

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

С.Я. Куранаков

Развивается метод расчета элементов конструкций на малоцикловую усталость с учетом деформационной анизотропии, циклической нестабильности материала и одностороннего накопления пластических деформаций в условиях сложного напряженного состояния и термомеханического нагружения. На основе структурной модели материала выводятся уравнения механических состояний, связывающих текущие значения напряжений и деформаций в зависимости от режима термомеханического нагружения.

Совершенствование существующих механизмов и машин, отвечающим всевозрастающим требованиям надежности, долговечности при наименьшей металло- и энергоемкости, ставит перед учеными и конструкторами более сложные задачи, такие как разработка методов их упругопластического анализа, особенно в условиях переменных нагрузок, позволяющие моделировать уровень напряжений упругопластических деформаций для рационального подбора материала, формы и размеров элементов конструкций.

Оценка долговечности в условиях упругопластического деформирования при переменных напряжениях связана с решением двух задач. С одной стороны, необходимо построить зависимости между напряжениями и деформациями для идентификации петель макропластического гистерезиса и длины пути одностороннего пластического деформирования. С другой стороны, нужно рассчитать поврежденность на каждом этапе деформирования и определить число циклов, а иногда и длину пути пластического деформирования до момента полного разрушения. Обе задачи в настоящее время решаются достаточно удовлетворительно в случае линейного и сложного напряженного состояния. Но для таких условий, как произвольный путь пластического деформирования, нестационарность напряжения и температуры, ощущается недостаток и теоретических, и экспериментальных данных.

Один из основных, возникающий при решении первой задачи в общей постановке, – вопрос об уравнениях механических состояний, описывающих связь между текущими значениями напряжений и деформаций в зависимости от режима нагружения. В нашей работе, при отсутствии ползучести, такие уравнения выводятся на основе структурной модели материала, разработанной на кафедре сопротивления материалов СПбГТУ (рис. 1) [1–3]

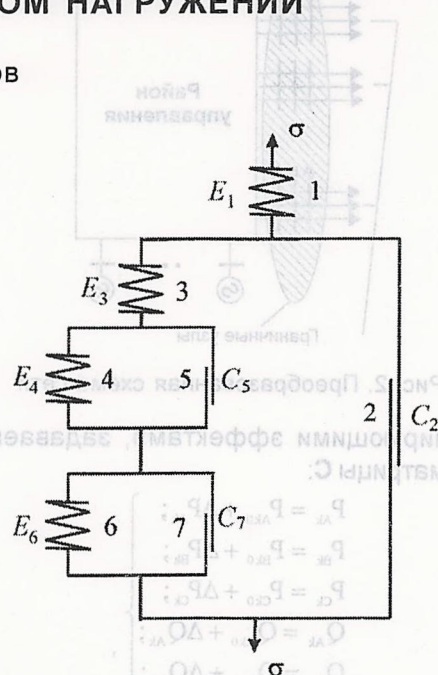


Рис. 1. Структурная модель материала

и получившей дальнейшее развитие в работах [4–6]. По этой модели строится алгоритм расчета деформирования с учетом деформационной анизотропии, циклической нестабильности материала и одностороннего накопления пластических деформаций как для одноосного, так и для сложного напряженного состояния и термомеханического нагружения. Экспериментальная база для построения расчетных диаграмм циклического деформирования – кривые деформирования, полученные при одноосном напряженном состоянии.

Из структурной модели выводятся уравнения механических состояний для расчета петель макропластического гистерезиса и односторонне накопленной пластической деформации. Параметрами модели являются коэффициенты жесткости упругих звеньев E_1, E_3, E_4, E_6 и предельные сопротивления проскальзыванию C_2, C_5, C_7 . Эти постоянные подбираются по диаграмме циклического деформирования в условиях циклического растяжения и сжатия по ординатам и углу наклона трех участков, согласно рисунку 2, по формулам

$$E_4 = \frac{E_3 \cdot E_4'}{E_3 - E_4'}; \quad (1)$$

$$E_6 = \frac{E_3 \cdot E_4 \cdot E_6'}{E_3 \cdot E_4 - E_3 \cdot E_6' - E_4 \cdot E_6'}; \quad (2)$$

где E_3, E_4', E_6' – тангенсы углов наклона линейных участков.

