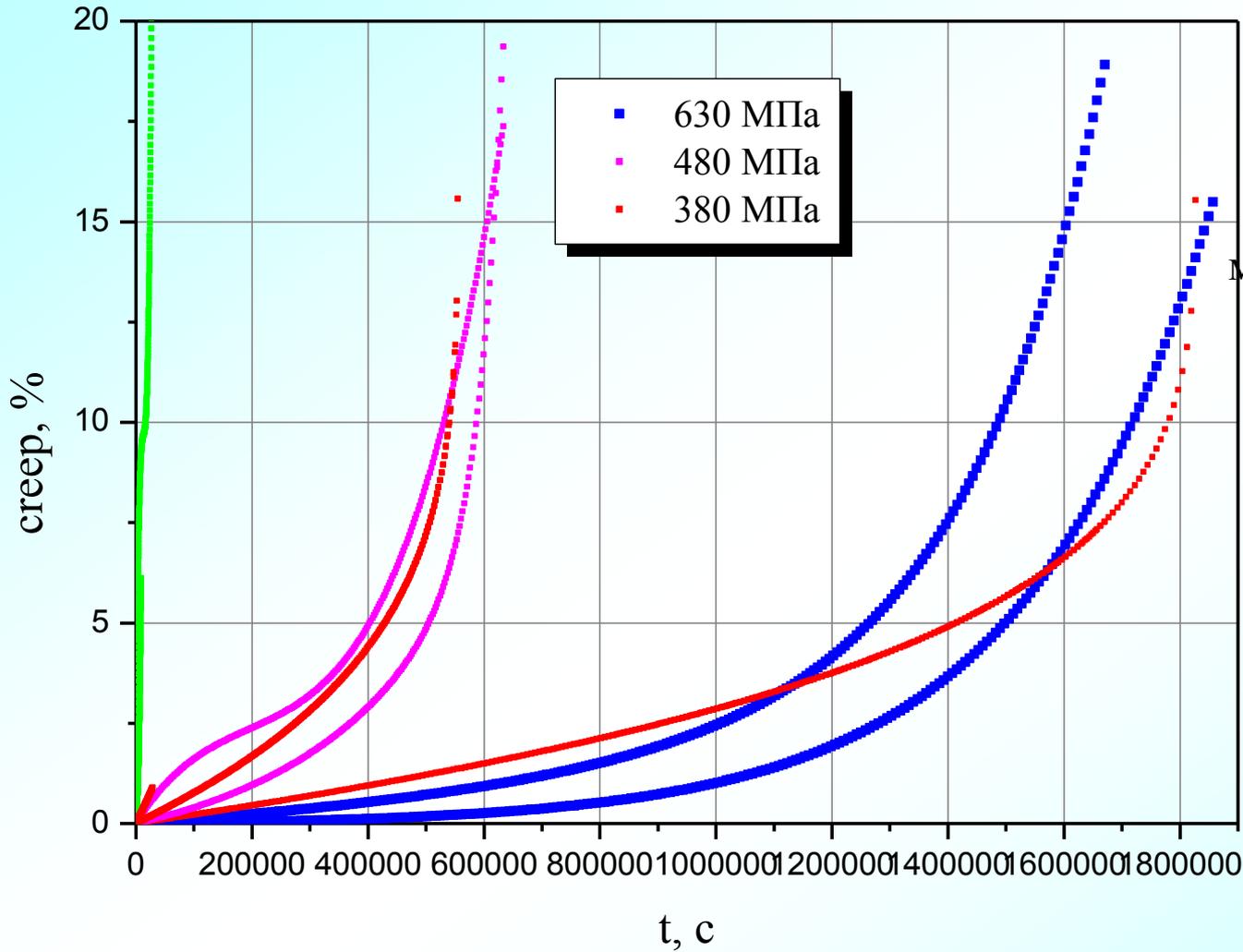


Значения параметров модели:

$K_1$	1,89E-15
$p$	5,41E+00
$v$	2,06E-01
$A$	1,82E+01
$x$	1,32E-02

СКО: 0.2

# Сплав ЖС36ВНК



Значения параметров модели:

$K_1$	4.80E-15
$p$	5.10E+00
$v$	2.06E-01
$A$	1.82E+01
$x$	1.32E-02

СКО: 0.19

### 3. Результаты моделирования процессов неупругого деформирования монокристаллических сплавов без учета эволюции $\gamma$ и $\gamma'$ фаз

#### Определение длительной прочности охлаждаемых лопаток из монокристаллических сплавов

Коэффициент запаса длительной статической прочности ( $n_\sigma$ ) и статического повреждения по напряжениям ( $D^s$ ) для монокристаллических лопаток ГТУ:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{R<001>}}{\sigma_{es}} \quad D^s = \frac{1}{n_\sigma}$$

, где  $\sigma_{R<001>} = f(T, \tau)$  - предел длительной статической прочности монокристаллического сплава при растяжении в направлении  $\langle 001 \rangle$

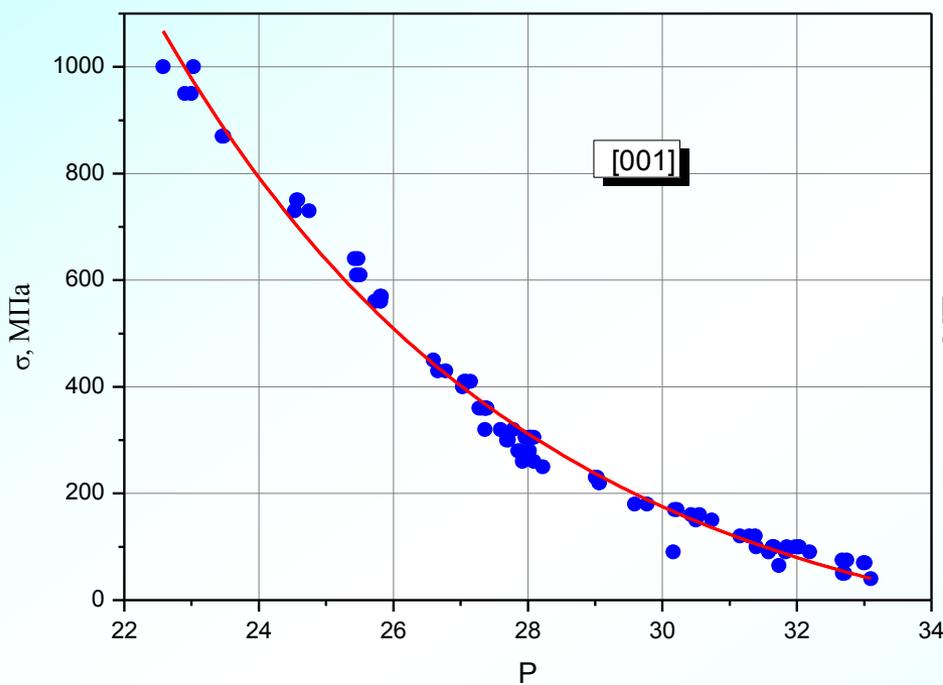
$$\sigma_{es} = \sqrt[m_e]{\frac{1}{t} \int_0^t [\sigma_{es}^*(\tau)]^{m_e} d\tau}$$

