УДК 539.43

СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.А.Джумабаев
ЮКГУ им. М.Ауезова, г.Шымкент

Представление материала в виде дискретной системы, содержащей неоднородности, влияющие на его механические свойства, явилось причиной возникновения нового направления в теории пластичности. Одним из первых были здесь, по-видимому, Дьюз и Бонеблюст, рассмотревшие одномерный вариант теории. Вводя энергетические критерии перехода микроэлементов из упругого состояния в пластическое, задавая плотность распределения элементов по пределам текучести, они получили основные соотношения для простого нагружения.

В работах Кадашевича и Новожилова [1] теория микропластичности получила значительное развитие. В своих исследованиях в этом направлении они приводят подробную библиографию.

Идея описания деформационных свойств материала с помощью структурных моделей родилась на основе теории микронеоднородности. Одной из первых попыток теоретического объяснения эффекта Баушингера является известная модель Мазинга. При ее создании Мазинг исходит из того, что отдельные зерна материала анизотропны и различным образом ориентированы относительно направления деформирования. Имея неодинаковые пределы текучести, зерна обладают свойствами идеально-упругопластического тела, а их деформации считаются одинаковыми. Анализ такой модели показывает, что с помощью нее можно построить диаграмму деформирования, воспроизводящую “чистый” эффект Баушингера.

Обобщение модели Мазинга на случай бесконечного числа элементов с линейным упрочнением и вероятностным законом распределения пределов текучести проведено в работе [2]. На основе этих представлений найдено уравнение диаграммы растяжения. Однако, при циклическом деформировании подбор параметров функций статистически распределенных величин трудоемок и может быть выполнен только на основе полного объема экспериментальных данных.

Представления одномерной модели Мазинга распространяются на пространственный случай в работе [3], где также изучаются некоторые эффекты неупругого деформирования при непропорциональном нагружении, в частности, по траектории типа двухзвенной ломаной. Распределение пределов текучести упругопластических подэлементов находится по диаграмме пропорционального нагружения. Работа показывает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными результатов расчета по этой модели деформаций трубчатых образцов при непропорциональном нагружении.

Дополненная правилами памяти о предыстории нагружения, эта же модель позволяет описывать поведение склеромного материала, находящегося в циклически стабильном состоянии при повторно-переменном нагружении. Идентификация ее проводится после достижения материалом состояния, принимаемого за стабилизированное. Зарубин усложняет свойства элементов [4], наделив их способностью линейного упрочнения. В этом случае величина предела текучести подэлемента не зависит от пути пластического деформирования, который может быть значителен по абсолютной величине при многократных циклических нагружениях и приводить к существенному изотропному упрочнению материала.

В работе [5] Закон предложил определять пластическую составляющую деформации подэлемента, используя теорию процессов малой кривизны. Он приводит расчет диаграммы деформирования в виде двухзвенной и траекторией средней кривизны, удовлетворительно совпадающий с экспериментом.

Все предыдущие модели, объединенные общим предположением о равенстве тензоров полных деформаций подэлементов, носят название параллельно-последовательных. Она характерны тем, что в элементах действуют одинаковые напряжения, а деформации их различны.

Впервые Кадашевич и Новожилов применили гипотезу Кренера о линейной связи между отклонениями напряжений и деформаций от их среднего значения для подэлементов:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle - \sigma_{ij}^{k} = m(\varepsilon_{ij}^{p(k)} - \langle \varepsilon_{ij}^{p} \rangle); \qquad m \geq 0 \tag{1}$$

где $\langle \sigma_{ij} \rangle$, $\langle \varepsilon_{ij}^{p} \rangle$ –осредненные напряжения и пластические деформации; $\varepsilon_{ij}^{p(k)}$, σ_{ij}^{k} - пластическая деформация и напряжение в k-м элементе. В плане развития структурной модели это позволило оперировать не только свойствами элементов, но и характером их соединения, создавая как бы "нежесткие" связи.