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

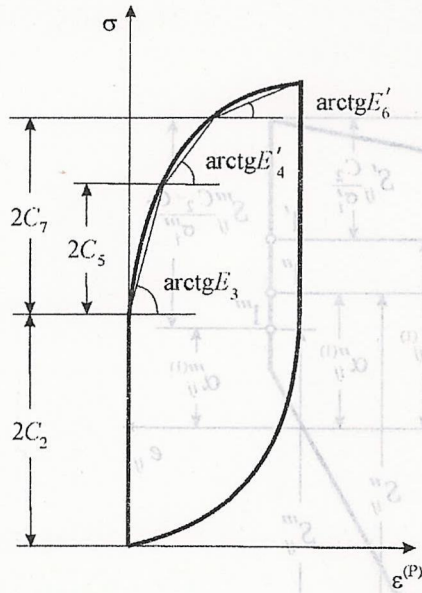


Рис. 2. Диаграмма циклического деформирования

Параметры модели определяются лишь после наработки нескольких циклов, в то время как диаграмма деформирования в нулевом полуцикле еще отвечает обычной диаграмме статического растяжения. Параметры модели имеют размерность напряжения.

Усилия, деформирующие модель, соответствуют напряжению σ . Относительное смещение точек приложения этих усилий – деформации ϵ .

Например, параметры модели для стали 12X18H10T приведены в таблице 1.

Таблица 1
Параметры модели для стали 12X18H10T

Т, К	293	673
C_2	295	280
C_5	140	58
C_7	220	113
E_3	108000	116000
E_4	14600	24000
E_6	5850	14000

Рассмотрим методику построения зависимости между напряжениями и деформациями, соответствующую случаю блочного неизотермического нагружения.

Из структурной модели следуют зависимости между компонентами девиаторов напряжений S_{ij} и пластических деформаций e_{ij} в нулевом полуцикле нагружения. В интервале напряжения $C_2 < \sigma_i \leq (C_2 + C_5)$ появляется пластическая деформация звена 2, равная деформации звена 3, в то время как звенья 4–7 еще не работают. Компоненты пластических деформаций определяются по

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_i - C_2}{E_3} \quad (3)$$

Далее при $(C_2 + C_5) < \sigma_i < (C_2 + C_7)$ с дополнительным условием $C_7 > C_5$ в работу включаются звенья 4 и 5, причем

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_i - C_2}{E_3} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_i - C_2 - C_5}{E_4} \quad (4)$$

и при $\sigma_i > (C_2 + C_7)$ работают все звенья

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_i - C_2}{E_3} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_i - C_2 - C_5}{E_4} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_i - C_2 - C_7}{E_6} \quad (5)$$

где σ_i – интенсивность напряжений.

После прохождения максимального значения напряжения вся система из звеньев 2–7 сначала превращается в абсолютно твердое тело, а затем начинает деформироваться в обратном направлении.

Для расчета обратных деформаций переходим к трем новым началам отсчета по соответствующей компоненте девиатора напряжений. С этой целью каждая компонента S_{ij} уменьшается на величины

$$S_{ij} \frac{C_2}{\sigma_i}; S_{ij} \frac{C_2 + C_5}{\sigma_i}; S_{ij} \frac{C_2 + C_7}{\sigma_i}$$

соответственно (рис. 3).

Общее выражение для расчета компонентов девиатора пластических деформаций получается таким

при $\sigma_i' > C_2$, но $\sigma_i'' \leq (C_2 + C_5)$

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}'}{\sigma_i'} \cdot \frac{\sigma_i' - C_2}{E_3} \quad (6)$$

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

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}''}{\sigma_i''} \cdot \frac{\sigma_i'' - C_2}{E_3} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}''}{\sigma_i''} \cdot \frac{\sigma_i'' - C_2 - C_5}{E_4} \quad (7)$$

при $\sigma_i''' > (C_2 + C_7)$

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}'''}{\sigma_i'''} \cdot \frac{\sigma_i''' - C_2}{E_3} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}'''}{\sigma_i'''} \cdot \frac{\sigma_i''' - C_2 - C_5}{E_4} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}'''}{\sigma_i'''} \cdot \frac{\sigma_i''' - C_2 - C_7}{E_6} \quad (8)$$