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

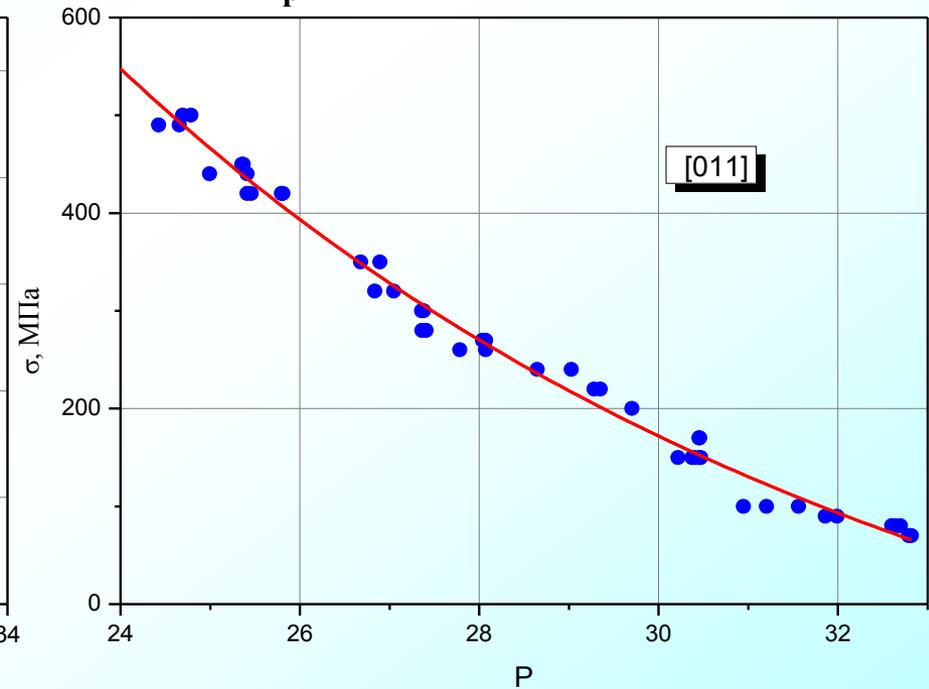
$$K_R = 4 \frac{\sigma_{R<001>}^2}{\sigma_{R<011>}^2} - 1$$

Были приведены испытания на длительную прочность для монокристаллического сплава при температурах 750-1200°C образцов с различными кристаллографическими направлениями вдоль оси действия нагрузки, представленные в виде кривых Ларсона-Миллера

### Кривые Ларсона Миллера $P(\sigma)=T(20+\lg\tau_p)$ : a-[001], b-[011]

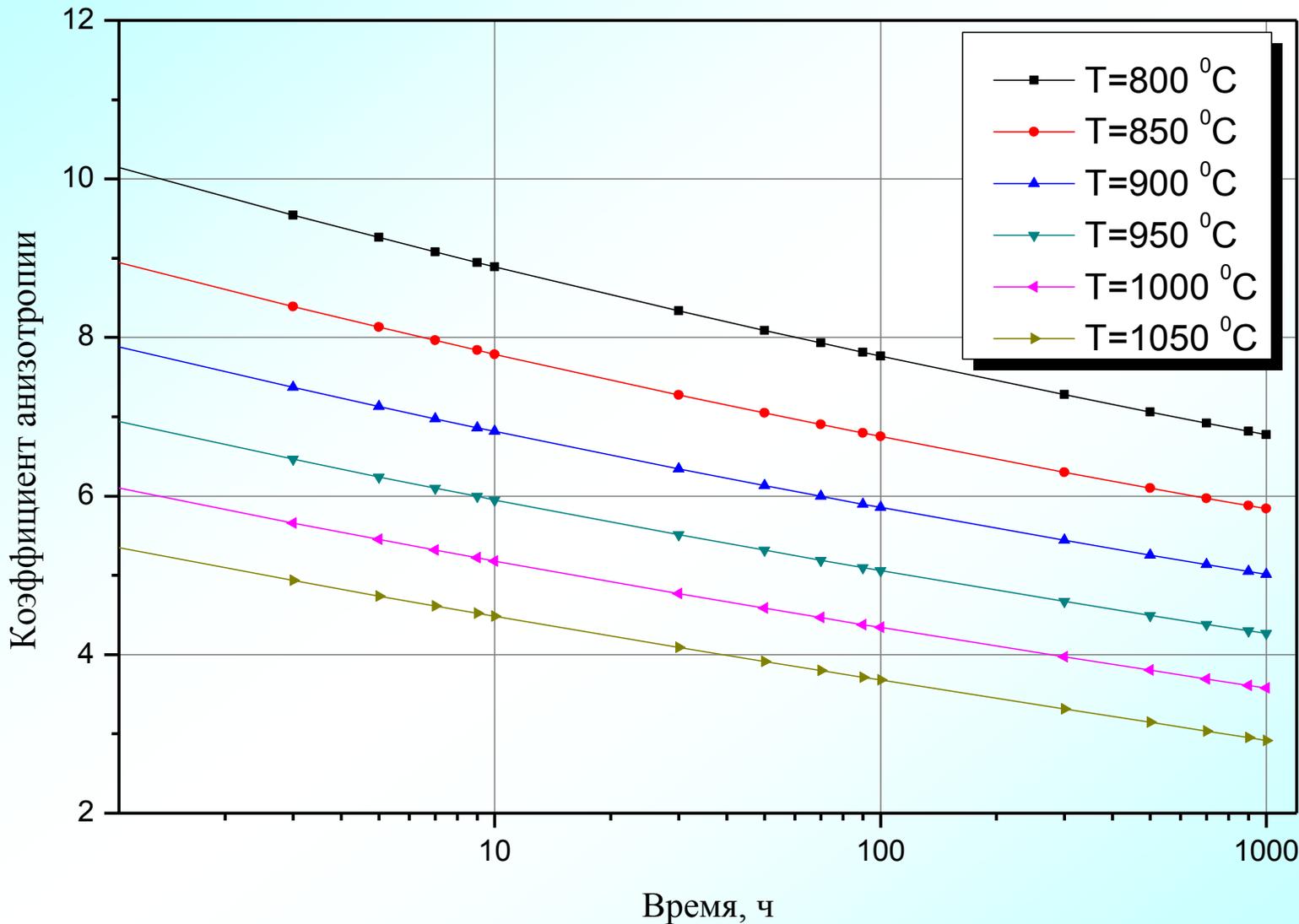


a)



b)

С использованием кривых Ларсона-Миллера были определены зависимости коэффициента анизотропии длительной прочности от времени :



Общая статическая повреждаемость за время  $t$  вычислялась исходя из принципа линейного суммирования повреждений во временной трактовке

$$D_t^s = \int_0^t \frac{d\tau}{t_{Re}(\tau)}$$

Рассматривалась прочность рабочей охлаждаемой лопатки из монокристаллического сплава исходя из рассчитанных значений местных эквивалентных напряжений и по несущей способности лопатки.

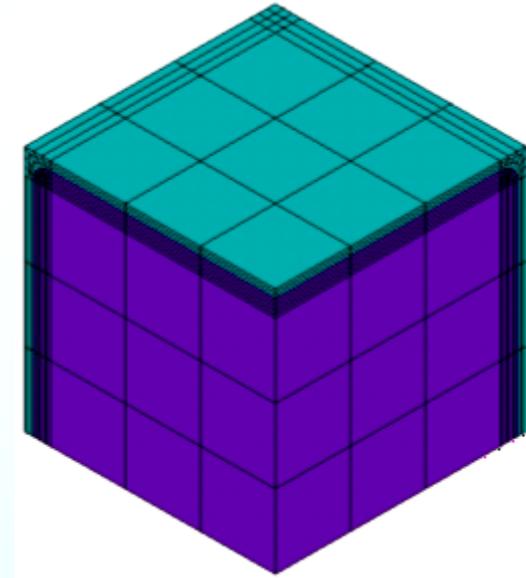
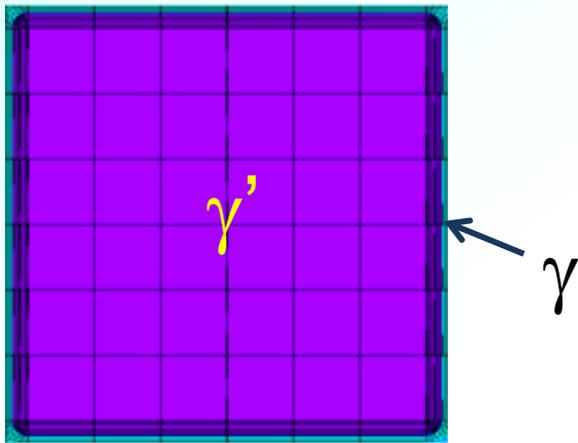
Коэффициенты запаса для длительности в часах				
100	500	1000	5000	10000
1,481	1,248	1,158	0,968	0,893

При нормативном коэффициенте запаса 1,5 ресурс рассчитанной лопатки составляет 90 ч.



