

Деформирование слоистых элементов конструкций в термо-радиационном поле

А. В. Яровая

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Рассмотрено влияние нейтронного облучения на деформирование вязкоупругопластических слоистых элементов конструкций при термословом воздействии. Предложена общая постановка краевой задачи. Приведено численное решение для трехслойного металлополимерного стержня.

Ключевые слова: деформация, нейтронный поток, краевая задача, трех-слойный стержень.

Обозначения

$\varphi(z)$	– интенсивность потока нейтронов
μ	– макроскопическое эффективное сечение
σ_0	– эффективное сечение, отнесенное к одному ядру
n_0	– число ядер в 1 см ³
A_0	– число Авогадро
ρ	– плотность
A	– атомный вес
$I(z, t)$	– интегральный поток
θ_I	– объемная деформация за счет нейтронного воздействия
B	– константа, получаемая из эксперимента
$\Gamma(t), R(t)$	– ядра ползучести и релаксации необлученного материала
$g(\varphi), q(\varphi)$	– экспериментально определяемые функции материала
t	– время
s_{ij}	– девиатор тензора напряжений σ_{ij}
e_{ij}	– девиатор тензора деформаций ε_{ij}
$\sigma = \sigma_{kk}/3$	– среднее (гидростатическое) напряжение
$\theta = \varepsilon_{kk}$	– объемная деформация
δ_{ij}	– символы Кронекера
G, K	– модули сдвига и объемного деформирования
α_0	– коэффициент линейного температурного удлинения
$f_1(\varepsilon_{ii}, T, I)$	– функция пластичности
ε_{ii}	– интенсивность деформаций
T	– приращение температуры
$f_2(\varepsilon_{ii}, T)$	– универсальная функция физической нелинейности
σ_T	– предел текучести
$\varepsilon_T(T, I)$	– предел текучести по деформациям
$\varepsilon_{ii0}(T)$	– предел физической нелинейности

$F_{ik}(x, t)$	–	объемные силы
$R_{ik}(x, t)$	–	поверхностные силы
q_i	–	интенсивность теплового потока
$u_i^{(k)}(x, t)$	–	перемещения
$S^{(k)}$	–	поверхность тела
$S_u^{(k)}$	–	поверхность, на которой заданы перемещения
$S_\sigma^{(k)}$	–	поверхность, на которой заданы напряжения

Введение. Ранее [1–4] были рассмотрены задачи квазистатического термосилового и динамического нагружения трехслойных элементов конструкций. В настоящей работе изучается деформирование подобных слоистых тел под действием внешних квазистатических тепловых, радиационных и силовых нагрузок. При этом деформации – малые.

Нейтронное облучение твердых тел сопровождается возникновением дополнительной объемной деформации и радиационным упрочнением материала [5], которое приводит к уменьшению скорости движения дислокаций и замедлению ползучести. Однако увеличивающееся при этом количество точечных дефектов способствует гораздо большему повышению скорости ползучести. Например, ползучесть урана усиливается в 50–100 раз [6].

Рассмотрим начально-однородное изотропное тело, занимающее полупространство $z \geq 0$. Если на границу, координата которой $z = 0$, параллельно оси z падают нейтроны с одинаковой средней энергией и интенсивностью $\varphi_0 = \text{const}$, то интенсивность потока нейтронов, доходящих до плоскости тела с координатой $z = \text{const}$, будет [5]

$$\varphi(z) = \varphi_0 e^{-\mu z}. \quad (1)$$

Величиной μ обозначим макроскопическое эффективное сечение. Для любого химического элемента $\mu = \sigma n_0 = \sigma A_0 \rho / A$ и имеет порядок см^{-1} , где σ – эффективное сечение, отнесенное к одному ядру; n_0 – число ядер в 1 см^3 ; A_0 – число Авогадро; ρ – плотность; A – атомный вес.

Поскольку φ_0 не зависит от времени, то в соответствии с (1) к моменту времени t через сечение z пройдет интегральный поток

$$I(z, t) = \varphi_0 t e^{-\mu z}. \quad (2)$$

В первом приближении можно считать, что изменение объема вещества прямо пропорционально интегральному потоку $I(z, t)$, и, значит, $\theta_I = BI(z, t)$, где B – константа, получаемая экспериментально [5]. Величина $I_0 = \varphi_0 t$ дает суммарный поток нейтронов на единицу площади поверхности тела. В реакторах φ_0 имеет порядок $10^{17} \dots 10^{18}$ нейтр/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [5], I_0 достигает значений $10^{23} \dots 10^{27}$ нейтр/ м^2 , а объемная деформация θ_I может быть порядка 0,1. Следовательно, в зависимости от энергии нейтронов и облучаемого материала константа B может быть порядка $10^{-28} \dots 10^{-24}$ $\text{м}^2/\text{нейтр}$.