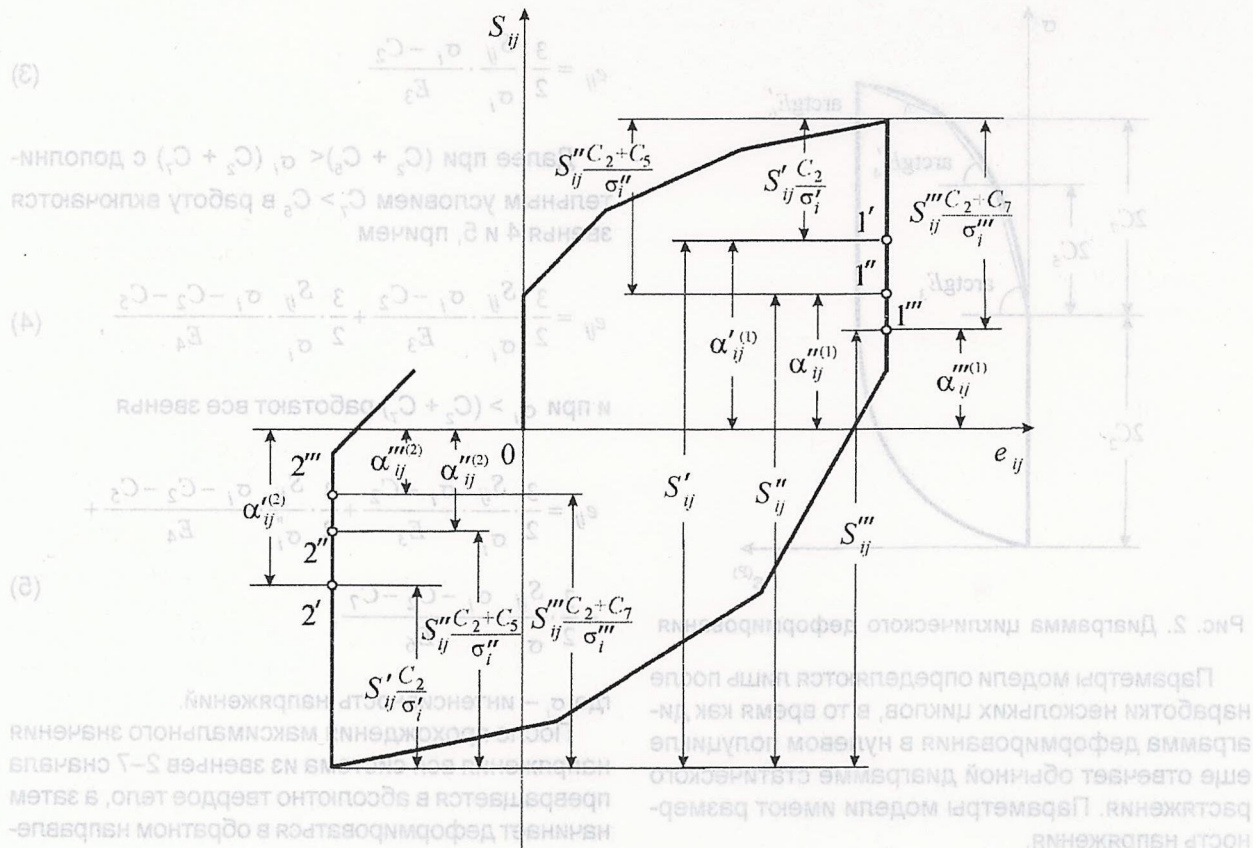


Рис. 3. Расчетная диаграмма циклического деформирования при сложном напряженном состоянии

Здесь $S'_{ij}, S''_{ij}, S'''_{ij}, \sigma'_i, \sigma''_i, \sigma'''_i$ — компоненты девиатора напряжений и интенсивности напряжений, отсчитываемые от состояния разгрузки звеньев 2, 5 и 7 соответственно. Эти величины можно представить в виде

$$\begin{aligned} S'_i &= S_{ij} - \alpha'_{ij}{}^{(k)}; \\ S''_i &= S_{ij} - \alpha''_{ij}{}^{(k)}; \\ S'''_i &= S_{ij} - \alpha'''_{ij}{}^{(k)}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_i &= \sqrt{\frac{3}{2} \sum (S'_i)^2}; \\ \sigma''_i &= \sqrt{\frac{3}{2} \sum (S''_i)^2}; \\ \sigma'''_i &= \sqrt{\frac{3}{2} \sum (S'''_i)^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