# 4. Результаты моделирования процессов неупругого деформирования монокристаллических сплавов с учетом эволюции $\gamma$ и $\gamma'$ фаз

КЭ модели элементарного представительного объема монокристаллического сплава



Характерные размеры:

- размеры  $\gamma'$  фазы  $500 \times 500 \times 500$  нм
- толщина  $\gamma$  фазы 30 нм

# Методы решения.

## Постановка задачи гомогенизации

Осреднение напряженно-деформированного состояния в пределах элементарного представительного объема (ЭПО):

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{V_{\text{ЭПО}}} \int_{V_{\text{ЭПО}}} \boldsymbol{\varepsilon} dV, \quad \bar{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{V_{\text{ЭПО}}} \int_{V_{\text{ЭПО}}} \boldsymbol{\sigma} dV$$

Закон Гука для ортотропного материала может быть записан в виде:

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = {}^4\bar{\mathbf{C}} \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}}$$

$$[\bar{\mathbf{C}}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{E}_1} & -\frac{\bar{\nu}_{21}}{\bar{E}_2} & -\frac{\bar{\nu}_{31}}{\bar{E}_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\bar{\nu}_{12}}{\bar{E}_1} & \frac{1}{\bar{E}_2} & -\frac{\bar{\nu}_{32}}{\bar{E}_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\bar{\nu}_{13}}{\bar{E}_1} & -\frac{\bar{\nu}_{23}}{\bar{E}_2} & \frac{1}{\bar{E}_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_{31}} \end{bmatrix}$$

Упругие модули определяются на основе соотношений:

$$\bar{E}_i = \frac{\bar{\sigma}_{ii}}{\bar{\varepsilon}_{ii}} \quad \bar{\nu}_{ij} = -\frac{\bar{\varepsilon}_{jj}}{\bar{\varepsilon}_{ii}}$$

# Определяющие уравнения для монокристаллического сплава

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$$

$$\boldsymbol{\sigma} = {}^4\mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^e$$

## Феноменологические модели

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{p} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$$

$$\dot{p} = f(\sigma_{eq}, \dots)$$

$$F = \sigma_{eq} = \sqrt{\mathbf{s} \cdot \cdot {}^4\mathbf{A} \cdot \cdot \mathbf{s}}$$

## Микромеханические модели

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^{\alpha} \mathbf{P}^{\alpha}$$

$$\dot{\gamma}^{\alpha} = f(\tau^{\alpha}, \dots)$$

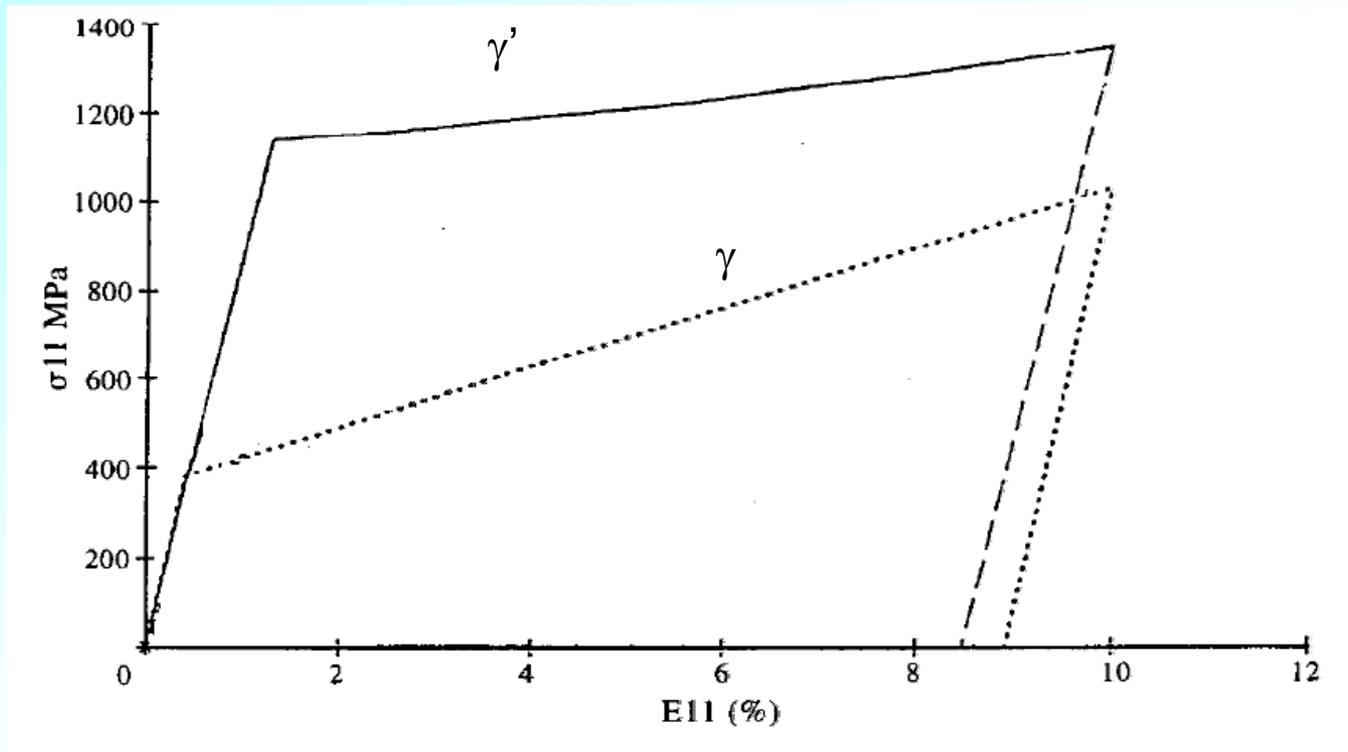
$$\tau^{\alpha} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \cdot \mathbf{P}^{\alpha}$$

$$\mathbf{P}^{\alpha} = \frac{1}{2} (\mathbf{m}^{\alpha} \mathbf{s}^{\alpha} + \mathbf{s}^{\alpha} \mathbf{m}^{\alpha})$$

тензор Шмида

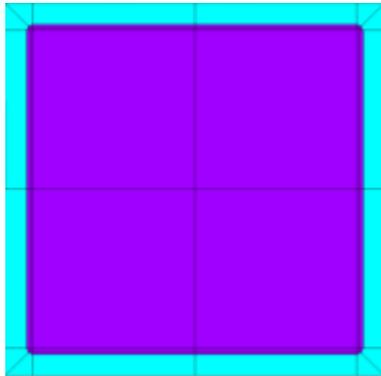
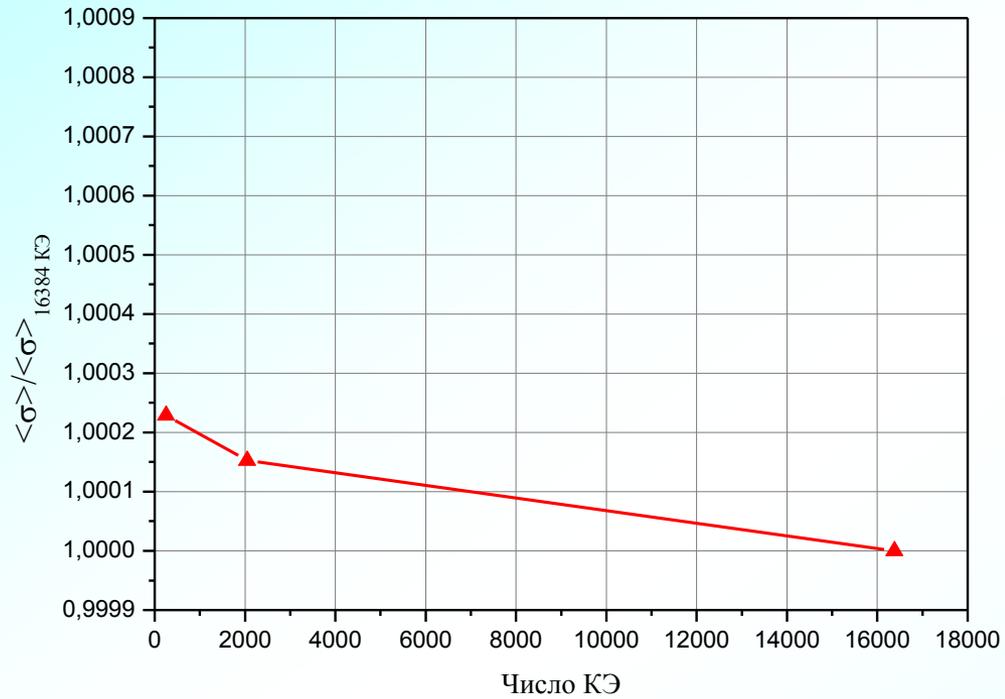