Результаты экспериментов показали, что при облучении параметры упругости материала изменяются незначительно, в то время как пределы прочности и текучести весьма чувствительны к изменению. Для однородных тел с плоской границей число нейтронов, проходящих за время t под этой границей через плоскость с координатой z , определяется формулой (2), поэтому предел текучести будет переменным по толщине. На поверхности тела ($z = 0$) влияние радиации на предел текучести σ_T вполне удовлетворительно описывается формулой радиационного упрочнения [7]. На глубине z эта формула принимает вид

$$\sigma_T = \sigma_{T0} [1 + C(1 - \exp(-\xi I))^{1/2}], \quad (3)$$

где σ_{T0} – предел текучести необлученного материала; C, ξ – константы материала, получаемые из эксперимента. Например, для алюминиевого сплава 356: $C = 1,09$; $\xi = 9,73 \cdot 10^{-26} \text{ м}^2/\text{нейтр}$.

О точности аппроксимации можно судить по рис. 1, где темные точки – данные эксперимента, сплошная линия – расчет по формуле (3).

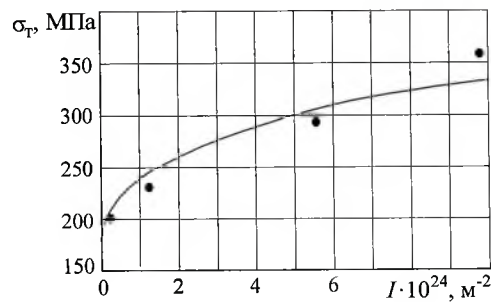


Рис. 1. Зависимость предела текучести σ_T от величины нейтронного потока I .

Информация о ползучести недеформирующихся материалов в условиях радиационного облучения весьма ограничена. Это связано с трудностями проведения экспериментов по измерению малых деформаций в условиях облучения в реакторе. На рис. 2 показаны кривые ползучести $\varepsilon_{12} \sim t$ циркониевого сплава “Циркалой-2” [6], полученные в лабораторных условиях (1) и при облучении в реакторе интенсивностью $\varphi_0 = 5 \cdot 10^{16} \text{ нейтр}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (2). Напряжение во время испытаний $\sigma_{12} = 140 \text{ МПа}$, температура $T = 573 \text{ К}$. Перегибы на кривых, отмеченные крестиками, соответствуют кратковременным изменениям температуры.

Вдоль кривых ползучести будут справедливы следующие соотношения:

$$2G\varepsilon_{12}(t) = \sigma_{12} \left(1 + g(\varphi_0) \int_0^t \Gamma(t - \tau) d\tau \right), \quad (4)$$

где G – модуль сдвига; $g(\varphi_0)$ – экспериментально определяемая функция материала; $\Gamma(t)$ – ядро ползучести необлученного материала; t – время.

Применяя соотношение (4) к кривым на рис. 2 и усредняя по времени, получаем

$$g(\varphi_0) = \frac{\varepsilon_{12}^{(2)} - \sigma_{12}/2G}{\varepsilon_{12}^{(1)} - \sigma_{12}/2G} = \frac{\varepsilon_{12}^{(2)} - \varepsilon_{12}(0)}{\varepsilon_{12}^{(1)} - \varepsilon_{12}(0)} \approx 1,18, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{12}(0)$ – мгновенное значение деформации; верхний индекс соответствует номеру кривой.

Следовательно, в результате нейтронного облучения вязкие свойства рассматриваемого материала увеличились на 18%. Соответствующая расчетная кривая показана на рис. 2 штриховой линией.

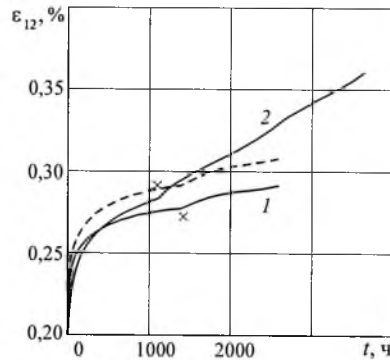


Рис. 2. Кривые ползучести циркониевого сплава "Циркалой-2".