где S_{ij} — компоненты девиатора напряжений, определяемые относительно исходной координаты, $\alpha'_{ij}{}^{(k)}, \alpha''_{ij}{}^{(k)}, \alpha'''_{ij}{}^{(k)}$ — ординаты новых начал отсчета (рис. 3) для k -го полуцикла, откладываемые от исходной системы отсчета, находятся по формулам

$$\begin{aligned} \alpha'_{ij}{}^{(k)} &= \alpha'_{ij}{}^{(k-1)} + S'_{ij}{}^{(k-1)} \left(1 - \frac{C_2}{\sigma_i} \right); \\ \alpha''_{ij}{}^{(k)} &= \alpha''_{ij}{}^{(k-1)} + S''_{ij}{}^{(k-1)} \left(1 - \frac{C_2 + C_5}{\sigma_i} \right); \\ \alpha'''_{ij}{}^{(k)} &= \alpha'''_{ij}{}^{(k-1)} + S'''_{ij}{}^{(k-1)} \left(1 - \frac{C_2 + C_7}{\sigma_i} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Данная методика позволяет строить диаграммы пластического деформирования для каждого компонента девиатора напряжений S_{ij} на основе исходной информации, полученной при испытании образцов на малоцикловую усталость при одноосном напряженном состоянии.

В общем случае непропорционального нагружения весь путь нагружения разбивается на ряд участков, в пределах каждого из которых нагружение является пропорциональным. При переходе к каждому очередному участку в зависимости от значений $\sigma'_i, \sigma''_i, \sigma'''_i$ производится разгрузка и определяются новые значения координат (11).

Для апробации применимости модели использовались результаты экспериментов упругоплас-

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

тического деформирования стали 45, взятые из литературы. Проведено сопоставление опытных и расчетных диаграмм для путей деформирования в виде двухзвенных ломаных, для деформирования по круговым траекториям в плоскости

$\varepsilon_x - \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{\theta x}$ и для нагружения по спиральной траектории в пространстве напряжений Ильюшина. При этом можно сделать следующий вывод о том, что для материалов с изотропно-кинематическим упрочнением в сложных условиях нагружения модель с применением C_2 дает более удовлетворительные результаты.

Далее обобщим методику, рассмотренную ранее, на такой общий случай, когда температура изменяется плавно по любому закону по времени.

Согласно структурной модели (рис. 1), расчет при сложном термомеханическом нагружении ведется следующим образом. Если приращение интенсивности напряжений в соответствующих звеньях модели отрицательно от состояния их текучести, т.е. $d\sigma_i^{(k)} < 0$, $d\sigma_i^{''(k)} < 0$, $d\sigma_i^{'''(k)} < 0$, то тогда деформация имеет только упругую составляющую в виде

$$e_{ij}^{(k)} = \frac{1+\nu(T)}{E_1(T)} S_{ij}^{(k)}, \quad (12)$$

где $\nu(T)$ и $E_1(T)$ – коэффициент Пуассона и модуль упругости для соответствующей температуры; T ; $S_{ij}^{(k)}$ – компонента девиатора напряжений в k -й точке относительно исходной координаты.

Согласно рассматриваемой модели, приращение интенсивности напряжений в звеньях для k -го интервала (точки) находят по зависимостям:

$$d\sigma_i^{(k)} = \sigma_i^{(k)} - C_2^{(k)}(T);$$

$$d\sigma_i^{''(k)} = \sigma_i^{''(k)} - (C_2^{(k)}(T) + C_3^{(k)}(T)); \quad (13)$$

$$d\sigma_i^{'''(k)} = \sigma_i^{'''(k)} - (C_2^{(k)}(T) + C_7^{(k)}(T)).$$

Здесь $C_2^{(k)}(T)$, $C_3^{(k)}(T)$ и $C_7^{(k)}(T)$ – параметры модели в k -й точке для соответствующей температуры T ; $\sigma_i^{(k)}$, $\sigma_i^{''(k)}$ и $\sigma_i^{'''(k)}$ – интенсивности напряжений в k -й точке для соответствующих звеньев модели, определяемые от состояния их разгрузки в $(k-1)$ -й точке, по выражениям:

$$\sigma_i^{(k)} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{ij} (S_{ij}^{(k)})^2};$$

$$\sigma_i^{''(k)} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{ij} (S_{ij}^{''(k)})^2}; \quad (14)$$

$$\sigma_i^{'''(k)} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{ij} (S_{ij}^{'''(k)})^2};$$

где $S_{ij}^{(k)}$, $S_{ij}^{''(k)}$ и $S_{ij}^{'''(k)}$ – соответствующие компоненты девиатора напряжений в k -м интервале, отсчитываемых от состояния разгрузки соответствующих элементов модели. При этом их значения находят в виде:

$$S_{ij}^{(k)} = S_{ij}^{(k-1)} - [\alpha_{ij}^{(k-1)} + \lambda_{ij}^{(k-1)} d\sigma_i^{(k-1)}];$$

$$S_{ij}^{''(k)} = S_{ij}^{''(k-1)} - [\alpha_{ij}^{''(k-1)} + \lambda_{ij}^{''(k-1)} d\sigma_i^{''(k-1)}]; \quad (15)$$

$$S_{ij}^{'''(k)} = S_{ij}^{'''(k-1)} - [\alpha_{ij}^{'''(k-1)} + \lambda_{ij}^{'''(k-1)} d\sigma_i^{'''(k-1)}];$$