# Свойства материала

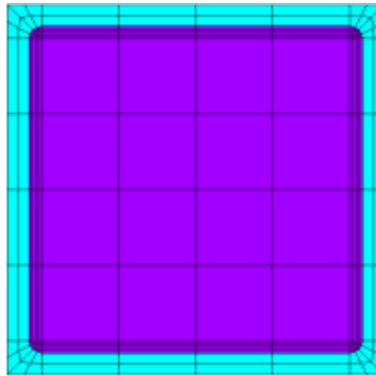


	γ фаза		γ' фаза	
	850°C	950°C	850°C	950°C
$E_{100}$ (МПа)	89050	84300	101190	95100
$\nu_{100}$	0.4	0.4	0.4	0.4
$\mu_{100}$ (МПа)	100160	96670	105200	100110

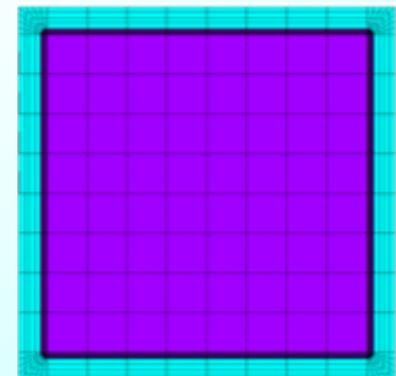
# Оценка точности численных решений



256 КЭ

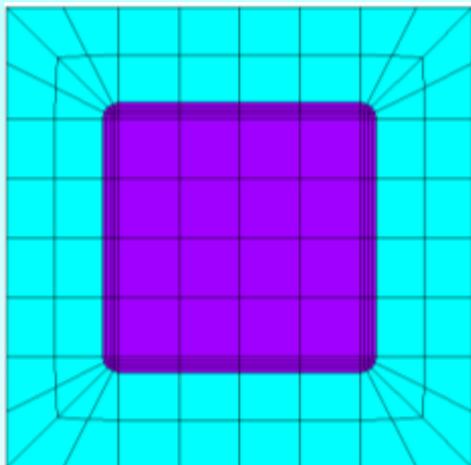


2048 КЭ

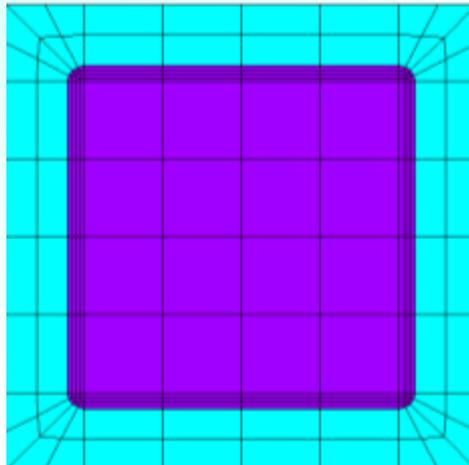


16324 КЭ

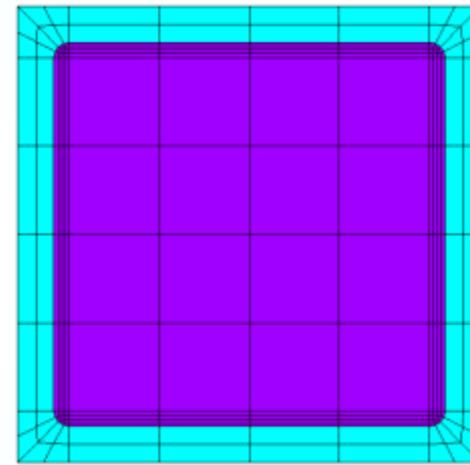
# КЭ модели ЭПО монокристаллического сплава на никелевой основе для разной доли $\gamma'$ фазы