Легко заметить, что рассмотренные выше модели являются при этом частными случаями: при $m=0$ получаем последовательно-параллельную модель, а при $m=\infty$ – параллельно-последовательную.

Продолжение развития концепции локальных связей имеется в [6]. Параметр m - постоянная материала, зависящая от скорости деформирования, параметра Одквиста и температуры. Определять параметр m автор предлагает из принципа минимума скрытой энергии деформирования. При расширении возможности модели такой подход приводит, во-первых, к увеличению числа базовых экспериментов, во-вторых, к возрастанию трудоемкости расчетов и, в-третьих, делает затруднительным качественный анализ особенностей поведения модели при различных программах нагружения. Поэтому усложнение модели целесообразно только тогда, когда простейший вариант не может отразить существенные свойства материала в интересующей области нагружения.

Развитие метода расчета диаграмм пластического деформирования с учетом деформационной анизотропии для простого и сложного напряженного состояния на основе структурной механической модели (рисунок 1) представлено в работе [7]. На рисунке E_k и C_k - коэффициенты жесткости и предельные сопротивления ветвей для k-го звена соответственно. Предельное сопротивление C_2 принимается равным пределу текучести материала, а C_5, C_7 и E_3, E_4, E_6 определяются из кривой циклического деформирования (рисунок 2).

В случае сложного напряженного состояния и пропорционального нагружения зависимости между девиаторами напряжений и деформаций в исходном полуцикле имеют следующий вид:

В случае $C_2 < \sigma_i \leq (C_2 + C_5)$

$$e_{ij} = \frac{1+\nu}{E_1} S_{ij} + \frac{3}{2}\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\frac{\sigma_i - C_2}{E_3} \tag{2}$$

при $(C_2 + C_5) < \sigma_i \leq (C_2 + C_7)$, $C_7 > C_5$

$$e_{ij} = \frac{1+\nu}{E_1} S_{ij} + \frac{3}{2}\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\left(\frac{\sigma_i - C_2}{E_3} + \frac{\sigma_i - C_2 - C_5}{E_4}\right) \tag{3}$$

а в случае $\sigma_i > (C_2 + C_7)$

$$e_{ij} = \frac{1+\nu}{E_1} S_{ij} + \frac{3}{2}\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\left(\frac{\sigma_i - C_2}{E_3} + \frac{\sigma_i - C_2 - C_5}{E_4} + \frac{\sigma_i - C_2 - C_7}{E_6}\right) \tag{4}$$

где σ_i - интенсивность напряжений,

S_{ij} - компоненты девиаторов напряжений.