где $\alpha_{ij}^{(k-1)}$, $\alpha_{ij}^{''(k-1)}$ и $\alpha_{ij}^{'''(k-1)}$ – ординаты новых начал отсчета, характеризующие остаточные микронапряжения относительно исходной системы отсчета для $(k-1)$ -й точки (интервала). При этом значения $k = 1, 2, 3, \dots$, когда имеем $k = 1$, остаточные микронапряжения равны нулю, т.е. $\alpha_{ij}^{(k-1)} = \alpha_{ij}^{''(k-1)} = \alpha_{ij}^{'''(k-1)} = 0$, что соответствует исходному состоянию материала.

Соответствующие коэффициенты пропорциональности в звеньях модели в $(k-1)$ -й точке разгрузки $\lambda_{ij}^{(k-1)}$, $\lambda_{ij}^{''(k-1)}$ и $\lambda_{ij}^{'''(k-1)}$ определяются по следующим соотношениям:

$$\lambda_{ij}^{(k-1)} = \frac{S_{ij}^{(k-1)}}{\sigma_i^{(k-1)}};$$

$$\lambda_{ij}^{''(k-1)} = \frac{S_{ij}^{''(k-1)}}{\sigma_i^{''(k-1)}}; \quad (16)$$

$$\lambda_{ij}^{'''(k-1)} = \frac{S_{ij}^{'''(k-1)}}{\sigma_i^{'''(k-1)}}.$$

В случае, когда в k -й точке сложного термомеханического нагружения приращение интенсивности напряжений в первом звене модели положительно от состояния их текучести, а в других звеньях отрицательны или равны 0, тогда приращение компонентов пластических деформаций определяется в виде

$$de_{ij}^{(k)} = \frac{3}{2} \lambda_{ij}^{(k)} de_{ij}^{(k)}, \quad (17)$$

а полная упругопластическая деформация в k -й точке имеет следующее выражение

$$e_{ij}^{(k)} = \frac{1+\nu(T)}{E_1(T)} S_{ij}^{(k)} + \frac{3}{2} \lambda_{ij}^{(k)} de_{ij}^{(k)}, \quad (18)$$

где $de_i^{(k)}$ – приращение интенсивности пластических деформаций в k -й точке первого звена модели, определяемое согласно модели по формуле

$$de_i^{(k)} = \frac{d\sigma_i^{(k)}}{E_3(T, d\sigma_i^{(k)})}. \quad (19)$$

Здесь $E_3(T, d\sigma_i^{(k)})$ – параметр упругого элемента первого звена модели.

Если в k -й точке имеем $d\sigma_i^{(k)} > 0$ и $d\sigma_i^{''(k)} > 0$, а $d\sigma_i^{'''(k)} < 0$, т.е. приращение интенсивности пластических деформаций положительно в двух первых звеньях от состояния разгрузки, а в третьем еще отрицательны, тогда приращения компонентов девиатора пластических деформаций равно

$$de_{ij}^{(k)} = \frac{3}{2} [\lambda_{ij}^{(k)} de_i^{(k)} + \lambda_{ij}^{''(k)} de_i^{''(k)}], \quad (20)$$

а полная упругопластическая деформация

$$e_{ij}^{(k)} = \frac{1+\nu(T)}{E_1(T)} S_{ij}^{(k)} + \frac{3}{2} [\lambda_{ij}^{(k)} de_i^{(k)} + \lambda_{ij}^{''(k)} de_i^{''(k)}]. \quad (21)$$

Здесь приращение интенсивности пластических деформаций для второго звена модели находят в виде

$$de_i^{''(k)} = \frac{d\sigma_i^{''(k)}}{E_4(T, d\sigma_i^{''(k)})}, \quad (22)$$

где $E_4(T, d\sigma_i^{''(k)})$ – параметр упругого элемента второго звена модели.