Наряду с явлением ускоренной ползучести под облучением наблюдается также ускоренная релаксация напряжений в материалах.

Постановка краевой задачи. Пусть при $t \geq 0$ происходит процесс нагружения поверхностными $R_{ik}(x, t)$ и объемными $F_{ik}(x, t)$ силами плоского слоистого неоднородного вязкоупругопластического тела и одновременно перпендикулярно к поверхности на него падают постоянные во времени тепловой q_t и нейтронный φ_0 потоки. Температура $T_k(z, t)$ в k -м слое вычисляется по известной формуле [1, 7], интегральный нейтронный поток во внешнем слое $I_1(z, t)$ – по формуле (2).

Предполагается, что при таком воздействии в слоях появляются области линейных и нелинейных деформаций. Возникающие в слоях тела напряжения $\sigma_{ij}^{(k)}(x, t)$, деформации $\varepsilon_{ij}^{(k)}(x, t)$ и перемещения $u_i^{(k)}(x, t)$ удовлетворяют дифференциальным уравнениям равновесия, граничным условиям на поверхности тела $S^{(k)} = S_u^{(k)} + S_\sigma^{(k)}$ и соотношениям Коши:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}^{(k)} + \rho F_{ik} &= 0; & \sigma_{ij}^{(k)} l_j &= R_{ik} & \text{на } S_\sigma^{(k)}; \\ u_i^{(k)} &= u_{0i}^{(k)} & \text{на } S_u^{(k)}; & & 2\varepsilon_{ij}^{(k)} = u_{i,j}^{(k)} + u_{j,i}^{(k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

(Здесь и далее запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.)

В зонах полной физической нелинейности материала справедливы физические уравнения состояния:

$$\begin{aligned} s_{ij}^{(k)} &= 2G_k(T_k)(f_1^{(k)}(\varepsilon_{ii}^{(k)}, T_k, I)e_{ij}^{(k)} - \\ &\quad - q_k(\varphi) \int_0^t R_k(t-\tau) f_2^{(k)}(\varepsilon_{ii}^{(k)}, T_k) e_{ij}^{(k)}(\tau) d\tau); \\ \sigma^{(k)} &= K_k(T_k)(\theta^{(k)} - 3\alpha_{0k}T_k - B_k I_k), \end{aligned} \quad (7)$$

где $s_{ij}^{(k)}$, $e_{ij}^{(k)}$ – девиаторы тензоров напряжений и деформаций; σ – среднее напряжение; θ – объемная деформация; G_k , K_k – температурно-зависимые модули сдвига и объемного деформирования; $q_k(\varphi)$ – функция, соответствующая $g(\varphi)$ и учитывающая влияние интенсивности нейтронного потока на процесс релаксации напряжений; $R_k(t)$ – ядро релаксации; α_{0k} – коэффициент линейного температурного удлинения; $f_1^{(k)}(\varepsilon_{ii}^{(k)}, T, I)$ – функция пластичности; $\varepsilon_{ii}^{(k)}$ – интенсивность тензора деформаций; $f_2(\varepsilon_{ii}, T)$ – универсальная функция физической нелинейности материала; k – номер слоя. При этом следует положить $f_1^{(k)}(\varepsilon_{ii}^{(k)}, T_k, I) = 1$, если $\varepsilon_{ii}^{(k)} \leq \varepsilon_T^{(k)}(T_k, I)$, и $f_2^{(k)}(\varepsilon_{ii}^{(k)}, T_k) = 1$, если $\varepsilon_{ii}^{(k)} \leq \varepsilon_{и0}^{(k)}(T_k)$; $\varepsilon_T^{(k)}(T, I)$ – предел текучести по деформациям; $\varepsilon_{и0}^{(k)}(T)$ – предел нелинейной ползучести. Для определенности принимаем $\varepsilon_T^{(k)}(T_k, I) > \varepsilon_{и0}^{(k)}(T_k)$, т.е. появлению пластической деформации предшествует физически нелинейная ползучесть.

