

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТРУБЫ ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, НАГРУЖЕННОЙ ВНЕШНИМ И ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

Матвиенко О.В.^{1,2}, Данейко О.И.², Ковалевская Т.А.²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия, E-mail: matvolegv@mail.ru

Повышение прочностных свойств конструкционных материалов является важнейшей задачей в машиностроении. Одним из перспективных направлений в материаловедении в настоящее время является создание дисперсно-упрочнённых материалов и использование их в машиностроении, энергетике, автомобилестроении, авиационной и космической промышленности.

Дисперсно-упрочненные сплавы представляют собой материал, в матрице которого равномерно распределены мелкодисперсные субмикронные и наноразмерные частицы другого вещества. В таких материалах большую часть нагрузки принимает на себя матрица, в которой благодаря большому количеству практически не растворяющихся в ней частиц второй фазы создается структура, сопротивляющаяся пластической деформации [1]. Особый интерес представляют композиты на основе алюминия, упрочненные наноразмерными частицами.

В современной энергетике в качестве элементов теплообменных аппаратов широко применяются трубы, которые в процессе эксплуатации оказываются нагруженными внутренним и внешним давлением. Для определения надежности работы теплообменных аппаратов необходима информация о напряжениях и деформациях, возникающих в стенках теплообменных труб в результате приложенного давления [2].

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние трубы из дисперсно-упрочнённого алюминиевого сплава, нагруженной равномерным внутренним p_{in} и внешним p_{ex} давлением (рис. 1).

Для описания температурной зависимости модуля сдвига матрицы G можно использовать формулу Белла:

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

Здесь $T_M = 933 \text{ K}$ – температура плавления, $G_0 = 35.017 \text{ МПа}$, $G_1 = 36.1 \text{ МПа}$ – параметры, характеризующие упругие свойства алюминия.

Зависимость предельного напряжения сдвига от степени деформации дисперсно-упрочнённого алюминиевого сплава, полученная в результате численных расчетов уравнений баланса элементов деформационной дефектной среды [3], имеет вид:

$$\tau_s = \tau_0 + \tau_1 \frac{(a - \tau_0/G)}{(a_1 - \tau_0/G) + a}, \quad (2)$$

где τ_0 , τ_1 , a_1 – параметры, определяющие свойства материала, значения которых для различных размеров упрочняющих частиц δ , а также расстояний между частицами Λ_p представлены в табл. 1.

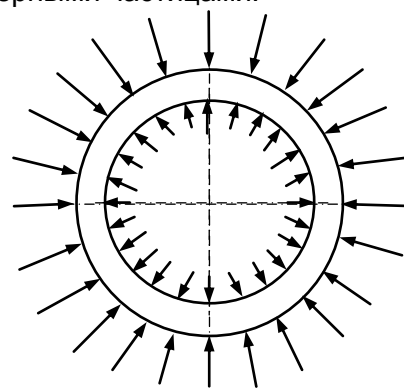


Рисунок 1 - Схема деформирования трубы

Таблица 1 - Параметры в зависимости (1).

Параметры	$T = 293 \text{ K}$	$T = 393 \text{ K}$	$T = 493 \text{ K}$
$\Lambda_p = 100 \text{ нм}$ $\delta = 10 \text{ нм}$	$\tau_0 = 81.08 \text{ МПа}$ $\tau_1 = 139.94 \text{ МПа}$ $a_1 = 0.0437$	$\tau_0 = 77.06 \text{ МПа}$ $\tau_1 = 99.29 \text{ МПа}$ $a_1 = 0.0244$	$\tau_0 = 68.83 \text{ МПа}$ $\tau_1 = 69.87 \text{ МПа}$ $a_1 = 0.0151$
$\Lambda_p = 200 \text{ нм}$ $\delta = 20 \text{ нм}$	$\tau_0 = 43.13 \text{ МПа}$ $\tau_1 = 110.13 \text{ МПа}$ $a_1 = 0.0548$	$\tau_0 = 40.73 \text{ МПа}$ $\tau_1 = 71.86 \text{ МПа}$ $a_1 = 0.0264$	$\tau_0 = 36.26 \text{ МПа}$ $\tau_1 = 52.02 \text{ МПа}$ $a_1 = 0.0167$

Известно, что поперечные сечения длинной трубы, удаленные от торцов в случае приложения нагрузки в радиальном направлении, будут оставаться плоскими. С учетом осевой симметрии уравнение равновесия, описывающее баланс напряжений в радиальном направлении, примет вид:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) содержит две неизвестные величины: компоненты тензора напряжений σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$. Дополнительное соотношение для упругой деформации можно получить с помощью уравнения совместности напряжений, которое в случае плоской осесимметричной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} (\sigma_r + \sigma_{\varphi\varphi}) \right) = 0. \quad (4)$$