И, наконец, если в k -й точке сложного термомеханического нагружения имеем $d\sigma_i^{'''(k)} > 0$, то в этом случае работают все звенья структурной модели материала. При этом имеем следующее выражение приращений компонентов пластических деформаций k -й точки

$$de_{ij}^{(k)} = \frac{3}{2} [\lambda_{ij}^{(k)} de_i^{(k)} + \lambda_{ij}^{''(k)} de_i^{''(k)} + \lambda_{ij}^{'''(k)} de_i^{'''(k)}]. \quad (23)$$

Полная деформация получится в виде

$$e_{ij}^{(k)} = \frac{1+\nu(T)}{E_1(T)} S_{ij}^{(k)} + \frac{3}{2} [\lambda_{ij}^{(k)} de_i^{(k)} + \lambda_{ij}^{''(k)} de_i^{''(k)} + \lambda_{ij}^{'''(k)} de_i^{'''(k)}]. \quad (24)$$

Здесь

$$de_i^{'''(k)} = \frac{d\sigma_i^{'''(k)}}{E_6(T, d\sigma_i^{'''(k)})}, \quad (25)$$

где $E_6(T, d\sigma_i^{'''(k)})$ – параметр упругого элемента третьего звена модели.

Постоянные E_3, E_4, E_6 и C_2, C_5, C_7 модели при термомеханическом нагружении определяются из опытов на циклическое растяжение–сжатие при различных постоянных температурах, откуда и получают зависимости $E_k(T)$ и $C_k(T)$.

Для проверки предлагаемой методики построения расчетных петель макропластического гистерезиса при сложном термомеханическом нагружении были проведены эксперименты на тонкостенных образцах стали 12Х18Н10Т в условиях линейного (растяжение–сжатие) и сложного напряженного состояния (растяжение–сжатие с кручением). Режимы термомеханического нагружения были как стационарными, так и нестационарными.

Тепловое нагружение соответствовало возможностью используемой испытательной машины УМЭ-10ТМ. Нагрев образца осуществлялся двумя электропечами индукционного типа, которые давали возможность равномерно распределять температуру по длине рабочей части образца, длина которого составляла 50 мм. Печи включались одновременно с механическими блоками машины, причем температура повышалась от комнатной до 673 К, затем печи отключались и образец охлаждался до комнатной температуры и т.д. Один температурный цикл отвечал приблизительно 310 циклам механического нагружения.

Были проведены три серии опытов с симметричным мягким режимом нагружения образца с доведением его до разрушения. Первая серия экспериментов соответствовала следующим условиям: растяжение–сжатие, стационарный режим нагружения (табл. 2). Вторая серия – растяжение–сжатие с одновременным кручением, стационарный режим нагружения (табл. 3). Третья серия – растяжение–сжатие с одновременным кручением, нестационарный ступенчатый режим нагружения (табл. 4).

Таблица 2
Результаты опытов при стационарном термомеханическом нагружении

№ опыта	σ_{\max} , МПа $R_{\sigma} = -1$	$T(N), K$	N_P , цикл
1	310	293↔673	388
2	340	293↔673	225
3	400	293→673	87
4	400	293→673	83
5	420	293→673	50
6	360	293↔673	260

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

Таблица 3
Результаты опытов при стационарном сложном термомеханическом нагружении

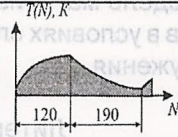
№ опыта	σ_{xx} , МПа $R_\sigma = -1$	$\tau_{x\theta}(\theta_x)$, МПа $R_\tau = -1$	$T(N), K$ 	N_p , цикл
7	242	187	293↔673	81
8	224	173	293↔673	135
9	209	161	293↔673	156
10	190	147	293↔673	462
11	190	147	293↔673	493
12	183	141	293↔673	866
13	198	152	293↔673	340
14	211	162	293↔673	143

Таблица 4
Результаты опытов при нестационарном сложном ступенчатом термомеханическом нагружении

№ опыта	№ ступени	σ_{xx} , МПа $R = -1$	$\tau_{x\theta}(\theta_x)$, МПа $R = -1$	$T(N), K$ 	N_k , цикл
15	I	183	141	293↔673	310
	II	198	152	293↔673	120
16	I	190	147	293↔673	160
	II	190	147	673 (const)	74
17	I	190	147	293↔673	120
	II	190	147	673 (const)	174
18	I	183	141	293↔673	120
	II	183	141	673 (const)	300
	III	183	141	293↔673	190
	IV	183	141	293↔673	120
	V	183	141	673 (const)	17

