УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ С КИНЕМАТИЧЕСКИМ И ИЗОТРОПНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

© И. А. Волков [1)], С.Н. Пичков [2)], Д.Н. Шишулин [1)]
[1)] *ВГАВТ, Нижний Новгород, Россия*
[2)] *ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия.*
pmptmvgavt@yandex.ru

Аннотация. *Проведен обзор основных экспериментальных методик определения материальных параметров математической теории пластичности с кинематическим и изотропным упрочнением. Разработана экспериментально-теоретическая методика определения материальных параметров и скалярных функций теории пластичности с кинематическим и изотропным упрочнением. Проведены эксперименты по одноосному растяжению-сжатию лабораторных образцов стали 08Х18Н10Т, определены материальные параметры развитых определяющих термопластичности. Сделан вывод об адекватности предложенной методики и правильности нахождения материальных параметров определяющих соотношений.*

Ключевые слова: *термопластичность, экспериментально-теоретическая методика, базовый эксперимент, численное моделирование.*

1. Введение

Расчетная оценка прочности, долговечности, выработанного и остаточного ресурса конструктивных элементов, работающих в условиях термомеханического нестационарного нагружения (атомные энергетические установки, объекты химического машиностроения и др.), требует анализа процессов упругопластического деформирования конструкционных материалов, так как история упругопластического деформирования определяет темпы накопления повреждений и от адекватности моделирования данных процессов зависит точность расчетных оценок долговечности.

В настоящее время имеется достаточно большое количество публикаций посвященных проблемам моделирования процессов упругопластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов), однако остается много не решенных вопросов при практической реализации теоретических исследований, в частности практически отсутствуют публикации по методикам определения материальных параметров и скалярных функций эволюционных уравнений упругопластического деформирования. В имеющихся публикациях (см. например [4]) методики определения материальных параметров заключаются в «подборе» параметров путем минимизации отклонений результатов численного моделирования от экспериментальных данных, чем и гарантируется однозначность определения материальных параметров.

В данной работе для математической модели пластического течения с кинематическим и изотропным упрочнением, предложенной в [1] и описывающей процессы деформирования для произвольных сложных режимов нагружения, сопровождающихся вращением главных площадок тензоров напряжений и деформаций, развита экспериментально-теоретическая методика определения материальных параметров и скалярных функций определяющих соотношений теории пластичности.

2. Основные определяющие соотношения

Наиболее адекватной и практически используемой теорией пластического течения является теория, основанная на концепции изотропного и кинематического упрочнения. Ключевую роль в этой концепции играет поверхность текучести и ее изменение в процессе деформирования. Понятие поверхности текучести связано с выделением зоны допустимых состояний материала в пространстве девиатора тензора напряжений.

Основные положения рассматриваемого варианта уравнений термопластичности [1] заключаются в следующем:

– принимается, что компоненты девиатора тензора деформаций e'_{ij} и их приращений $\Delta e'_{ij}$ являются суммой упругих e'^{e}_{ij} и пластических e'^{p}_{ij} компонент;

– принимается пластическая несжимаемость материала (упругое изменение объема): $\Delta e^{p}_{ii} \equiv 0$;

– рассматриваются упругоизотропные среды, характеризуемые зависящим от температуры T модулем упругости Юнга $E(T)$, коэффициентом Пуассона $\nu(T)$, объемным модулем упругости $K(T)$ и объемным модулем сдвига $G(T)$;

– не учитывается анизотропия упругих свойств, вызванная процессом накопления повреждений;

– принимается, что поверхность текучести F_P в пространстве девиатора тензора напряжений представляет собой сферу с радиусом C_P и координатами центра ρ_{ij} (тензор микронапряжений ρ_{ij}) (рис. 1):

$$F_p = (\sigma'_{ij} - \rho_{ij})(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}) - C_p^2 = 0 \qquad (1)$$

где σ'_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений. Точка 0 обозначает начальное положение центра поверхности текучести F_{p0} с радиусом C_{p0} недеформированного материала. Радиус C_{p0} является функцией температуры.

Радиус поверхности текучести изменяется в зависимости от приращения $\Delta\chi$ длины дуги χ траектории пластического деформирования и приращения температуры согласно уравнениям [2]:

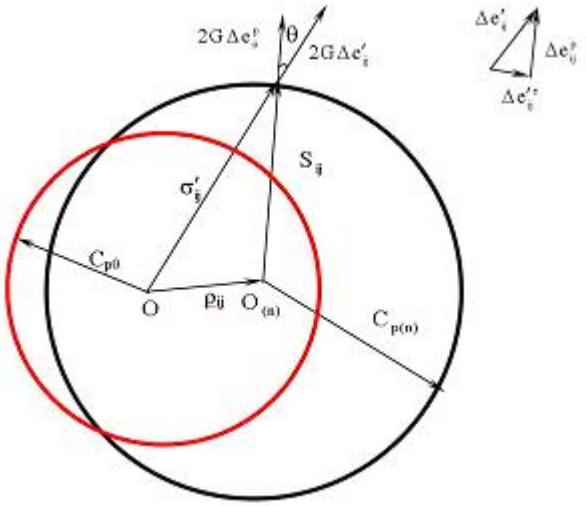


Рис. 1. Поверхность текучести в пространстве девиаторов напряжений.