В слоях тела могут возникать области деформирования, в которых ползучесть уже физически нелинейная, а пластических деформаций еще нет ($\varepsilon_{и0}^{(k)} \leq \varepsilon_{ii}^{(k)} \leq \varepsilon_T^{(k)}$, частичная нелинейность), и выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} s_{ij}^{(k)} &= 2G_k(T_k) \left(e_{ij}^{(k)} - q_k(\varphi) \int_0^t R_k(t-\tau) f_2^{(k)}(\varepsilon_{ii}^{(k)}, T_k) e_{ij}^{(k)}(\tau) d\tau \right); \\ \sigma^{(k)} &= K_k(T_k)(\theta^{(k)} - 3\alpha_{0k}T_k - B_k I_k). \end{aligned} \quad (8)$$

В теле также могут сохраняться зоны с физически линейным состоянием ($\varepsilon_{ii}^{(k)} \leq \varepsilon_{и0}^{(k)}$):

$$\begin{aligned} s_{ij}^{(k)} &= 2G_k(T_k) \left(e_{ij}^{(k)} - q_k(\varphi) \int_0^t R_k(t-\tau) e_{ij}^{(k)}(\tau) d\tau \right); \\ \sigma^{(k)} &= K_k(T_k)(\theta^{(k)} - 3\alpha_{0k}T_k - B_k I_k). \end{aligned} \quad (9)$$

На границах указанных областей должны выполняться соответствующие условия: $f_1^{(k)}(\varepsilon_T^{(k)}, T_k, I) = 1$ и $f_2^{(k)}(\varepsilon_{и0}^{(k)}, T_k) = 1$, поскольку уравне-

ния состояния (7)–(9) переходят одни в другие непрерывно. Таким образом, краевая задача (6)–(9) замкнута.

Пример. Рассматривается симметричный по толщине трехслойный стержень, наружные несущие слои которого выполнены из металла, а в качестве несжимаемого по толщине заполнителя используется полимер. Для описания кинематики пакета приняты гипотезы ломаной линии: в несущих слоях справедливы гипотезы Кирхгофа; в заполнителе нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(x)$, где x – координата вдоль осевой линии стержня. Напряжения, деформации и перемещения в слоях стержня удовлетворяют соотношениям (6)–(9).

Дополнительно предполагается, что температура $T_k(t)$ усреднена по толщине k -го слоя, а интенсивность φ_0 – по толщине первого слоя, в котором и реализуется весь нейтронный поток.

Аналитическое решение соответствующей задачи теории упругости при равномерно распределенной нагрузке приведено в [1]. Там же содержатся формулы рекуррентного решения задачи о нагружении рассматриваемого вязкоупругопластического стержня из естественного недеформированного состояния в температурном поле, т.е. с исходными нулевыми напряжениями и деформациями. В нашем случае внешний вид решения такой же, необходимо лишь учитывать влияние нейтронного облучения на пределы текучести и ядра релаксации материалов слоев, а также к объемной температурной деформации добавить величину $B_k I_k$.

При численном исследовании изгиба трехслойного стержня в качестве материала несущих слоев использовался алюминиевый сплав Д16Т, заполнителем служил фторопласт. Соответствующие механические характеристики материалов, включая функции пластичности и нелинейного деформирования, приведены в [7]. Нагрузка считалась равномерно распределенной по внешней поверхности трехслойного консольно закрепленного стержня. Ее величина, интенсивности теплового и нейтронного ($I_1 = 1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$) потоков, время их воздействия ($t_1 = 60$ мин) и геометрические параметры стержня подбирались таким образом, чтобы нелинейные, теплофизические и реономные свойства материалов проявились в достаточной степени. На внешней поверхности стержня температура не превышала 526 К, что позволило рассчитывать изменение упругих параметров по известной линейной формуле Белла, которая вместе с формулами, описывающими зависимости пределов текучести и физической нелинейности от температуры, приведены в [7].

Нейтронное воздействие моделировалось увеличением предела текучести на 20% и ускорением релаксации в соответствии с (5) на 18% во внешнем слое ($q_1 = 1,18$), в котором предполагалась реализация всего потока.

На рис. 3 показаны прогиб w и относительный сдвиг ψ в заполнителе, рассчитанные по различным физическим уравнениям состояния.

Учет упругопластических свойств сплава Д16Т и мгновенной нелинейности фторопласта приводит к повышению упругого расчетного прогиба на 10%. Заметим, что степень повышения может быть значительно больше, если увеличить силовую нагрузку, однако возникает опасность выхода за рамки теории малых упругопластических деформаций при наложении тем-

пературного поля. При совместном термосиловом нагружении в течение времени t_1 прогиб вязкоупругопластического стержня составил 197% упругого. Относительный сдвиг в заполнителе увеличился соответственно на 28%. При учете радиационного упрочнения материала прогиб уменьшился на 8%, сдвиг в заполнителе – на 6%. Влияние нейтронного потока на вязкость материала приводит к увеличению прогиба на 12%, сдвига на 8%.