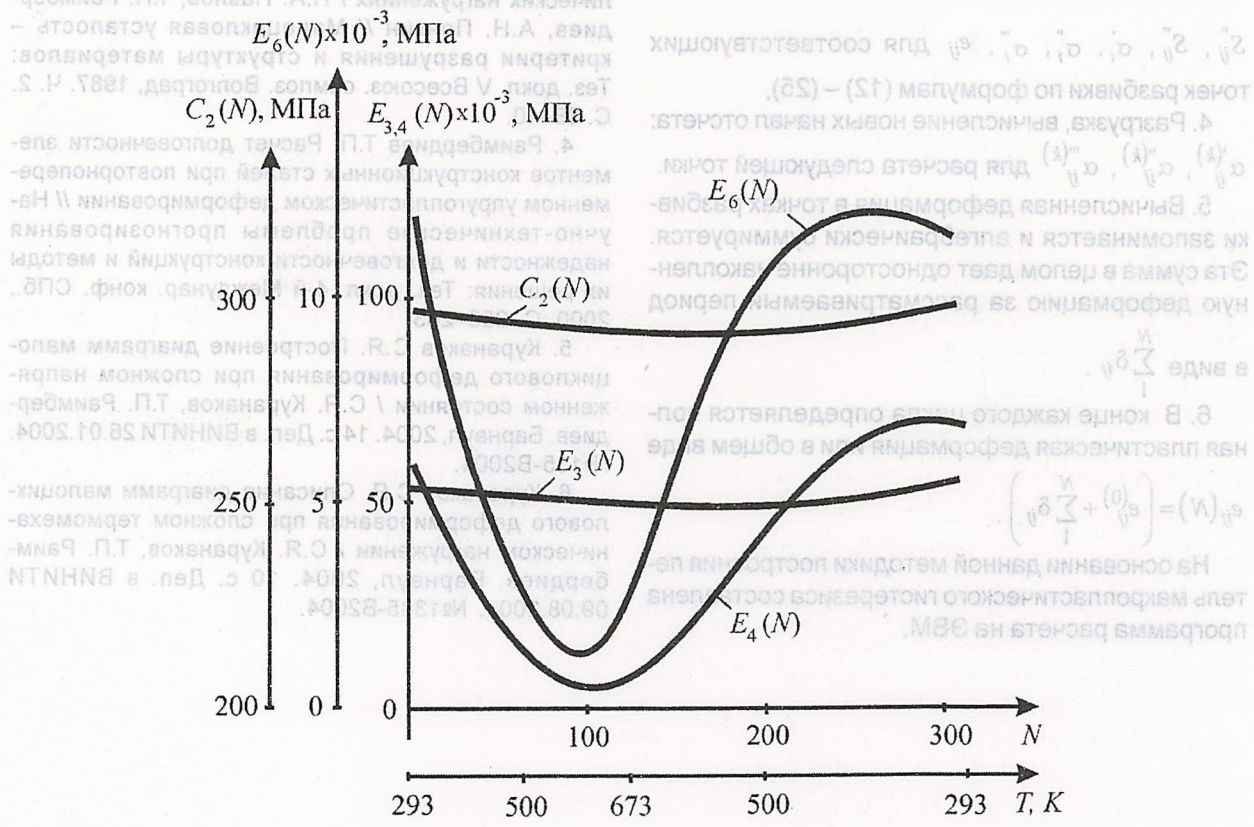


Рис. 4. Аппроксимирующие кривые $E_k(N)$ и $C_k(N)$ для стали 12X18H10T

Параметры модели определялись из опытов на циклическое растяжение-сжатие. Для удобства расчета значения параметров модели C_5 и C_7 оставались постоянными, т.е. $C_5(T) = 76$ МПа, $C_7(T) = 118$ МПа. Зависимости от температуры других параметров модели $E_3(T)$, $E_4(T)$, $E_6(T)$ и $C_2(T)$ для стали 12X18H10T приведены на рисунке 4. При этом температура выражалась функ-

цией числа циклов N , так что постоянные E_k и C_k также оказывались функциями N (рис. 4). В пределах одного цикла нагружения температура считалась постоянной. Аналитические выражения параметров уравнения представлялись при этом в виде:

$$E_3(N) = 55000 - 10000 \sin[(N-1)\pi/310];$$

$$E_4(N) = 65000 - 46200 \sin[(N-1)\pi/310] - 23100 \sin[2(N-1)\pi/310];$$

$$E_6(N) = 12000 - 7500 \sin[(N-1)\pi/310] - 5200 \sin[2(N-1)\pi/310];$$

$$C_2(N) = 295 - 10 \sin[(N-1)\pi/310]. \quad (26)$$

Для построения петель макропластического гистерезиса при сложном термомеханическом нагружении предлагается следующий алгоритм расчета на ЭВМ:

1. Ввод исходных данных: σ_{ij} , изменяющихся во времени по определенным циклическим законам; параметры $C_k(N)$, $E_k(N)$, шаг разбивки π/k .

