

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБЫ ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННОГО СПЛАВА НА ФОРМИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ

## Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.

Томский государственный архитектурно-строительный университет Россия, г. Томск, пл. Соляная, 3, 634002

> ХІ Международная конференция "Фазовые превращения и прочность кристаллов" (ФППК-2020)



#### Мотивация

Повышение прочностных свойств конструкционных материалов является важнейшей задачей в машиностроении. Одним из перспективных направлений в материаловедении в настоящее время является создание дисперсноупрочнённых сплавов и использование этих материалов в машиностроении, энергетике, авиационной и космической промышленности. Наноразмерные частицы способствуют упрочнению матрицы, обеспечивая сопротивление движению дислокаций в соответствии с теорией Орована. Отличительной особенностью и преимуществом сплавов с наночастицами по сравнению с армированными и слоистыми материалами является изотропия механических свойств, а также высокая пластичность и прочность.

#### Цель исследования

Целью работы является исследование воздействия однородного внешнего и внутреннего давления на напряженное состояние трубы из сплава на основе алюминия, упрочненного некогерентными наночастицами.

### Схема деформирования трубы







Уравнения равновесия:

Уравнения совместности Напряжений:

Условие упрочнения:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} \right) \right) = 0$$

$$\left. \boldsymbol{\sigma}_{rr} - \boldsymbol{\sigma}_{\varphi\varphi} \right| = \boldsymbol{\tau}_{s}(a)$$



## Упругие свойства материала

Модуль сдвига:

$$G = \begin{cases} G_0 & \text{при} \quad T < 0.06T_{\text{m}} \\ G_1 \left( 1 - \frac{T}{2T_{\text{m}}} \right) & \text{при} \quad 0.06T_{\text{m}} < T < 0.57T_{\text{m}} \end{cases}$$

T<sub>m</sub> = 933 К - температура плавления,

G<sub>1</sub>=361 ГПа - параметр, характеризующий упругие свойства алюминия.



При моделировании пластической деформации и деформационного упрочнения предполагается, что в процессе пластического сдвига дисперсно-упрочненных материалов с ГЦК матрицей, содержащих некогерентную дисперсную фазу, формируется зона сдвига и образуются следующие типы деформационных дефектов: линейные - сдвигообразующие дислокации (их плотность обозначена ρ<sub>m</sub>), призматические петли вакансионного ( $\rho_{\rho}^{\nu}$ ) и межузельного ( $\rho_{\rho}^{i}$ ) типа, дислокационные диполи вакансионного ( $\rho_{d}^{\nu}$ ) и межузельного ( $\rho_{d}^{i}$ ) типа, точечные деформационные дефекты – межузельные атомы (концентрация с<sub>i</sub>), моновакансии (концентрация с<sub>i</sub>), бивакансии (концентрация с<sub>21</sub>). Математическая модель включает уравнения баланса каждого типа дефекта, а также дополнена уравнением, определяющим скорость деформации и внешнее воздействие на деформируемый материал.

# Моделирование пластической деформации





Схема образования колец Орована и призматических петель Хирша

### Моделирование пластической деформации





#### Схема образования дислокационных диполей



$$\frac{d\rho_m}{da} = (1 - \omega_s P_{as}) \frac{F}{Db} - \frac{2}{\dot{a}} (1 - \omega_s) \rho_m^2 b \min(r_a, \rho_m^{-1/2}) (c_{2\nu} Q_{2\nu} + c_{1\nu} Q_{1\nu} + c_i Q_i) + \frac{2\alpha}{\dot{a}} b \sqrt{\rho} (\rho_p^\nu (c_{1\nu} Q_{1\nu} + c_{2\nu} Q_{2\nu}) + \rho_p^i c_i Q_i) + \frac{2b}{\dot{a}r_a} (\rho_d^i c_i Q_i + \rho_d^\nu (c_{1\nu} Q_{1\nu} + c_{2\nu} Q_{2\nu})),$$

$$\frac{d\rho_{p}^{i}}{da} = \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_{p}^{2}b} - \frac{2\alpha}{\dot{a}}\sqrt{\rho}\rho_{p}^{i}b(2c_{2\nu}Q_{2\nu} + c_{i}Q_{i} + 2c_{1\nu}Q_{1\nu})$$