При пластической деформации упрочняющейся среды дополнительным условием, связывающим компоненты тензора напряжений, является условие пластического упрочнения [2]:

$$|\sigma_r - \sigma_{\varphi\varphi}| = \tau_s(a). \quad (5)$$

Решение уравнения равновесия (3) вместе с уравнением совместности напряжений (4) позволяет определить напряжения в стенках трубы в упругой области ($R_{pl} \leq r \leq R_{ex}$, R_{pl} – радиальная координата границы между зонами упругого и пластического деформирования) с помощью следующих зависимостей:

$$\sigma_r = \frac{p_{in} R_{in}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} \left(1 - \frac{R_{ex}^2}{r^2} \right) - \frac{p_{ex} R_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} \left(1 - \frac{R_{in}^2}{r^2} \right),$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{p_{in} R_{in}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} \left(1 + \frac{R_{ex}^2}{r^2} \right) - \frac{p_{ex} R_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} \left(1 + \frac{R_{in}^2}{r^2} \right).$$

Распределение напряжений в пластической области ($R_{in} \leq r \leq R_{pl}$) с учетом условия (5) имеет вид:

$$\sigma_r = -p_{in} - \text{sign}(p_{ex} - p_{in}) \left[(\tau_0 + 2\tau_1) \ln \left(\frac{r}{R_{in}} \right) + \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2} \right) \ln \left(\frac{\tau_0 R_{ex}^2 + a_2 R_{in}^2}{\tau_0 R_{ex}^2 + a_2 Gr^2} \right) \right],$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_r - \tau_0 \text{sign}(p_{ex} - p_{in}) \left(1 + \frac{\tau_1 (R_{ex}^2 - r^2)}{a_2 Gr^2 + \tau_0 R_{ex}^2} \right).$$

Деформация стенок трубы является упругой, если величина приложенного давления меньше предела упругого сопротивления:

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

Когда величина приложенного давления достигает предела пластического сопротивления трубы, весь материал по толщине трубы перейдет в пластическое состояние. Таким образом, предел пластического сопротивления равен

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

Максимальные деформации возникают вблизи внутренней стенки трубы, в области максимальных сжимающих напряжений. Деформация материала уменьшается по мере приближения к внешней стенке трубы. На границе раздела между зоной упругой и пластической деформации степень деформации определяется максимальной величиной упругой деформации, т.е. $a = \tau_0/G$. С увеличением размеров частиц наблюдается рост предела упругого и пластического сопротивления трубы, тем более значительный, чем меньше расстояние между частицами (при одной и той же объемной доле). Для малой объемной доли упрочняющих частиц различие значения предела упругого и пластического сопротивления мало. Это означает, что при незначительном увеличении Δp большая часть стенки трубы перейдет в пластическое состояние. Влияние температуры деформации на прочностные свойства материала иллюстрирует рис. 2. С ростом температуры материал становится более пластичным. Это приводит к уменьшению пределов упругого и пластического сопротивления.

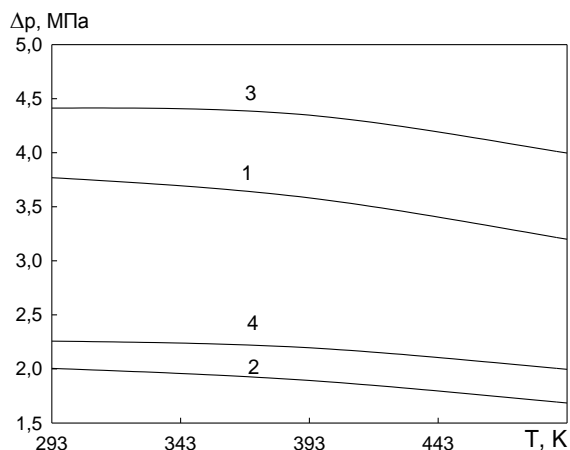


Рисунок 2 - Предел упругого (кривые 1, 2) и пластического (кривые 3, 4) сопротивления; $\Lambda_p = 100$ нм, $\delta = 10$ нм (кривые 1, 3), $\Lambda_p = 200$ нм, $\delta = 20$ нм (кривые 2, 4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые материалы. Под научной редакцией Ю. С. Карабасова – М: МИССИС – 2002 – 736 с.
2. Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А. Исследование пластической деформации толстостенной трубы из сплава, упрочненного некогерентными наночастицами // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 35-45.
3. Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A., Kolupaeva S.N., Kulaeva N.A., Semenov M.E. Influence of the temperature and strain rate on the evolution of the dislocation structure of a dispersion-hardened material with FCC matrix // Russian Physics Journal. – 2012. – V. 54. – No. 9. – pp. 989-993.