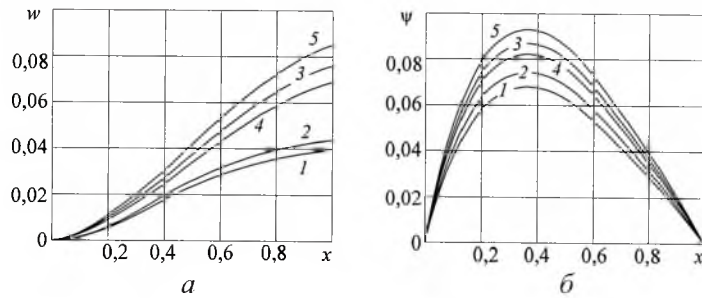


Рис. 3. Перемещения в трехслойном стержне, рассчитанные по различным физическим уравнениям состояния: 1 – упругий стержень; 2 – упругопластический; 3 – вязкоупругопластический в температурном поле; 4 – вязкоупругопластический в температурном поле с учетом радиационного упрочнения (без радиационной ползучести); 5 – вязкоупругопластический в температурном поле с учетом радиационного упрочнения и ползучести.

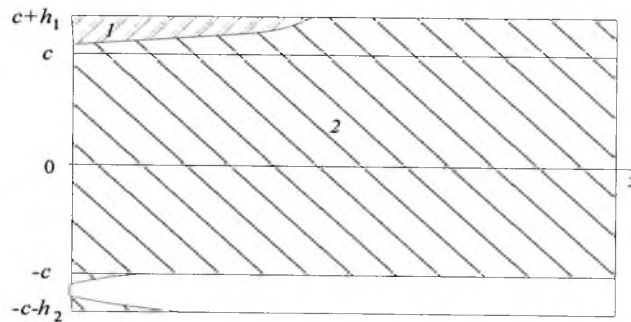


Рис. 4. Распределение зон пластических (1) и физически нелинейных (2) деформаций в продольном сечении трехслойного стержня.

На рис. 4 показано распределение зон пластических и физически нелинейных деформаций в продольном сечении трехслойного стержня при термосиловом нагружении. В начальный момент нагружения почти весь стержень деформируется упруго. Через 60 мин вследствие повышения температуры весь верхний слой, заполнитель и часть нижнего слоя переходят в физически нелинейное состояние. Поскольку область пластических деформаций невелика, влияние радиационной ползучести проявляется в большей степени, чем радиационное упрочнение материала.

Выводы

1. Предложенная модель деформирования слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций позволяет учитывать влияние температурного и нейтронного потоков на механические характеристики материалов слоев.

2. Воздействие терморadiационного поля вносит существенные изменения в деформированное состояние трехслойных стержней.

Резюме

Розглянуто вплив нейтронного опромінення на деформування в'язкопружно-пластичних шаруватих елементів конструкцій при термосиловому діянні. Запропоновано загальну постановку крайової задачі. Наведено числовий розв'язок для тришарового металополімерного стрижня.

1. Старовойтов Э. И., Яровая А. В. Напряженно-деформированное состояние трехслойного металлополимерного стержня // Пробл. прочности. – 1998. – № 3. – С. 114 – 123.
2. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Яровая А. В. Колебания круглой линейно-вязкоупругой трехслойной пластинки // Там же. – 2001. – № 3. – С. 100 – 107.
3. Старовойтов Э. И., Яровая А. В., Леоненко Д. В. Колебания круговых трехслойных пластин под действием распределенных локальных нагрузок // Там же. – 2002. – № 5. – С. 70 – 79.
4. Старовойтов Э. И., Леоненко Д. В., Яровая А. В. Колебания круглых трехслойных пластин под действием поверхностных нагрузок различных форм // Там же. – 2003. – № 4. – С. 32 – 39.
5. Ильюшин А. А., Огибалов П. М. Упругопластические деформации полых цилиндров. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 224 с.
6. Платонов П. А. Действие облучения на структуру и свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 40 с.
7. Старовойтов Э. И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости. – Гомель: Бел. гос. ун-т транспорта, 2001. – 344 с.

Поступила 19. 05. 2003