,

$$\frac{d\rho_{p}^{\nu}}{da} = \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_{p}^{2}b} - \frac{2\alpha}{\dot{a}}\sqrt{\rho}\rho_{p}^{\nu}b(c_{2\nu}Q_{2\nu} + 2c_{i}Q_{i} + c_{1\nu}Q_{1\nu})$$

$$\frac{d\rho_{d}^{\nu}}{da} = \frac{1}{\Lambda_{p}b} - \frac{2b}{\dot{a}r_{a}}\rho_{d}^{\nu}(c_{2\nu}Q_{2\nu} + c_{i}Q_{i} + c_{1\nu}Q_{1\nu})$$

$$\frac{d\rho_d^i}{da} = \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{2b}{\dot{a}r_a} \rho_d^i (c_{2\nu} Q_{2\nu} + c_i Q_i + c_{1\nu} Q_{1\nu}),$$



$$\frac{dc_i}{da} = q \frac{\tau_{dyn}}{G} - \frac{c_i}{\dot{a}} [((1 - \omega_s)\rho_m + \rho_p + \rho_d)b^2 Q_i + Q_{1\nu}c_{1\nu} + Q_{2\nu}c_{2\nu} + Q_i(c_{1\nu} + c_{2\nu})],$$

$$\frac{dc_{1\nu}}{da} = \frac{q\tau_{dyn}}{6G} - \frac{1}{\dot{a}} [(((1-\omega_s)\rho_m + \rho_p + \rho_d)b^2 + c_i + c_{1\nu})Q_{1\nu}c_{1\nu} + Q_ic_ic_{1\nu} - (Q_{2\nu} + Q_i)c_ic_{2\nu}],$$

$$\frac{dc_{2\nu}}{da} = \frac{5q\tau_{dyn}}{6G} - \frac{1}{\dot{a}} \left[ \left( ((1-\omega_s)\rho_m + \rho_p + \rho_d)b^2 + c_i \right) Q_{2\nu}c_{2\nu} + Q_i c_i c_{2\nu} - Q_{1\nu} c_{1\nu}^2 \right]$$

#### Скорость деформации

$$\dot{a} = \frac{8}{\pi} \frac{v_D B \beta_r^{1/2}}{\xi^{1/6} F (1 - \beta_r)} \frac{\tau^3 (((1 - \beta_r) \rho_m + \rho_p + \rho_d) (\tau - \tau_a))^{1/3}}{G^{4/3} b^{1/3} (\tau^2 - G^2 b^2 \xi \beta_r \rho_m) \rho_m^{-1/2}} \times \exp[-\frac{0.2 G b^3 - (\tau - \tau_a) \Lambda b^2}{kT}].$$

Зависимость плотности сдвигообразующих дислокаций и



призматических петель межузельного и вакансионного типа от деформации



Диаметр частиц (нм): 1 – 10, 2 – 20; Расстояние между частицами (нм): 1 – 100, 2 – 200 ; Температура **293 К**. Зависимость плотности сдвигообразующих дислокаций и



# призматических петель межузельного и вакансионного типа от деформации



Температура 393 К.



# Зависимость плотности сдвигообразующих дислокаций и призматических петель межузельного и вакансионного типа от деформации



Диаметр частиц (нм): 1 – 10, 2 – 20; Расстояние между частицами (нм): 1 – 100, 2 – 200 ; Температура **493 К**. Зависимость сдвиговых напряжений от деформации



#### при различных температурах



*a* - T = 293 K, *б* – 393 K, *в* – 493 K. Масштабные характеристики упрочняющей фазы:  $\Lambda_p = 100$  нм,  $\delta = 10$  нм (кривая 1);  $\Lambda_p = 200$  нм,  $\delta = 20$  нм (кривая 2);

# Пластические свойства материала

Зависимость напряжений от деформаций:

$$\tau_{s} = \tau_{0} + \tau_{1} \frac{Ga - \tau_{0}}{G(a + a_{1}) - \tau_{0}}$$

#### Параметры модели

Parameters	$\Lambda_p$ =100nm, δ=10nm	$\Lambda_p$ =200nm, δ=20nm
Т=293К	$\tau_0$ =81.08MPa $\tau_1$ =139.94MPa a <sub>1</sub> =0.0437	$\tau_0$ =43.13MPa $\tau_1$ =110.13MPa a <sub>1</sub> =0.0548
Т=393К	$τ_0$ =77.06MPa T <sub>1</sub> =99.29MPa a <sub>1</sub> =0.0244	$\tau_0$ =40.73MPa $\tau_1$ =71.86MPa a <sub>1</sub> =0.0264
Т=493К	$\tau_0$ =68.83MPa $\tau_1$ =69.87MPa a <sub>1</sub> =0.0151	$\tau_0$ =36.26MPa $\tau_1$ =52.02MPa a <sub>1</sub> =0.0167