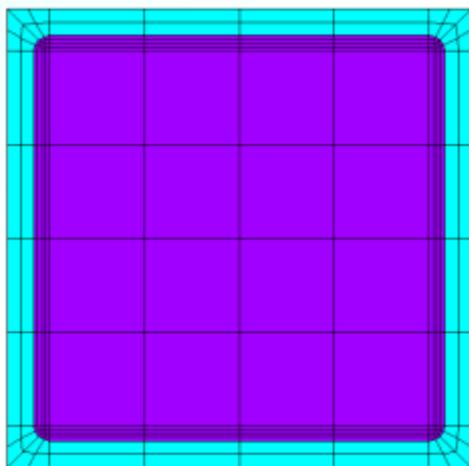
20%



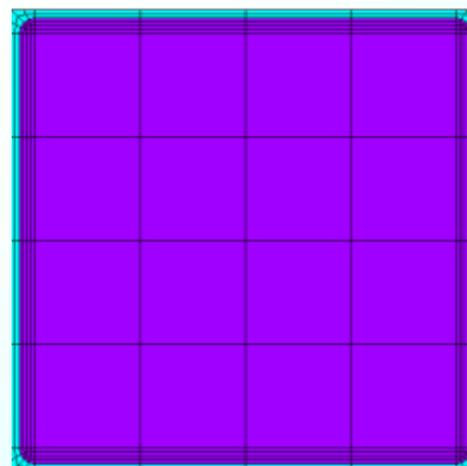
40%



60%

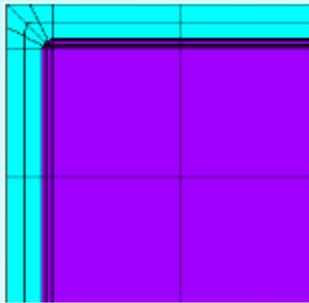


70%

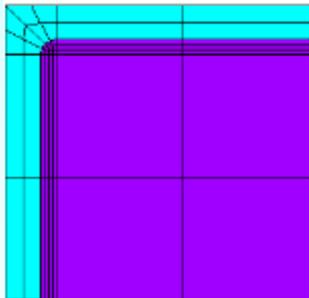


90%

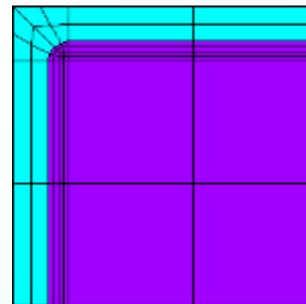
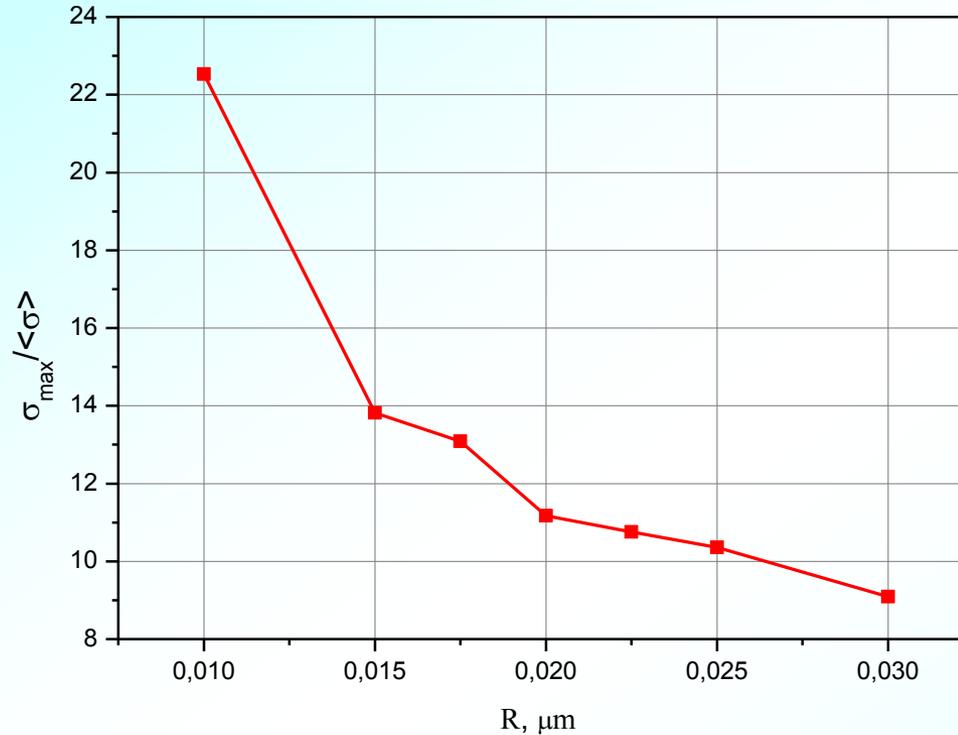
# Влияние радиуса скругления $\gamma'$ фазы



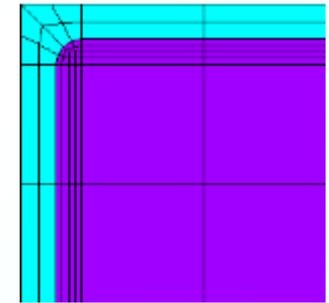
R: =0.01  $\mu\text{m}$



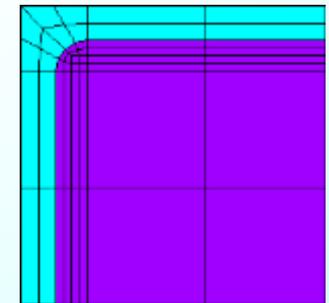
R: =0.015  $\mu\text{m}$



R: =0.02  $\mu\text{m}$



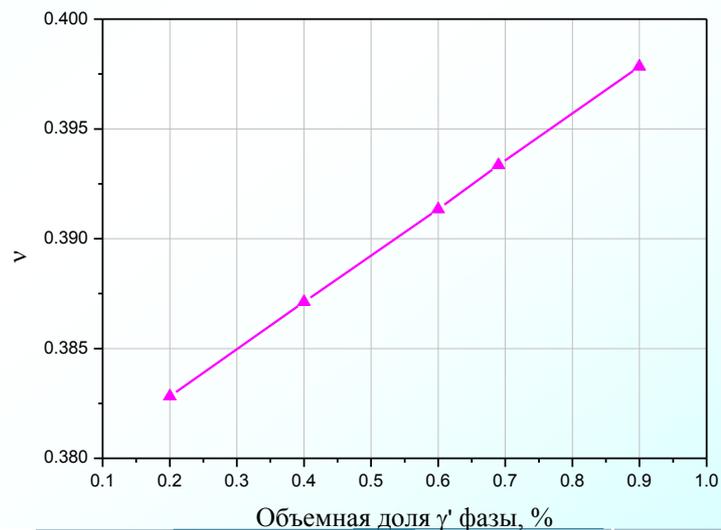
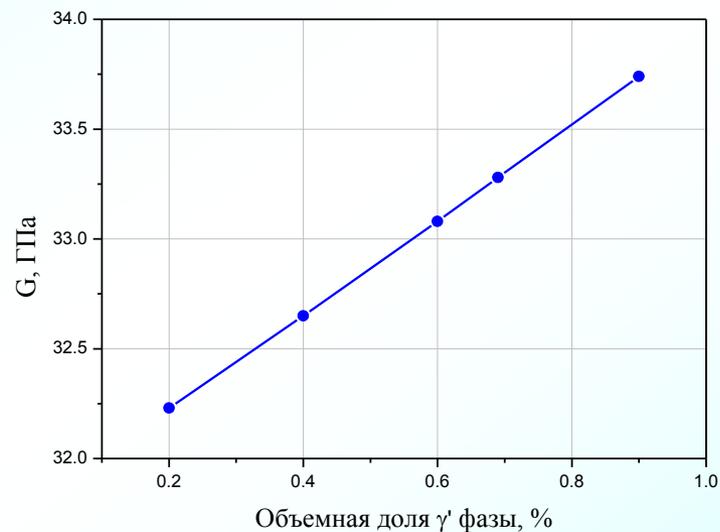
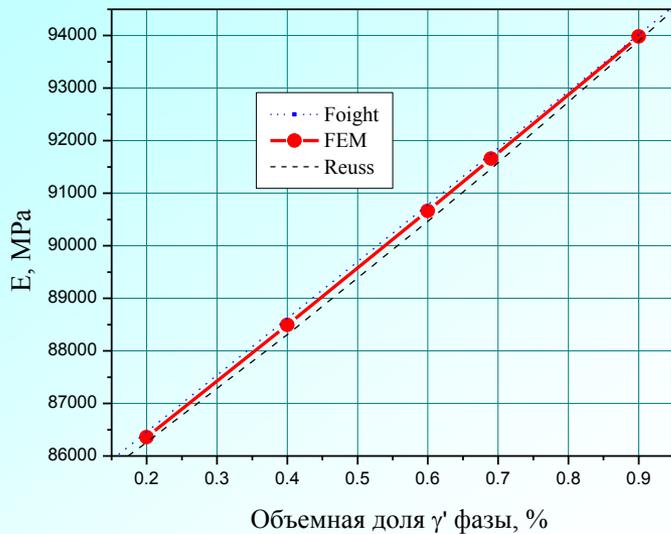
R: =0.025  $\mu\text{m}$

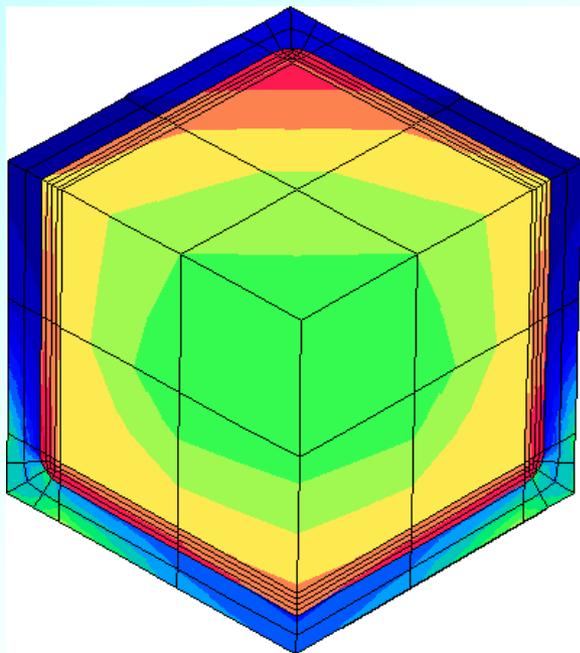


R: =0.03  $\mu\text{m}$

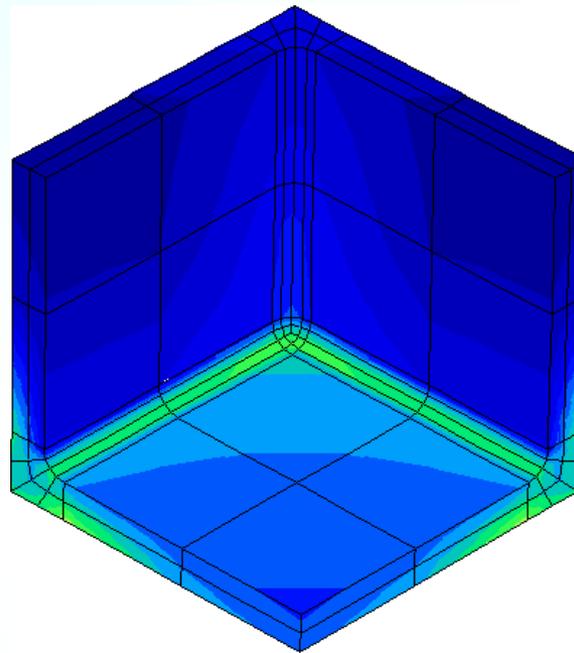
# Результаты КЭ моделирования

## Влияние объемной доли $\gamma'$ фазы на упругие свойства

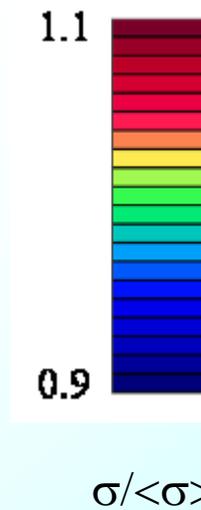




а)