2. Для цикла $N = N + 1$ вычисление параметров $C_k(N)$, $E_k(N)$ по формулам (26).

3. Расчет σ_{ij} , S_{ij} – по заданному закону и S'_{ij} ,

S''_{ij} , S'''_{ij} , σ'_i , σ''_i , σ'''_i , e_{ij} для соответствующих точек разбивки по формулам (12) – (25).

4. Разгрузка, вычисление новых начал отсчета: $\alpha_{ij}^{(k)}$, $\alpha_{ij}^{(k)}$, $\alpha_{ij}^{(k)}$ для расчета следующей точки.

5. Вычисленная деформация в точках разбивки запоминается и алгебраически суммируется. Эта сумма в целом дает односторонне накопленную деформацию за рассматриваемый период

$$\text{в виде } \sum_1^N \delta_{ij}.$$

6. В конце каждого цикла определяется полная пластическая деформация или в общем виде

$$e_{ij}(N) = \left(e_{ij}^{(0)} + \sum_1^N \delta_{ij} \right).$$

На основании данной методики построения петель макропластического гистерезиса составлена программа расчета на ЭВМ.

Покомпонентное сравнение построенных расчетных и экспериментальных диаграмм деформирования позволяет сделать вывод о том, что структурная модель материала пригодна к описанию процессов в условиях сложного термомеханического нагружения.

Литература

1. Пенкин А.Н. Малоцикловая усталость конструкционной стали при сложном напряженном состоянии: Автореф. дис... канд. техн. наук. Л., 1985. 16 с.
2. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.
3. Павлов П.А. Малоцикловая усталость при сложном напряженном состоянии и нестационарных циклических нагружениях / П.А. Павлов, Т.П. Раимбердиев, А.Н. Пенкин // Малоцикловая усталость – критерии разрушения и структуры материалов: Тез. докл. V Всесоюз. симпоз. Волгоград, 1987. Ч. 2. С. 38–40.
4. Раимбердиев Т.П. Расчет долговечности элементов конструкционных сталей при повторнопеременном упругопластическом деформировании // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Тез. докл. 4-й Междунар. конф. СПб., 2000. С. 259–263.
5. Куранаков С.Я. Построение диаграмм малоциклового деформирования при сложном напряженном состоянии / С.Я. Куранаков, Т.П. Раимбердиев. Барнаул, 2004. 14 с. Деп. в ВИНТИ 26.01.2004. №135-B2004.
6. Куранаков С.Я. Описание диаграмм малоциклового деформирования при сложном термомеханическом нагружении / С.Я. Куранаков, Т.П. Раимбердиев. Барнаул, 2004. 10 с. Деп. в ВИНТИ 09.08.2004. №1385-B2004.

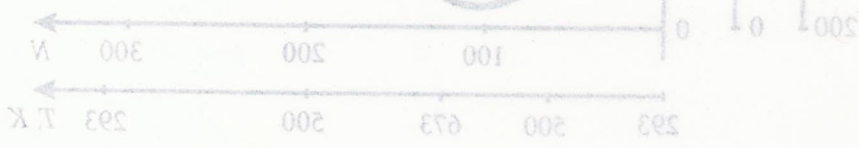


Рис. 4. Аппроксимированные кривые $E_6(N)$ и $C_2(N)$ для стали 12Х18Н10Т

В работе использованы следующие обозначения: $E_6(N)$ – модуль упругости; $C_2(N)$ – коэффициент пропорциональности; σ_{ij} – напряжение; S_{ij} – пластическая деформация; S'_{ij} , S''_{ij} , S'''_{ij} – производные пластической деформации; $\alpha_{ij}^{(k)}$ – параметры разбивки; δ_{ij} – приращение деформации; $e_{ij}(N)$ – полная деформация.

В работе использованы следующие обозначения: $E_6(N)$ – модуль упругости; $C_2(N)$ – коэффициент пропорциональности; σ_{ij} – напряжение; S_{ij} – пластическая деформация; S'_{ij} , S''_{ij} , S'''_{ij} – производные пластической деформации; $\alpha_{ij}^{(k)}$ – параметры разбивки; δ_{ij} – приращение деформации; $e_{ij}(N)$ – полная деформация.