

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трансформирование структуры поверхностных слоев полимерных полуфабрикатов под действием высокоэнергетических потоков / В.Г. Сорокин, Е.И. Эйсымонт, В.А. Струк // Инженерный вестник. – 2009. – №2. – С.118-125.
2. Авдэйчик, С.В. Морфология полимерных материалов после высокоэнергетической обработки / С.В. Авдэйчик, В.В. Гаврилова, С.А. Плещак // Вестник ГрГУ. – 2007. – №4. – С. 31 – 45.
3. Ионин, А.А. Селективная по частоте поверхностная обработка полимерных материалов излучением CO₂-лазера. / А.А. Ионин [и др.]. // Кваптовая электроника. – 1999. – Т. 24, № 8. – С. 764-767.

УДК: 519.6+539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ И ОБЛУЧЕНИИ

Ширель П.И.¹, Куликов И.С.²

1) Белорусский национальный технический университет;

Минск, Республика Беларусь;

2) Смоленский государственный университет,

Смоленск, Российская Федерация

Задача определения неосесимметричного НДС цилиндрической области даже в упругой постановке является сложной, и ее решение, точно удовлетворяющее всем заданным граничным условиям, удавалось получать при очень сильных предположениях. Как правило, в литературе рассматриваются различные неосесимметричные задачи, когда компоненты упругого перемещения и напряжения допускают разложения в тригонометрические ряды. Большинство попыток получения таких решений связаны с разложением нагрузки в ряд Фурье, который для цилиндров бесконечной длины приводит к представлению в виде интегралов Фурье. Такой подход, однако, вызывает вопросы при немеханических нагружениях, а также не позволяет полностью удовлетворить условиям на торцах. Существенно расширить круг решаемых неосесимметричных задач позволяют приближенные численные методы. Заметим, что при наличии распухания и ползучести приведенное утверждение является абсолютным.

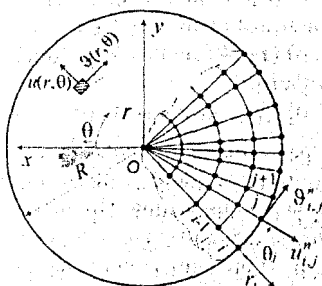


Рисунок 1 – Расчетная область неосесимметричной задачи

Для реализации численного подхода, в области независимых переменных ($0 \leq \theta \leq \theta^0$, $0 \leq r \leq R$) из линий $\theta = \text{const}$ и $r = \text{const}$ строилась криволинейная структурированная сетка, связанная с границами интегрируемой области (рис. 1). Специальные дифференциальные операторы нелинейной системы [1] аппроксимируем их конечно-разностными аналогами с учетом физических особенностей расчетной области. Для этого отрезок $[0, R]$ разбивается равноотстоящими точками: $r_0 = 0$, $r_k = R$, $r_i = ih_r$, $h_r = R/k$, $i = 0, 1, \dots, k$. Аналогично разобьем отрезок $[0, \theta^0]$: $\theta_0 = 0$,

$\theta_m = \theta^0$; $\theta_i = jh_\theta$, $h_\theta = \theta^0 / m$, $j = -1, 0, 1, \dots, m-1$, где h_r и h_θ — шаги сетки в радиальном и окружном направлениях. Заметим, что слой по кольцевой координате $j=-1$ (т.е. плоскость $\theta = -h_\theta$) является вспомогательным и служит исключительно для аппроксимации граничных условий. Регулярная структура такой сетки в дальнейшем должна позволить организовать эффективную работу с разреженными матрицами при решении систем уравнений, причем матрицы коэффициентов системы будут полизаполненными. Для получения конечно-разностных уравнений заменим функции непрерывного аргумента u и ϑ их разностными, дискретными эквивалентами.

При построении шаблона использовались неявные разностные схемы с весовыми коэффициентами. В основу предлагаемого численного метода решения полученной разностной системы уравнений на основе [1] заложены метод конечных разностей, метод матричной прогонки, идеи метода дробных шагов Н.Н. Яненко, теория аппроксимации, интерполяции и экстраполяции функции, а также итерационные методы. Окончательно дискретная система, описывающая общий случай неосесимметричного НДС в условиях терморadiационного нагружения была представлена в виде:

$$\begin{cases} \chi_{li} u_{i+1,j+1}^n - (1 + 2\chi_{li}) u_{i,j+1}^n + \chi_{1i} u_{i-1,j+1}^n = d_{i,j}^n; \\ \xi_{li} \vartheta_{i+1,j+1}^n - (1 + 2\xi_{li}) \vartheta_{i,j+1}^n + \xi_{1i} \vartheta_{i-1,j+1}^n = k_{i,j}^n. \end{cases} \quad (1)$$

$$\chi_{li} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \alpha; \quad \chi_{2i} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \beta;$$

$$\xi_{li} = \frac{r_i^2(1-2\mu)h_\theta^2}{2(\mu-1)} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \alpha; \quad \xi_{2i} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \beta.$$

Здесь $d_{i,j}^n$, $k_{i,j}^n$ — функции от перемещений на предыдущих слоях по окружной координате $(j, j-1)$: $d_{i,j}^n = -2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n(1 - \chi_{2i}\Lambda_2) - F_{li}^n(u_{i,j}, \vartheta_{i,j})H_i$,

$$H_i = 2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2/(2\mu-1); \quad k_{i,j}^n = -2\vartheta_{i,j}^n + \vartheta_{i,j-1}^n(1 - \xi_{2i}\Lambda_2) - F_{2i}^n(u_{i,j}, \vartheta_{i,j})M_i,$$

$$M_i = r_i^2(1-2\mu)h_\theta^2/(2\mu-2); \quad \alpha + \beta = 1.$$

Где нелинейные члены F_1 и F_2 определяются по выражениям, представленным в конечно-разностной форме, включающим частные производные от искоемых функций и неупругие слагаемые в правой части (1): термическое расширение, радиационное распухание, деформации ползучести.

