

Отрицательные напряжения при $t = 0,173$ с можно объяснить «выдавливани-ем» материала в зоне, находящейся непосредственно перед плазменной струей, в результате увеличения объема материала непосредственно в месте нагрева.

Полученные результаты нестационарного температурного и структурного анализа могут быть непосредственно использованы для определения оптимальных режимов работы плазмотронов и других высококонцентрированных источников нагрева, позволяющих проводить поверхностную обработку металлоизделий высокотемпературной плазменной струей.

УДК 539.3+621.039.54

НДС НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ОБЛУЧЕНИИ

Ширвель П.И., Чигарев А.В.

Белорусский национальный технический университет,

Минск, Республика Беларусь

Вопросы моделирования процессов деформирования сплошных сред в условиях сложных техногенных воздействий рассмотрены в [1–4], но при этом в них не в полной мере учитывались все особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) при таких условиях нагружения. В некоторых случаях (осесимметричный нагрев) при определении НДС оправдано использование одномерной осесимметричной модели цилиндрических тел. Однако воздействие неоднородного в окружном направлении температурного поля в условиях интенсивного облучения высокоэнергетическими частицами неизбежно приводит к появлению дополнительных напряжений. Таким образом, компоненты тензора деформаций, тензора напряжений и вектора перемещений будут зависеть как от радиальной, так и от окружной координат материальных точек тела. В таком случае необходимо рассматривать неосесимметричное НДС, под которым подразумевается зависимость характеристик деформирования не только от радиуса, но и от меридионального угла (т.е. в плоскостях, проходящих через ось вращения, не возникает одинаковое напряженное и деформированное состояние для текущей радиальной координаты).

В настоящей работе рассматривается неосесимметричное НДС массивного цилиндрического тела, осевое сечение которого образует ограниченную связанную область с кусочно-гладкой границей. Считается, что для любого осевого сечения цилиндра характерно неоднородное распределение температуры $T(r, \theta)$, напряжений $\sigma_{ij}(r, \theta)$ и деформаций $\epsilon_{ij}(r, \theta)$, $i, j = r, \theta, z$. Цилиндрическое тело находится в условиях обобщенной плоской деформации ($\epsilon_{zz} = \text{const}$), а все осредненные параметры и константы (свойства материалов, температура, скорость пото-

ка высокоэнергетических частиц и т.п.) не изменяются со временем. Также предполагаем, что процесс деформирования не оказывает существенного влияния на температурное поле тела, т.е. рассматривается несвязанная задача, решаемая в квазистатической постановке в предположении, что процессы нагрева, механического нагружения и облучения протекают настолько медленно, что в каждый отдельный момент времени объект исследования находится в равновесном состоянии. На рис. 1 изображена схема деформирования сплошной цилиндрической области под действием внешнего равномерного давления $P_{ext}(t)$, находящейся в стационарном неосесимметричном поле температур $T(r, \theta)$ и подверженной облучению потоком быстрых нейтронов ($\bar{E} > 0.1$ МэВ) суммарным флюенсом $\Phi(t)$. Распределение флюенса нейтронов по сечению описывается эмпирическими соотношениями, установленными на основе экспериментальных данных [4], температура определяется на основе решения задачи теплообмена с окружающей средой. Для описания процессов ползучести используем соотношения теории течения, обобщенные на общий случай радиационного облучения Ю.И. Лихачевым [1]. Таким образом, деформации терморadiационной ползучести, определяемые температурно-радиационными условиями и временем пребывания в этих условиях, подчиняются общим соотношениям, предполагающих пропорциональность компонент девиаторов напряжений и скоростей деформаций [2].

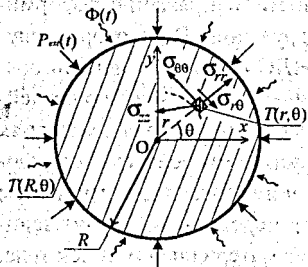


Рисунок 1 – Общая схема неосесимметричного НДС

Принятые допущения позволяют разработать соответствующую механико-математическую модель для решения поставленной задачи, которая заключается в определении НДС длинных тел, неравномерно нагретых в радиальном и окружном направлении, с учетом влияния облучения и физически нелинейных эффектов поведения материала. Общая задача определения неосесимметричного НДС состоит в том, чтобы отыскать 10 функций (компоненты вектора перемещений, тензора напряжений и тензора деформаций), причем таких,

чтобы они удовлетворяли дифференциальным уравнениям равновесия, а также физическим и геометрическим соотношениям, а на всех точках граничной поверхности – граничным условиям.

В соответствии с вышесказанным, получены дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях, описывающие неосесимметричное НДС цилиндрических тел при ползучести и облучении [5]. Принимая за искомые функции $u(r, \theta)$ и $v(r, \theta)$, дальнейшее решение задачи сводится к интегрированию системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами относительно перемещений. Разрешающая система дифференциальных уравнений записана в окончательном виде как

