

4.8 Технология машиностроения

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ ПО МНОГОЗВЕННЫМ КУСОЧНО-ЛОМАНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

**Зубчанинов В.Г., д.т.н., проф., Алексеев А.А., к.т.н., доц.,
Гультяев В.И., д.т.н., проф.**

*Тверской государственный технический университет,
г. Тверь, Российская Федерация*

Реферат. Представлены результаты математического моделирования процессов упругопластического деформирования материала сталь 45 по многозвенной кусочно-ломаной траектории с углами излома 135 градусов. При моделировании использовалась математическая модель теории процессов для плоских траекторий с уточненными аппроксимациями функционалов процесса. Для оценки достоверности математической модели численные расчеты сравниваются с данными физического эксперимента, проведенного на автоматизированном испытательном комплексе на сложное нагружение СН-ЭВМ.

Ключевые слова: пластичность, упругость, процессы деформирования, численный анализ, испытательный комплекс СН-ЭВМ, векторные и скалярные свойства материалов.

Для численного моделирования процессов сложного упругопластического деформирования материалов в девиаторном пространстве А.А. Ильюшина по плоским неаналитическим кусочно-ломаными прямолинейными траекториями используются определяющие соотношения теории процессов в виде [1-2]

$$\begin{cases} \frac{dS_k}{ds} = M_1 \frac{d\mathcal{E}_k}{ds} + \left(\frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1 \right) \frac{S_k}{\sigma}, & (k = 1, 3), \\ \frac{d\vartheta_1}{ds} = -\frac{M_1}{\sigma} \sin \vartheta_1, \end{cases} \quad (1)$$

где S_k, \mathcal{E}_k – компоненты (координаты) векторов напряжений и деформаций; s – длина дуги траектории деформирования; угол сближения ϑ_1 – функционал векторных свойств материала; σ – функционал процесса скалярных свойств материала; ϑ_1^0 – угол излома траектории в начальной точке криволинейного аналитического участка траектории, $M_1, \frac{d\sigma}{ds}$ – функционалы процесса деформирования, зависящие от s, ϑ_1^0 .

В качестве закона упрочнения для процессов, близких к простому нагружению используется закон Одквиста-Ильюшина $\sigma = \Phi(s)$. Для прямолинейных траекторий, имеющих сложную историю нагружения, предложены аппроксимации функционалов

$$\sigma(s) = \Phi(s) + Af_0^p \Omega(\Delta s) - \Delta\sigma_K, \quad (2)$$

$$M_1 = 2G_p + (2G - 2G_p^0) f^q, \quad (3)$$

где $\Delta s = s - s_K^T$ – приращение длины дуги траектории после ее излома в некоторой точке К; $\Delta\sigma_K = \Phi(s_K^T) - \sigma_K^T$ – разница в точках излома между значениями универсальной функции Одквиста-Ильюшина и расчетным значением модуля вектора напряжений σ_K^T ; индекс «нолик» у пластического модуля сдвига соответствует значению G_p в точке излома траектории;

$$\Omega(\Delta s) = -\left[\gamma \Delta s e^{-\gamma \Delta s} + b(1 - e^{-\gamma \Delta s})\right] \quad (4)$$

– функция, описывающая после излома траектории скалярный нырок напряжений при сложной разгрузке и последующем вторичном пластическом деформировании;

$$f = \frac{1 - \cos \vartheta_1}{2}; \quad f_0 = f(\vartheta_1^0) = \frac{1 - \cos \vartheta_1^0}{2} \quad (5)$$

– функция, учитывающая ориентацию вектора напряжений в процессе деформирования и ее значение в точке излома при значении угла сближения ϑ_1^0 каждого из участков неаналитической траектории; A, b, γ, p, q – материальные параметры материала. Для аппроксимации универсальной функции упрочнения $\Phi(s)$ использовались выражения

$$\sigma = \Phi(s) = \begin{cases} \frac{2G}{\alpha} (1 - e^{-\alpha s}), & \text{при } 0 \leq s \leq s^T, \\ \sigma^T + 2G_*(s - s^T) + \sigma_* (1 - e^{-\beta(s - s^T)}), & \text{при } s > s^T; \end{cases} \quad (6)$$

$\sigma^T = \sqrt{2/3} \sigma_T$; σ_T – предел текучести при растяжении; s^T – граница участков диаграммы деформирования, разделяющая упругую часть диаграммы и площадку текучести ($0 \leq s \leq s^T$) от участка самоупрочнения материала ($s > s^T$); G – упругий модуль сдвига; $\sigma_*, G_*, \alpha, \beta$ – экспериментально определяемые параметры материала из опытов на простое нагружение.

При заданных начальных условиях для координат \mathcal{E}_k ($k=1, 3$) и угла ϑ_1^0 определяющие соотношения (1) с конкретизированными функционалами (2), (3) сведены к задаче Коши, для численного решения которой и определения S_k ($k=1, 3$) и угла ϑ_1 использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности в программном приложении MathWorks MATLAB.