Предел упругого сопротивления

$$\Delta p < \Delta p_{\rm el} = \frac{\tau_0}{2} \left( 1 - \frac{R_{\rm in}^2}{R_{\rm ex}^2} \right)$$

Предел пластического сопротивления

$$\Delta p_{\rm pl} = \left(\tau_0 + 2\tau_1\right) \ln\left(\frac{R_{\rm ex}}{R_{\rm in}}\right) + \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2}\frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{\rm ex}^2 + Ga_2 R_{\rm in}^2}{(\tau_0 + Ga_2)R_{\rm ex}^2}\right)$$

Граница зоны пластической деформации

$$\Delta p = (\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{R_{\rm pl}}{R_{\rm in}}\right) + \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2}\frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{\rm pl}^2 + a_2 G R_{\rm in}^2}{(\tau_0 + a_2 G) R_{\rm pl}^2}\right) + \tau_0 \frac{R_{\rm ex}^2 - R_{\rm pl}^2}{2R_{\rm ex}^2}$$
$$\Delta p = |p_{\rm ex} - p_{\rm in}|$$



### Напряжения в пластической области

$$\sigma_{\rm rr} = -p_{\rm in} - \operatorname{sign}(p_{\rm ex} - p_{\rm in}) \left[ (\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{r}{R_{\rm in}}\right) + \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{a_2 G}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{\rm pl}^2 + a_2 G R_{\rm in}^2}{\tau_0 R_{\rm pl}^2 + a_2 G r^2}\right) \right]$$
  
$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\rm rr} - \tau_0 \operatorname{sign}(p_{\rm ex} - p_{\rm in}) \left(1 + \frac{\tau_1 \left(R_{\rm pl}^2 - r^2\right)}{a_2 G r^2 + \tau_0 R_{\rm pl}^2}\right) \qquad a_2 = a_1 - \frac{\tau_0}{G}$$

## Напряжения в упругой области

$$\sigma_{\rm rr} = -\frac{qR_{\rm pl}^2}{R_{\rm ex}^2 - R_{\rm pl}^2} \left(1 - \frac{R_{\rm ex}^2}{r^2}\right) - \frac{p_{\rm ex}R_{\rm ex}^2}{R_{\rm ex}^2 - R_{\rm pl}^2} \left(1 - \frac{R_{\rm pl}^2}{r^2}\right)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi} &= -\frac{qR_{\mathrm{pl}}^2}{R_{\mathrm{ex}}^2 - R_{\mathrm{pl}}^2} \left(1 + \frac{R_{\mathrm{ex}}^2}{r^2}\right) - \frac{p_{\mathrm{ex}}R_{\mathrm{ex}}^2}{R_{\mathrm{ex}}^2 - R_{\mathrm{pl}}^2} \left(1 + \frac{R_{\mathrm{pl}}^2}{r^2}\right) \\ q &= -p_{\mathrm{in}} - \mathrm{sign}\left(p_{\mathrm{ex}} - p_{\mathrm{in}}\right) \left[\left(\tau_0 + 2\tau_1\right)\ln\left(\frac{R_{\mathrm{pl}}}{R_{\mathrm{in}}}\right) + \tau_1\left(1 + \frac{1}{2}\frac{\tau_0}{Ga_2}\right)\ln\left(\frac{\tau_0 R_{\mathrm{pl}}^2 + a_2 G R_{\mathrm{in}}^2}{(\tau_0 + a_2 G) R_{\mathrm{pl}}^2}\right)\right] \end{aligned}$$



# Влияние размеров трубы на предел упругого (а) и пластического (б) сопротивления



Масштабные характеристики упрочняющей фазы:  $\Lambda_p$ = 100 нм,  $\delta$ =10нм (кр. 1–3);  $\Lambda_p$ = 200 нм,  $\delta$  = 20 нм (кр. 4–6). Температура: *1*, *4* – 293 К; *2*, *5* – 393 К; *3*, *6* – 493 К.



# Зависимость положения зоны пластической деформации от давления



 $a - R_{in} = 0.1$  м,  $R_{ex} = 0.11$  м,  $\delta - 0.1$ , 0.105, e - 0.2, 0.205; Масштабные характеристики упрочняющей фазы:  $\Lambda_p = 100$  нм,  $\delta = 10$  нм (кр. 1–3),  $\Lambda_p = 200$  нм,  $\delta = 20$  нм (кр. 4–6). Температура: 1, 4 – 293 К; 2, 5 – 393 К; 3, 6 – 493 К.