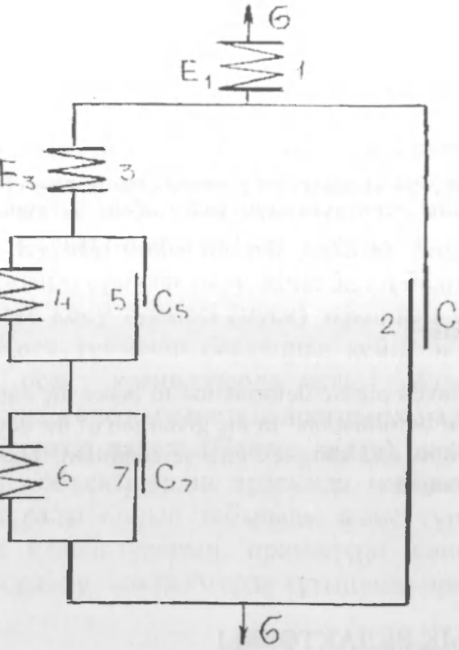

Рисунок 1 - Структурная модель материала

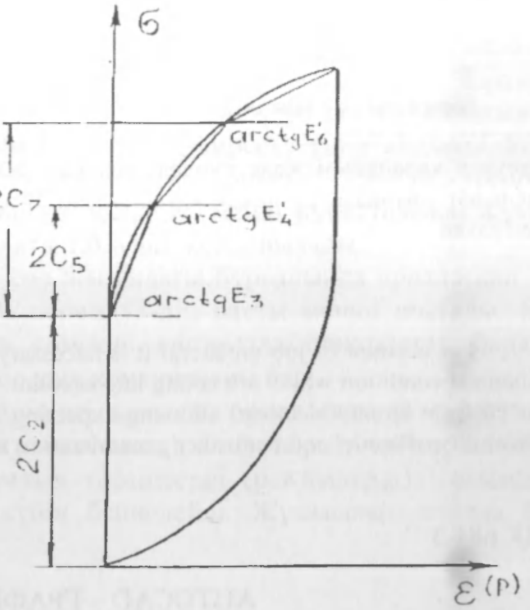

Рисунок 2 - Диаграмма циклического деформирования

Отсчет напряжений и деформаций от нового начала координат после разгрузки для последующих полуциклов нагружения в общем виде (при $\sigma_i > C_2 + 2C_7$)) запишется таким образом:

$$e_{ij} = \frac{1+\nu}{E_1} S_{ij} + \frac{3}{2}\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\left(\frac{\sigma_i - C_2}{E_3} + \frac{\sigma_i - C_2 - 2C_5}{E_4} + \frac{\sigma_i - C_2 - 2C_7}{E_6}\right) \qquad (5)$$

В случае, если второе или третье слагаемое (в скобке) формулы (5) получается отрицательным (то есть $C_2 < \sigma_i \le C_2 + 2C_5$ или $C_2 + 2C_5 < \sigma_i \le C_2 + 2C_7$), то оно отбрасывается (соответствующее звено не работает).

Данный подход пригоден и для общего случая непропорционального нагружения. Для этого необходимо разбить весь путь нагружения, независимо от закона нарастания или убывания S_{ij}, на ряд участков, в пределах каждого из которых нагружение является пропорциональным.

Литература

1 Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. Теория пластичности и ползучести металлов, учитывающая микронапряжения // Изв. АН СССР. МТТ.-1981.- №5.-С.99-110.

2 Афанасьев Н.Н. Статическая теория усталостной прочности металлов. - Киев: Изд. АН УССР.-1953.- 125 с.

3 Д.А.Гохфельд, И.А.Иванов, О.С.Садаков. Описание эффектов сложного нагружения на основе структурной модели среды // Успехи механики деформируемых сред. - М: Наука, 1975.-С.171-183.

4 Зарубин В.С. Прикладные задачи термопрочности элементов конструкций при повторных нагружениях. - М.: Машиностроение, 1984.-256 с.

5 Закон Е.И. Обобщение структурной модели упругопластического тела на случай сложного нагружения // Прикладная механика.-1983. -№4.-С.40-44.

6 Марина В.Ю. Определяющие уравнения при циклическом пропорциональном деформировании нестабильных материалов //Прикладная механика.-1986.- №6. -т.22.-С.92-99.
7 Пенкин А.Н. Малоцикловая усталость конструкционной стали при сложном напряженном состоянии: автореф. дис....канд.техн. наук -ЛПИ,1984.-16 с.

Қорытынды

Біржақты жинакталған пластикалык деформацияның жұмысын есептеу үшін, деформациялык біртектілік еместікті камтитын механикалык күйдің теңдеулерін құрастыру кажет. Бұл жұмыста аталған теңдеулер қарапайым және күрделі кернеулі жағдайларды есептеуге мүмкіндік беретін құрылымдык модельден алынады. Сонымен катар, алынған модельдің колданылу аясы мен толыктырылу жолдары аныкталған.

Summary

For account of job unilateral it is necessary of the saved plastic deformation to make the equations of mechanical condition which are taking into account in similar deformation. In the given job of the equation are deduced from structural model allowing expecting as idle time, and complex intense condition. The limits of applicability of model and its further generalization are determined.