Экспериментальное исследование было выполнено на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ имени А.А. Ильюшина в лаборатории механических испытаний кафедры «Сопrotивление материалов, теории упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета. В качестве образцов для экспериментальных исследований были использованы тонкостенные цилиндрические оболочки из стали 45 в состоянии поставки, имеющие в рабочей части: длину $l = 110$ мм, толщину $h = 1$ мм и диаметр срединной поверхности $d = 31$ мм. Начальная изотропия материала образцов с достаточной степенью точности была подтверждена в опытах на простое нагружение, где после обработки этих диаграмм для стали 45 получено: $\sigma^T = 285$ МПа, $s^T = 0,9 \cdot 10^{-2}$, $2G = 1,57 \cdot 10^5$ МПа, $\beta = 70$, $\alpha = 900$, $\sigma_* = 78,8$ МПа, $2G_* = 1618,9$ МПа.

Для оценки достоверности расчетных результатов по предлагаемой математической модели в пространстве деформаций $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ девиаторного подпространства E_5 реализована неаналитическая траектория, состоящая из четырех прямолинейных кусочно-ломаных участков (рис. 1). На рис. 2 приведен отклик на реализованную траекторию деформирования в виде траектории нагружения в плоскости $S_1 - S_3$ совмещенного девиаторного подпространства E_5 . На рис. 3 приведены результаты расчета и экспериментальные данные для диаграмм прослеживания процессов сложного нагружения $\sigma - s$, характеризующих скалярные свойства материалов в зависимости от длины дуги s сложного деформирования, на рис. 4 – диаграммы для углов сближения $\vartheta_1 - \Delta s$, характеризующие векторные свойства материалов. Цифрами 1, 2, 3, 4 на всех рисунках обозначены точки начала соответствующих участков реализованной кусочно-ломаной траектории. Экспериментальные данные на рисунках отмечены точками; модельные расчетные данные – сплошными кривыми.

В расчете на всех участках траектории использовались значения материальных параметров, найденные по специальной методике [3]: $p = 4$, $q = 0,8$, $b = 0,125$, $A = 595,34$ МПа, $\gamma = 240,56$.

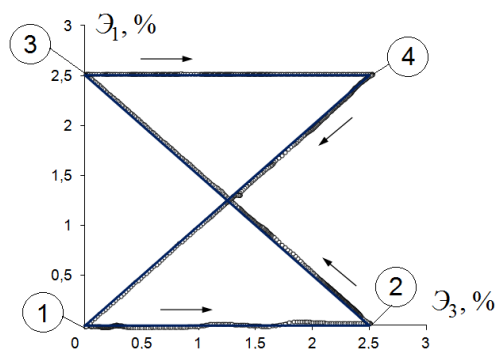


Рисунок 1

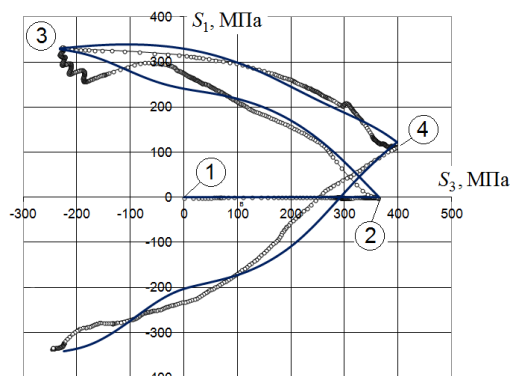


Рисунок 2

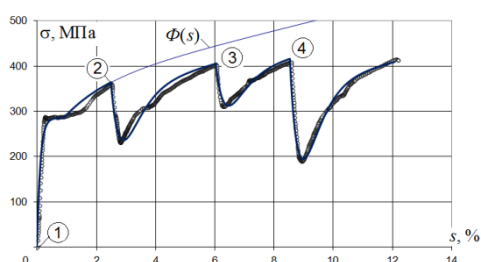


Рисунок 3

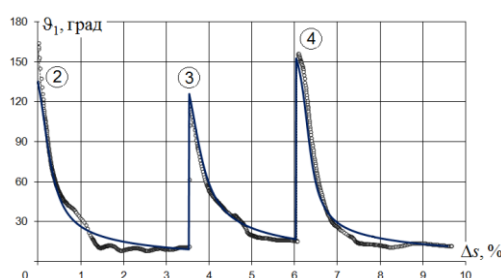


Рисунок 4

Как видно, принятые для модели данные достаточно хорошо соответствуют экспериментальным результатам, как по скалярным, так и по векторным свойствам. Это показывает достаточную для практических задач достоверность расчетных данных и приемлемую точность построенных аппроксимаций функционалов процессов в используемой математической модели теории процессов применительно к данному классу неаналитических многозвенных кусочно-ломаных траекторий.

Список использованных источников

1. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. 352 с.
2. Зубчанинов В.Г. Устойчивость и пластичность. Т.2. Пластичность. М.: Физматлит, 2008. 336 с.
3. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гульятев В.И. Моделирование процессов упругопластического деформирования материалов по многозвенным кусочно-ломаным прямолинейным траекториям // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 3. С. 203–215. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.12

УДК 677.076.444: 536.248.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТАХ МАТЕРИАЛОВ С ЖИДКОЙ ГОРЯЧЕЙ СРЕДОЙ

Окунев Р.В., асс., Ольшанский В.И., к.т.н. проф.

Витебский государственный технологический университет,
г. Витебск, Республика Беларусь

Реферат. В статье разработана математическая модель оценки продолжительности нестационарного процесса теплообмена и выхода на стадию