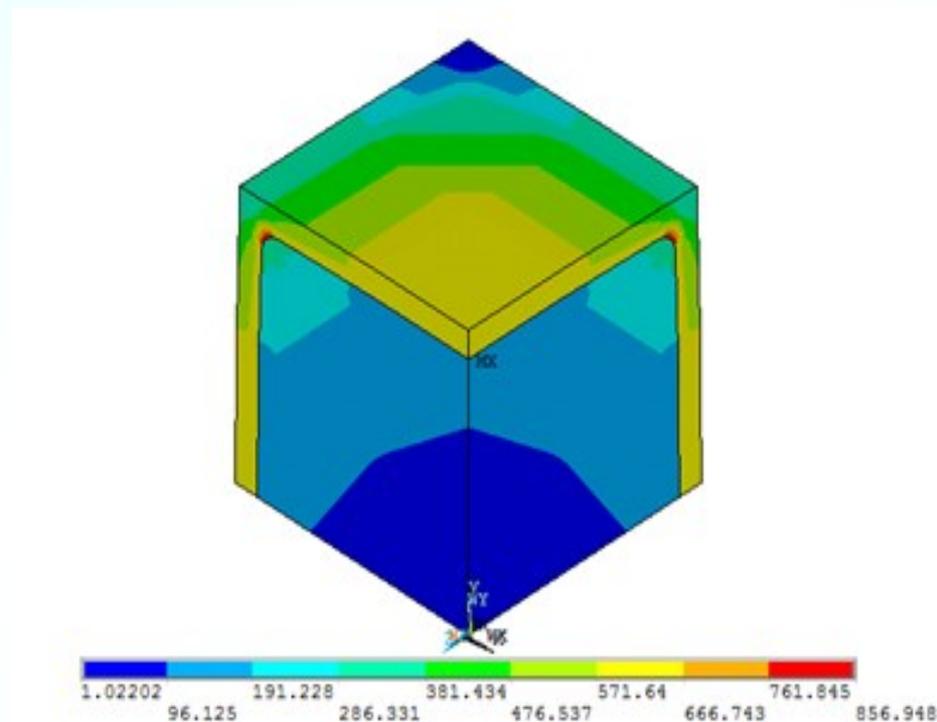
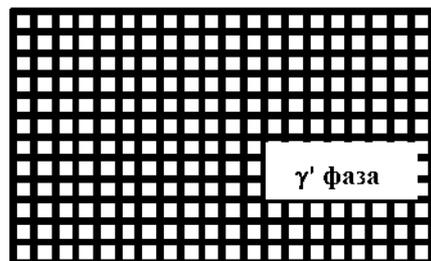
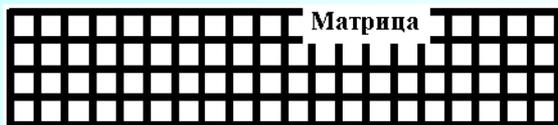


б)

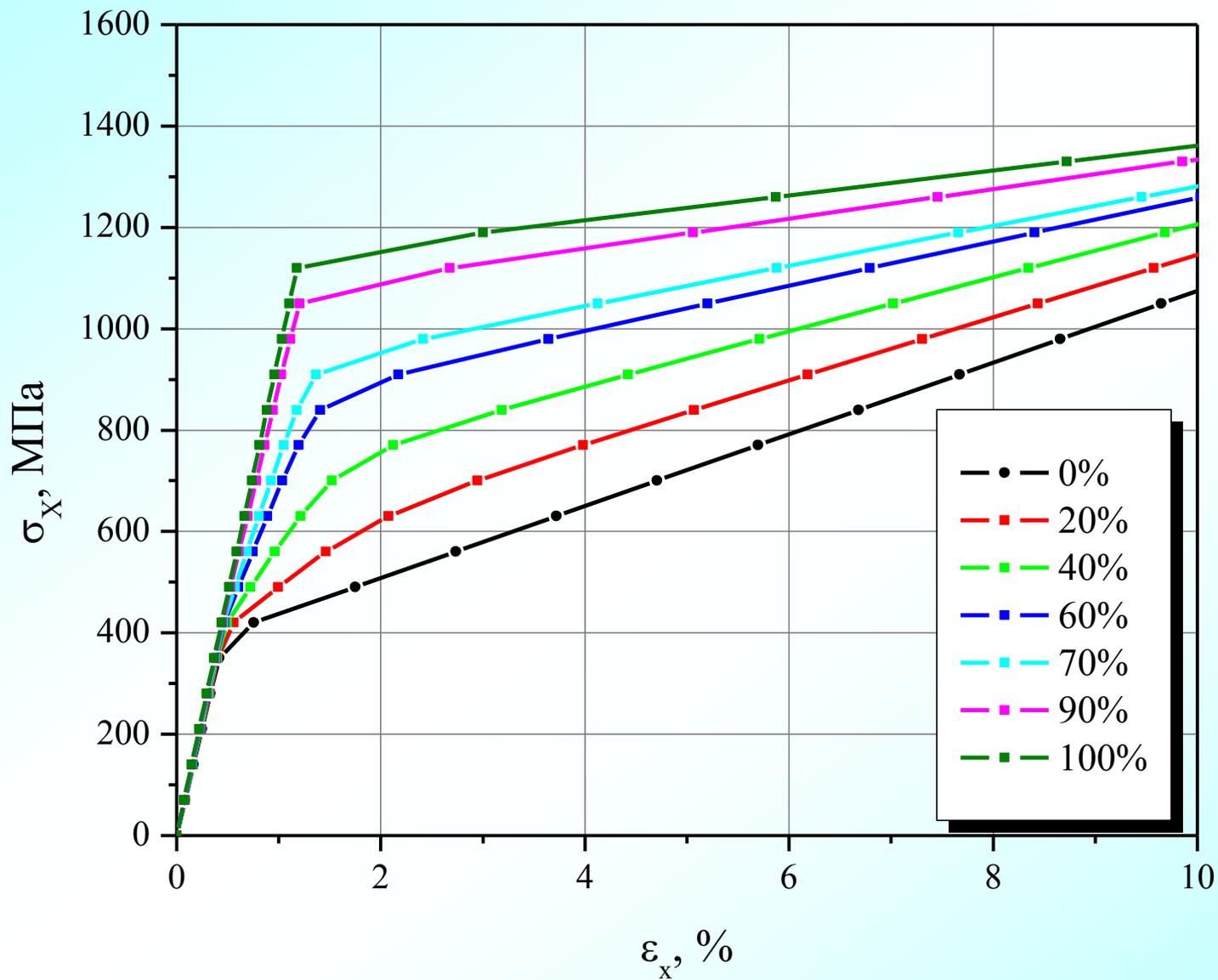


Поля распределения интенсивностей напряжений по Мизесу при растяжении ЭПО монокристаллического сплава. Объемная доля  $\gamma'$  фазы - 70%.

