ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/71

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН

В настоящей работе предлагается обобщённый вариант ранее предложенной [1] и разрабатываемой применительно к различным реализациям [2-7] математической модели деформируемого твёрдого тела с мезоскопическими дефектами. Указанная модель была успешно применена для описания деформационного поведения металлов и сплавов при статическом [2], динамическом [3, 4], ударно-волновом [5-6] и усталостном [7] нагружениях. Полная система полевых уравнений имеет следующий вид:

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (1)$$

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla) = \mathbf{D}^e + \mathbf{D}^{pl} + \dot{\mathbf{p}}, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \lambda(\mathbf{D} : \mathbf{E})\mathbf{E} + 2G(\mathbf{D} - \mathbf{D}^{pl} - \dot{\mathbf{p}}), \quad (4)$$

$$\mathbf{D}^{pl} = \dot{\epsilon}_0^{n_e} \exp\left(\frac{U(T)}{kT}\right) \left(\Gamma_{\sigma} \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_{p\sigma} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} \right), \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \dot{\epsilon}_0^{n_p} \exp\left(\frac{U(T)}{kT}\right) \left(\Gamma_{p\sigma} \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_p \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} \right), \quad (6)$$

$$\dot{\delta} = -\dot{\epsilon}_0^{n_\delta} \Gamma_\delta \frac{\partial F}{\partial \delta}, \quad (7)$$

$$\rho c \dot{T} = \alpha \Delta T + \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D}^{pl} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} : \dot{\mathbf{p}} - \frac{\partial F}{\partial \delta} \dot{\delta}, \quad (8)$$

$$\frac{F}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2) - \frac{\boldsymbol{\sigma}_d : \mathbf{p}}{2G}, \quad (9)$$

$$U(T) = \frac{k}{T_c^m} T^{m+1}, \quad \boldsymbol{\sigma}_d = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_s, \quad \boldsymbol{\sigma}_s = \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{E})\mathbf{E}, \quad \boldsymbol{\sigma}^R = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R}^T,$$

и состоит из: уравнений движения (1) и неразрывности (2), кинематического соотношения (3), закона Гука в скоростной формулировке (4), кинетических уравнений (5)-(7), уравнения теплопроводности (8), выражения для свободной энергии (9). Приняты обозначения: ρ – массовая плотность; $\mathbf{v}$ – вектор скорости; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\boldsymbol{\sigma}_s$ и $\boldsymbol{\sigma}_d$ – его шаровая и девиаторная части; $\nabla(\cdot)$ – оператор градиента в текущей конфигурации; $\mathbf{D}$ – тензор деформации скорости, $\mathbf{D}^e$, $\mathbf{D}^{pl}$ – его упругая и пластическая составляющие; λ , G – упругие константы материала; $\mathbf{E}$ – единичный тензор; $\dot{\epsilon}_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\boldsymbol{\epsilon}} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}} / \dot{\epsilon}_c$ – безразмерная интенсивность скорости деформации, $\dot{\epsilon}_c = 1 \text{ с}^{-1}$; k – константа Больцмана; δ – параметр структурного скейлинга; Γ_δ , Γ_σ , $\Gamma_{p\sigma}$, Γ_p – положительные кинетические коэффициенты; n_e , n_p , n_δ – константы, отвечающие за скоростную чувствительность материала; F – термодинамический потенциал, связанный с дефектами; $\mathbf{p}$ – тензор плотности микросдвигов; c – удельная теплоёмкость; α – коэффициент теплопроводности; T – температура; $\Delta(\cdot)$ – оператор Лапласа; F_m , c_1 - c_4 – константы аппроксимации термодинамического потенциала F ; T_c , m – константы аппроксимации характерной энергии активации U ; $\mathbf{R}$ – ортогональный тензор полярного разложения градиента места $\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}$, где $\mathbf{U}$ – правый симметричный положительно определенный тензор деформации без вращений.

В качестве материала для исследования был выбран сплав АМг6, применяемый в авиадвигателестроении. Известные значения для плотности, теплоемкости, теплопроводности и упругих модулей были взяты из доступных литературных данных [9]. Идентификация неизвестных параметров модели проводилась с использованием квазистатических испытаний

Секция 2. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

на одноосное растяжение\сжатие (определялись коэффициенты Γ_σ , $\Gamma_{p\sigma}$, Γ_p); экспериментальных данных о прочностных характеристиках при различных скоростях деформации [8] и температурах [9], дополнительно определялись константы n_ε , n_p и T_c , m соответственно. Верификацией параметров явилась способность модели предсказывать предел текучести материала при повышенных температурах и высоких скоростях деформации одновременно. В настоящее время, метод Тейлора широко используется для верификации уравнений состояния и моделей поведения материалов на основе сравнения остаточной формы образца после испытания и результатов численного расчета. Полученная форма стержня после соударения в расчёте хорошо согласуется с экспериментом.

Для моделирования разрушения был предложен следующий критерий разрушения:

$$\beta_{int}^S \geq \beta_{int}^*, \quad (10)$$

где $\beta_{int}^S = \int \beta^S d\varepsilon$, $\beta^S = 1 - \beta$ – процент запасенной энергии, β – коэффициент Тейлора-Квини, который в рамках предложенной модели может быть вычислен следующим образом [2]:

$$\beta = 1 - \frac{\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{p}} : \dot{\mathbf{p}}}{\boldsymbol{\sigma} : (\mathbf{D}^{pl} + \dot{\mathbf{p}})}, \text{ где } \frac{\Psi}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2)$$

Введённый критерий позволил адекватно предсказывать усталостное разрушение сплава АМг6, в том числе после предварительного динамического нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-79-00168.

1. Наймарк О. Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45-72.
2. Костина А.А., Баяндин Ю.В., Плехов О.А. Моделирование процесса накопления и диссипации энергии при пластическом деформировании металлов // Физ. мезомех. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 43-49.
3. Билалов Д.А., Сокоиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терёхина А.И., Наймарк О.Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 319-328.
4. Билалов Д.А., Сокоиков М.А., Чудинов В.В. и др. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103-112.
5. Bayandin Yu., Leont'ev V., Naimark O., Permjakov S. Experimental and theoretical study of universality of plastic wave fronts and structural scaling in shock loaded copper // J. De Physique. IV. – 2006. – P. 1015-1021.
6. Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Наймарк О.Б. Формирование упругопластических фронтов и откольное разрушение в сплаве АМг6 при ударных воздействиях // ПЖТФ. – 2018. – Т. 44, № 18. – С. 39-46.
7. Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 323-334.
8. Глушак Б.Л., Игнатова О.Н., Пушков В.А., Новиков С.А., Гирин А.С., Сеницын В.А. Динамическое деформирование алюминиевого сплава АМг-6 при нормальной и повышенной температурах // ПМТФ. – 2000. – Т. 41, № 6. – С. 139-143.
9. Машиностроение. Том II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под общ. ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.