# Распределение радиального (*a*) и тангенциального (*б*) напряжений по толщине стенки трубы



 $P_{in}$ =0: 1 −  $P_{ex}$ =3.39МПа (упругая деформация Δp=0.9Δ $P_{el}$ , ); 2 − 3.77 (ξ=0 ); 3 − 4.02 (ξ=1/3); 4 − 4.21 (ξ=2/3 ); 5 − 4.41 ( ξ=1).

# Распределение радиального (а) и тангенциального

# (б) напряжений по толщине стенки трубы



 $\mathsf{P}_{\mathsf{in}} = 0.9 \Delta \mathsf{P}_{\mathsf{el}} = 3.39 \mathsf{M} \mathsf{\Pi} \mathsf{a}$ : 1 −  $\mathsf{P}_{\mathsf{ex}} = 0$  (упругая деформация  $\Delta \mathsf{p} = 0.9 \Delta \mathsf{P}_{\mathsf{el}}$ , ); 2 − 6.78 МПа (упругая деформация  $\Delta \mathsf{p} = 0.9 \Delta \mathsf{P}_{\mathsf{el}}$ , ); 3 − 7.16 (ξ=0 ); 4 − 7.42 (ξ=1/3); 5 − 7.61 (ξ=2/3 ); 6 − 7.78 ( ξ=1).



# Распределение радиального (*a*) и тангенциального (*б*) напряжений по толщине стенки трубы



 $P_{in}$ =Δ $P_{el}$ =3.77МПа : 1 –  $P_{ex}$ =0 (ξ=0 ); 2 – 0.38 (упругая деформация Δр=0.9Δ $P_{el}$ , ); 3 – 7.16 (упругая деформация Δр=0.9Δ $P_{el}$ , ); 4 – 7.54 (ξ=0 ); 5 – 7.78(ξ=1/3); 6 – 7.98 (ξ=2/3); 7 – 8.16 ( ξ=1).



# Распределение радиального (*a*) и тангенциального (*б*) напряжений по толщине стенки трубы



 $\mathsf{P}_{\mathsf{in}} = \Delta \mathsf{P}_{\mathsf{pl}} = 4.41 \mathsf{M} \mathsf{\Pi} \mathsf{a}$ : 1 −  $\mathsf{P}_{\mathsf{ex}} = 0$  (  $\xi = 1$ ); 2 − 0.2 ( $\xi = 2/3$ ); 3 − 0.4 ( $\xi = 1/3$ ); 4 − 0.64 ( $\xi = 0$ ); 5 − 1.02 (упругая деформация  $\Delta \mathsf{p} = 0.9 \Delta \mathsf{P}_{\mathsf{el}}$ , ); 6 − 7.81 (упругая деформация  $\Delta \mathsf{p} = 0.9 \Delta \mathsf{P}_{\mathsf{el}}$ , ); 7 − 8.18 ( $\xi = 0$ ); 8 − 8.43 ( $\xi = 1/3$ ); 9 − 8.63 ( $\xi = 2/3$ ); 10 − 8.82(  $\xi = 1$ ).

## Распределение плотности сдвигообразующих дислокаций (а) и призматических дислокационных петель (б) по толщине стенки трубы:

. UTILITAS.



Масштабные характеристики упрочняющей фазы:

 $\Lambda_p$ =40нм,  $\delta$ =20нм (кривая 1);  $\Lambda_p$ =40нм,  $\delta$ =10нм (кривая 2);  $\Lambda_p$ =100нм,  $\delta$ =20нм (кривая 3);  $\Lambda_p$ =100нм,  $\delta$ =10нм (кривая 4).

# выводы



- С увеличением относительной толщины стенки переход от упругой деформации к пластической, а также пластическая деформация по всей толщине трубы происходят при большей разности внешнего и внутреннего давлений. Уменьшение расстояния между частицами вызывает упрочнение материала, приводящее к росту предела упругого и пластического сопротивления.
- 2. С увеличением температуры деформации граница, разделяющая упругую и пластическую области, смещается к внешней стенке трубы.
- 3. Одному и тому же положению зоны пластической деформации соответствуют два различных случая напряженного состояния стенок трубы. Если величина внутреннего давления меньше внешнего, напряженное состояние характеризуется сжатием стенок трубы в тангенциальном направлении. Если величина внутреннего давления больше внешнего, то в стенке трубы возникают тангенциальные напряжения растяжения.
- 4. Генерация сдвигообразующих дислокаций и призматических дислокационных петель с ростом давления приводит к утолщению области пластической деформации и смещению к внешней стенке.