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{2r^2(1-\mu)} \left((1-2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + r \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r \partial \theta} - (3-4\mu) \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \right) = \right. \\
 & = \frac{1-2\mu}{(1-\mu)r} \left(\epsilon_{rr}^c - \epsilon_{\theta\theta}^c + \frac{\partial \epsilon_{r\theta}^c}{\partial \theta} \right) + \frac{\mu}{1-\mu} \left(\frac{\partial \epsilon_{\theta\theta}^c}{\partial r} + \frac{\partial \epsilon_{zz}^c}{\partial r} \right) + \frac{\partial \epsilon_{rr}^c}{\partial r} + \\
 & \left. + \frac{1+\mu}{1-\mu} \left(\frac{\partial \epsilon^{th}}{\partial r} + \frac{\partial \epsilon^s}{\partial r} \right); \right. \quad (1) \\
 & \left. \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \frac{\vartheta}{r^2} + \frac{1}{r^2(1-2\mu)} \left(2(1-\mu) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + r \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + (3-4\mu) \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) = \right. \\
 & = \frac{4}{r} \epsilon_{r\theta}^c + 2 \frac{\partial \epsilon_{r\theta}^c}{\partial r} - 2 \left(\frac{\partial \epsilon_{\theta\theta}^c}{\partial \theta} (\mu-1) - \mu \left(\frac{\partial \epsilon_{rr}^c}{\partial \theta} + \frac{\partial \epsilon_{zz}^c}{\partial \theta} \right) \right) + \frac{2(1+\mu)}{r(1-2\mu)} \left(\frac{\partial \epsilon^{th}}{\partial \theta} + \frac{\partial \epsilon^s}{\partial \theta} \right)
 \end{aligned}$$

Здесь приняты следующие обозначения: ϵ_{ij}^{th} , ϵ_{ij}^s , ϵ_{ij}^c – компоненты тензоров неупругих деформаций термического расширения, радиационного распухания (свеллинг) и ползучести соответственно; μ – значения коэффициента Пуассона (характерные для конкретного диапазона действующих температур и облучения).

Исходя из общей схемы нагружения для сплошного цилиндра, система (1) дополняется смешанными граничными условиями:

$$u(0, \theta) = \vartheta(0, \theta) = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{rr}(R, \theta) = -P_{ext}(t); \quad \sigma_{r\theta}(R, \theta) = 0. \quad (3)$$

По приведенным выше зависимостям в дальнейшем необходимо определить распределение перемещений, напряжений и деформаций во всех точках по периметру сечения длинного цилиндрического тела с течением времени t , которое выполняет роль параметра, определяющего кинетику изменения НДС.

Замыкают систему (1) условия, обусловленные особенностями решения в перемещениях с точностью до поступательного перемещения тела в целом

$$\frac{\partial u(r, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial \vartheta(r, \theta)}{\partial \theta} = 0, \quad \theta = 0, \theta^0, \quad (4)$$

где θ^0 может принимать различные значения в зависимости от закона распределения заданной функции температур $T(r, \theta)$ по периметру сечения; $0 \leq \theta \leq \theta^0$ – условие периодичности решения, определяемое периодом функции распределения температур. Граничные условия на торцах не рассматриваются, так как цилиндр считается длинным, и анализируются сечения, достаточно удаленные от торцов (в соответствии с принципом Сен-Венана).

Без ограничения общности построения механико-математической модели, рассмотренный случай может быть дополнен моделями деформирования полого (рис.2) и многослойного цилиндров.

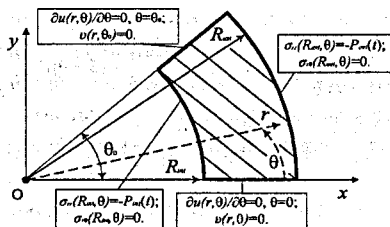


Рисунок 2 – Расчетная область и условия на границе длинного тела двусвязной цилиндрической геометрии

В случае многослойного цилиндрического тела, считая, что соседние слои не имеют свободы перемещений относительно друг друга, предполагается дополнительно задавать:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^I(R_{ext}^I) &= \sigma_{rr}^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \sigma_{r\theta}^I(R_{ext}^I) = \sigma_{r\theta}^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \\ u^I(R_{ext}^I) &= u^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \vartheta^I(R_{ext}^I) = \vartheta^{I+1}(R_{int}^{I+1}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $I=1, 2, \dots, J$ – номер слоя, J – количество слоев; R_{int}^I, R_{ext}^I – радиусы I -го слоя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лихачев, Ю.И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пулко. – М.: Атомиздат, 1975.
2. Куликов, И.С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. – Минск: Наука і тэхніка, 1990. – 143 с.
3. Писаренко, Г.С. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках / Г.С. Писаренко. – К.: Наук. думка, 1979.
4. Olander, D. R. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements / D.R. Olander. – USA: Technical Information Center Energy Research and Development Administration, 1976. – 720 p.
5. Ширвель, П.И. Модель расчета несосимметричного напряженно-деформированного состояния облучаемых тел цилиндрической геометрии в условиях ползучести / П.И. Ширвель, И.С. Куликов // Весті НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук.–2012.–№ 4.–С. 51–62.

УДК 539.3

ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕРМОУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НАГРЕВЕ И ОБЛУЧЕНИИ

Хвусевич В.М., Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В., Мороз Е.А.

Брестский государственный технический университет,

Брест, Беларусь

Основным конструктивным элементом активной зоны ядерного реактора является тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ). В современных энергетических реакторах сердечник ТВЭЛА представляет собой длинный цилиндрический стержень, работающий в условиях радиационного распухания и подверженный температурной нагрузке. От надежной работы ТВЭЛОВ зависит работоспособность всего реактора, поэтому исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических тел при терморadiационном нагружении приобретает особое практическое значение.