Для определения неизвестных функций $u_{i,j+1}$, $\vartheta_{i,j+1}$ на каждом шаге по окружной координате имеем систему уравнений с граничными условиями, которые в общем виде для n -го временного этапа деформирования переписываются в дискретной форме по формулам численного дифференцирования. Причем условия в напряжениях первоначально конвертируются относительно перемещений через физические уравнения и формулы Коши. Полученные системы разностных уравнений имеют матрицы трехдиагональной структуры и могут быть решены по методу матричной прогонки, на основе модификации разработанной в [1] численной схемы. Так, система (1) расплывается на две системы, которые

решаются прогонами с учетом параметра времени t : первая – по радиальному перемещению, а вторая – по окружному.

Прогонка осуществляется по радиусам, которые для каждого луча начинаются в центре сечения и оканчиваются на границах исследуемой области. Такие прогоны имеют свои особенности, вызванные характером сетки, расчетной областью и видом рассматриваемых физически нелинейных эффектов. По окончании текущего шага расчета в алгоритме, реализующем механико-математическую модель с учетом необратимых деформаций, фиксируются величины, характеризующие НДС каждой точки по периметру модельного тела в конце n -го этапа нагружения, и начинается расчет $(n+1)$ -го этапа. В результате, для получения решения на следующем $n+1$ временном слое решается новая система неоднородных линейных уравнений по изложенной выше численной методике. Таким образом, для любого текущего момента времени t_n имеем полную замкнутую систему из $2km$ неоднородных алгебраических уравнений с $2km$ неизвестными. Общая схема численного решения представлена на рис. 2. Необ-

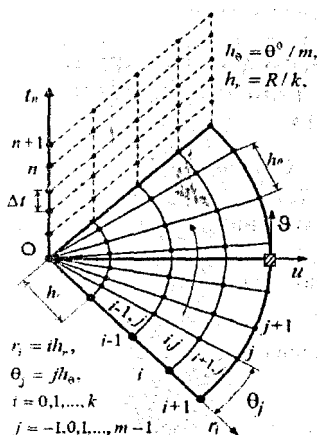


Рисунок 2 – Численная схема разбиения сечения модели

ходимая точность в процессе решения достигается, с одной стороны, измельчением шага криволинейной структурированной сетки в радиальном и окружном направлениях, с другой стороны, повышением степени порядка аппроксимации выражений производных в конечных разностях.

В [2–4] рассмотрены особенности реализации разработанной механико-математической модели, которая включала моделирование обобщенного плоского квазистатического деформированного состояния ($\epsilon_{zz} = C(t) \neq 0$) и отдельную процедуру вычисления необратимых деформаций. При определении деформаций ползучести на каждом временном шаге использовалась теория течения с учетом радиационной составляющей. Деформации радиационного распухания на каждом этапе нагружения определялись с по-

мощью эмпирических зависимостей, полученных на основе внутриреакторных испытаний тепловыделяющих и конструкционных материалов. Для проведения дальнейших исследований реализован алгоритм расчета неосесимметричного НДС и компьютерная программа решения 2D(r, θ) задачи ползучести в условиях облучения. Программная модель реализована на C# в среде Microsoft Visual Studio 2011 и позволяет обрабатывать и визуализировать результаты расчетов цилиндрических тел (сплошной, полый, многослойный цилиндры) для различных типов граничных условий и видов физической нелинейности (радиационное распухание, ползучесть). Архитектура программного комплекса является модульной, что дает возможность в дальнейшем добавлять новые функциональные возможности и вносить улучшения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов, И.С. О неосесимметричном НДС неравномерно нагретых длинных цилиндрических тел в условиях ползучести и облучения / И.С. Куликов, А.В. Чигарев, П.И. Ширвель // *Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела: в 2 ч.* – Чебоксары, 2014. – Ч.2. – С. 5–16.
2. Чигарев, А.В. Исследование неосесимметричного напряженного состояния при квазистатическом термосиловом нагружении в условиях облучения высокоэнергетическими частицами / А.В. Чигарев, П.И. Ширвель // *Наука и Техника.* – 2013. – №4. – С. 46–53.
3. Ширвель, П.И. Неосесимметричное напряженно-деформированное состояние длинного тепловыделяющего цилиндра в условиях квазистатического терморadiационного воздействия / П.И. Ширвель, И.С. Куликов, А.В. Чигарев // *Теор. и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 29. – С. 79–85.
4. Ширвель, П.И. Численное моделирование процессов деформирования элементов конструкций и компонентов оборудования ЯЭУ / П.И. Ширвель, А.В. Чигарев, А.А. Сергей // *Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 29. – С. 173–178.

УДК 539.3

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕРМОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРОБИВНОГО ПУАНСОНА

*Веремейчик А.И.¹, Гарбачевский В.В.¹, Сазонов М.И.¹,
Хвусевич В.М.¹, Цыганов Д.Л.²*

¹Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь;

²Институт физики плазмы и ядерного синтеза,
Лиссабон, Португалия

Для процесса поверхностного плазменного упрочнения рабочей зоны цилиндрических пуансонов для пробивки отверстий применялся плазмотрон с высокой удельной мощностью. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, причем в плазмотроне было применено обжимающее сопло с диаметром отверстия 1,2 мм. Струя плазмы шириной 2,8 мм направлялась на торцы пуансонов, которые обжаты двумя медными пластинами для их интенсивного охлаждения и собраны в обжим. При движении плазмотрона производится последовательные интенсивный нагрев и закалка их торцов. Схема приспособления приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Приспособление для интенсивного теплоотвода