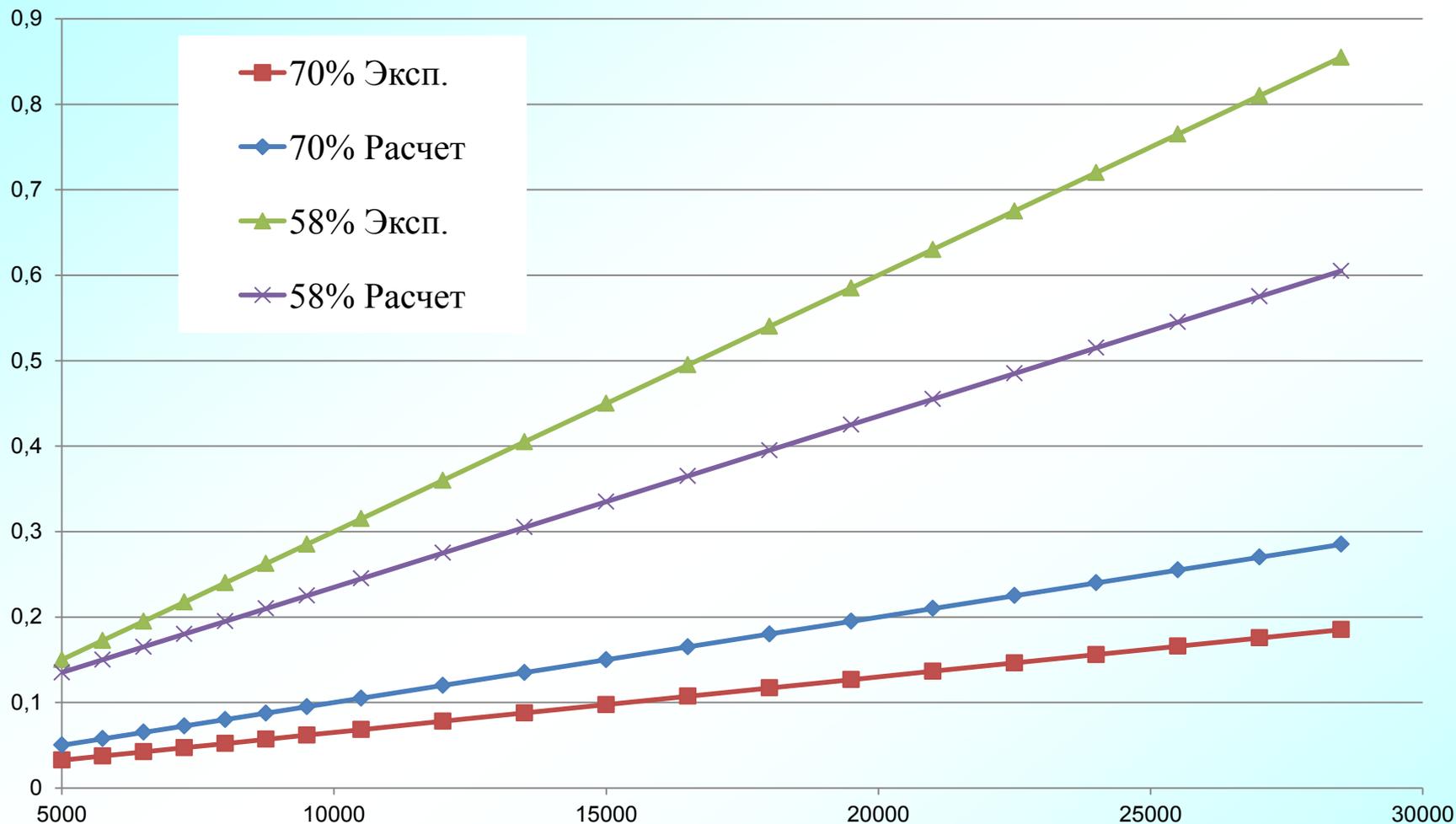
# Влияние учета мисфита

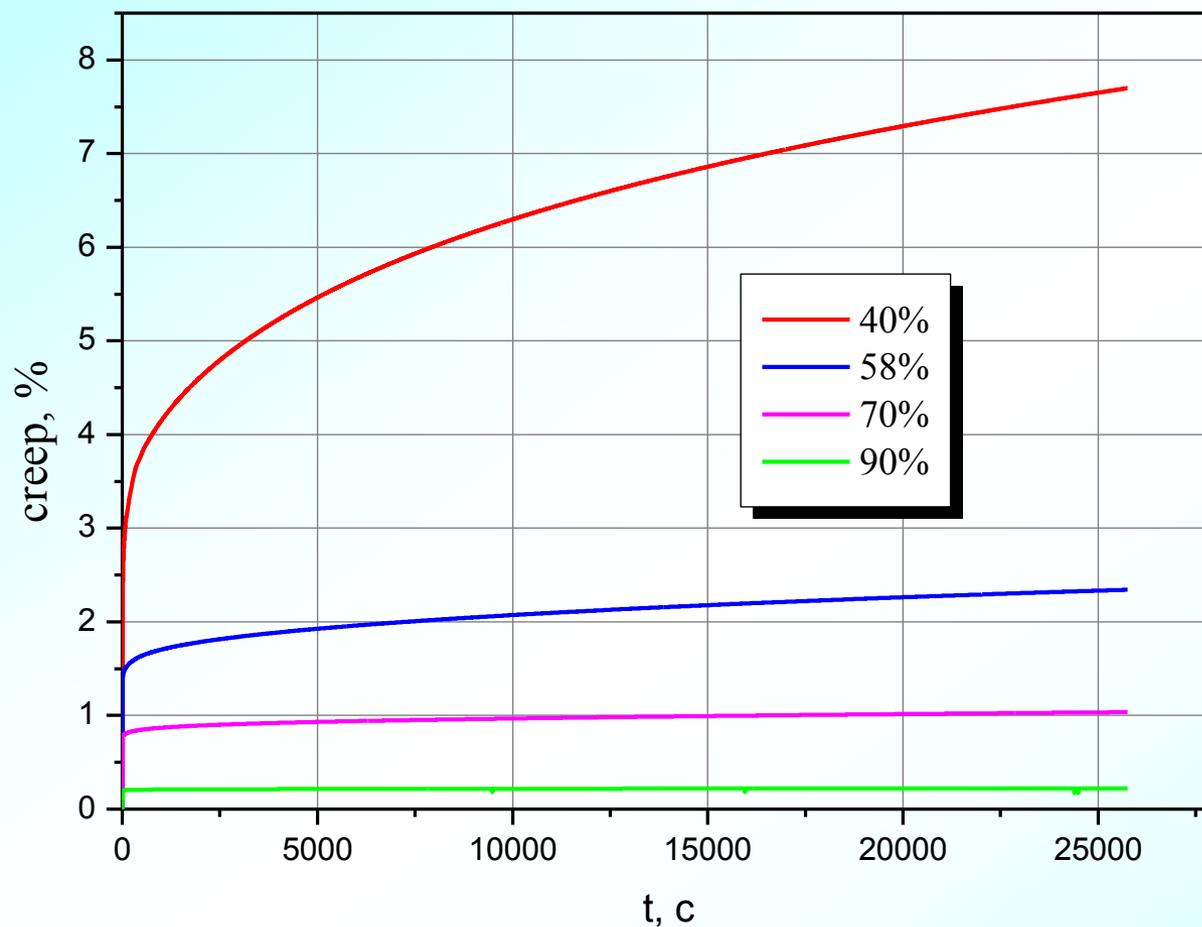


# Влияние объемной доли $\gamma'$ фазы на пластические свойства



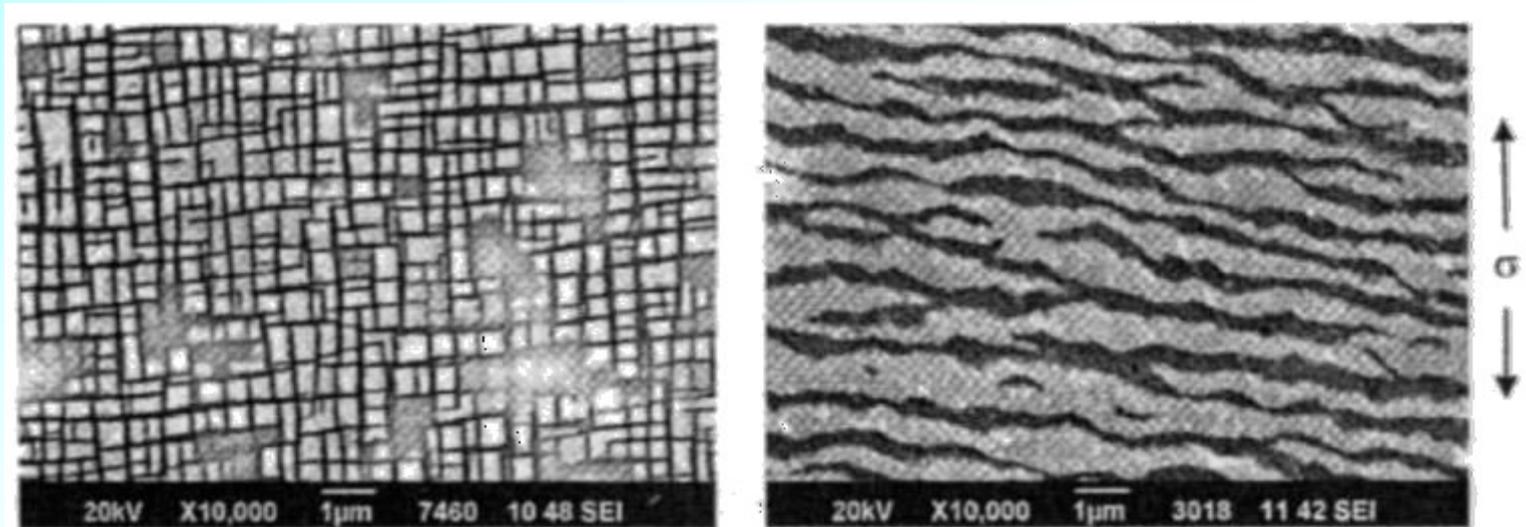
# Влияние объемной доли $\gamma'$ фазы на свойства ползучести



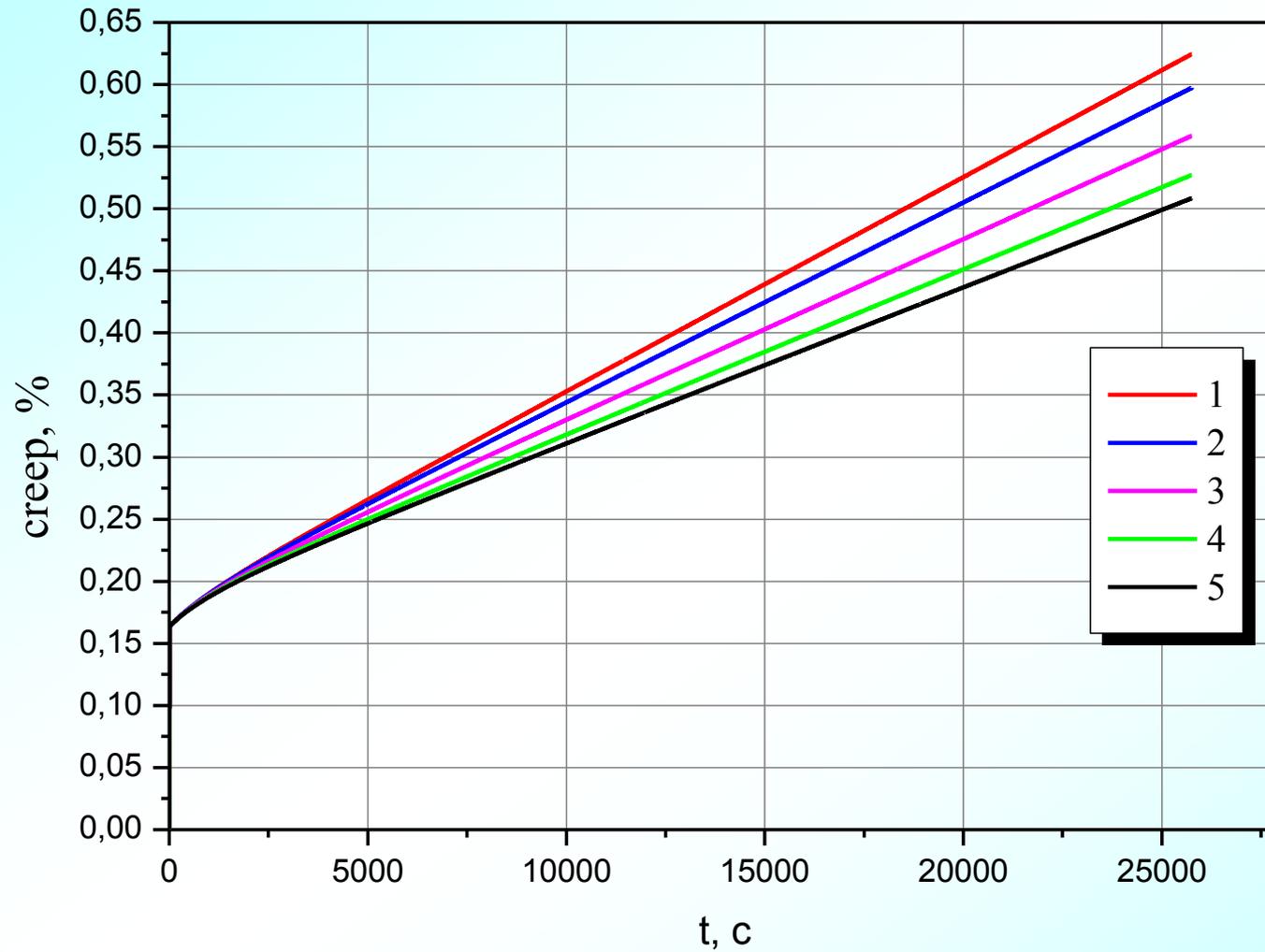


Кривые ползучести, полученные путем численного эксперимента для разных значений доли  $\gamma'$  фазы.

# Влияние рафтинга на свойства ползучести



Микроструктура монокристаллического сплава с ориентацией  $\langle 001 \rangle$  до (а) и после (б) испытаний на длительную прочность при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 320$  МПа продолжительностью 2062 ч.



# Выводы

1. Получены результаты моделирования процессов неупругого деформирования жаропрочных монокристаллических сплавов на никелевой основе при высокотемпературных термомеханических воздействиях.
2. Предложены оригинальные методы идентификации параметров модели ползучести с учетом накопления повреждений, позволяющей корректно описать третью стадию ползучести.
3. На основе методов конечно-элементной гомогенизации произведен анализ влияния фазового состава на эффективные упругие свойства, диаграмму пластического деформирования, кривые ползучести, а также исследование влияния эволюции формы  $\gamma'$ -включения, происходящей при формировании рафт-структур, на скорость ползучести.
4. Результаты проведенных исследований указали на возможность применения методов механики деформируемого тела с учетом процессов, происходящих на микроуровне, для описания неупругого деформирования и предсказания длительной прочности жаропрочных монокристаллических сплавов на никелевой основе, однако проведение подобных вычислительных экспериментов является ресурсоемким и требующим значительного объема экспериментальных данных.

## Планы на дальнейшие исследования

1. Детальный учет механизмов и особенностей формирования рафт-структуры при высоких температурах.
2. Разработка феноменологических моделей деформирования монокристаллических сплавов на никелевой основе с учетом долей  $\gamma$  и  $\gamma'$  фаз, а также их эволюции.
3. Учет кристаллографической ориентации при формулировке модели ползучести с поврежденностью.
4. Разработка и применение градиентных моделей деформирования монокристаллических сплавов на никелевой основе для учета масштабных факторов.
5. Выполнение КЭ расчетов на термоусталостную и длительную прочность охлаждаемых лопаток ТРД с применением моделей деформирования монокристаллических сплавов на никелевой основе с учетом эволюции  $\gamma$  и  $\gamma'$  фаз и масштабных эффектов.

Спасибо за внимание!