$$\Delta C_p = \overline{q}_\chi \Delta\chi H(F_\rho) + q_T \Delta T + a_ц (\overline{Q}_s - C_p)\Delta\chi \Gamma(F_\rho) + \Delta C_{0T}; \quad (2)$$

$$C_p = C_{p0} + \sum \Delta C_p; \quad (3)$$

$$\overline{q}_\chi = \frac{q_c A \psi_1 + (1 - A) q_\chi}{\psi_1 A + (1 - A)}; \quad (4)$$

$$\overline{Q}_s = \frac{Q_c A \psi_2 + (1 - A) Q}{\psi_2 A + (1 - A)}; \quad (5)$$

$$F_\rho = \rho_{ij}\rho_{ij} - \rho^2_{\max} = 0; \quad (6)$$

$$H(F_p) = \begin{cases} 1 \text{ при } F_p = 0 \text{ и } \rho_{ij}\Delta\rho_{ij} \geqslant 0 \\ 0 \text{ при } F_p < 0 \text{ или } \rho_{ij}\Delta\rho_{ij} < 0 \end{cases}; \quad (7)$$

$$\Gamma(F_\rho) = 1 - H(F_\rho); \ \Delta\chi = \left(\frac{2}{3}\Delta e^p_{ij}\Delta e^p_{ij}\right)^{1/2};$$

$$\chi_m = \sum \Delta\chi H(F_\rho); \ \chi = \sum \Delta\chi; \quad (8)$$

$$A = 1 - \cos^2\theta; \ \cos\theta = n^e_{ij} n^s_{ij}; \ n^e_{ij} = \frac{\Delta e'_{ij}}{(\Delta e'_{mn}\Delta e'_{mn})^{1/2}}; \ n^s_{ij} = \frac{S_{ij}}{(S_{mn}S_{mn})^{1/2}}. \quad (9)$$

Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности текучести (тензора ρ_{ij}) имеет вид:

$$\Delta\rho_{ij} = g_1 \Delta e^p_{ij} - g_2 \rho_{ij}\Delta\chi - g_T \rho_{ij} < \Delta T > + g_{0T}\rho_{ij}, \quad (10)$$

$$g_T = \frac{\Delta g_1}{g_1 \Delta T} - \frac{\Delta g_2}{g_2 \Delta T} > 0; \quad (11)$$

$$g_T = 0 \text{ при } \Delta T \leqslant 0; \quad (12)$$

$$\Delta\rho_{\max} = \frac{(\rho_{ij}\Delta\rho_{ij})H(F_\rho)}{(\rho_{ij}\rho_{ij})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max}\Delta\chi - g_T \rho_{\max} < \Delta T > - g_{0T}\rho_{\max}. \quad (13)$$

Соотношения (6), (7) и (13) определяют изменение радиуса поверхности текучести и позволяют автоматически отделить циклическое нагружение от монотонного с помощью операторов $H(F_P)$ и $\Gamma(F_P)$.

Уравнения (1 – 13) как частный случай содержат все основные известные формы уравнений теории пластического течения при малых деформациях.

В наиболее распространенном расчетном конечно-элементном пакете Ansys при решении упругопластических задач на монотонное нагружение приемлемое описание НДС достигается, используя нелинейные зависимости для эволюции радиуса поверхности текучести и координат ее центра E. Voce [3] и J.L. Chaboche [4].

Уравнение поверхности текучести записывается в виде

$$F = \left[\frac{3}{2}\left(S_{ij} - \alpha_{ij}\right)\left(S_{ij} - \alpha_{ij}\right)\right]^{1/2} - R = 0 \qquad (14)$$

Уравнение для эволюции радиуса поверхности текучести (E.Voce [3])

$$R = k + R_0\hat{\varepsilon}^p + R_\infty\left(1 - e^{-b\bar{\varepsilon}^p}\right) \qquad (15)$$

$$\Delta R = \left(R_0 + R_\infty be^{-b\bar{\varepsilon}^p}\right)\Delta\hat{e}^p \qquad (16)$$

Уравнение для эволюции центра поверхности текучести (J.L.Chaboche [4])

$$\Delta\alpha_{ij} = \frac{2}{3}C_i\Delta e_{ij}^p - \gamma_i\alpha_{ij}\Delta\hat{\varepsilon}^p + \frac{1}{C_i}\frac{\partial C_i}{\partial T}\Delta\alpha_{ij} \qquad (17)$$

$$S_{ij} = \sigma'_{ij};\ \alpha_{ij} = \rho_{ij};\ \Delta\hat{\varepsilon}^p = \Delta\chi;\ \hat{\varepsilon}^p = \chi;\ R = \sqrt{\frac{3}{2}}\cdot C_P;\ k = \sqrt{\frac{3}{2}}\cdot C_{P0}$$

Уравнения (14 – 17) являются частным случаем уравнений (1 – 13) и описывают нелинейное кинематическое и изотропное упрочнение без учета циклического упрочнения при

$$q_\chi = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot(R_0 + R_\infty be^{-b\bar{\varepsilon}^p}),\ \frac{2}{3}C_1 = g_1,\ \gamma_1 = g_2 \text{ и } i = 1. \qquad (18)$$

3. Методика базовых экспериментов

Для определения указанных материальных параметров эволюционных уравнений (2 – 18) предлагается следующая система из специальных базовых экспериментов.

Эксперимент 1. Эксперимент по квазистатическому растяжению – сжатию цилиндрических лабораторных образцов путем жесткого нагружения с контролем остаточной деформации e_{11}^p на рабочей части образца при скоростях деформации $\dot{e}_{11} \sim 10^{-2}$ сек$^{-1}$ (рис. 2).

По результатам эксперимента при базовых постоянных температурах T_j определяются диаграмма деформирования (кривая 1 рис.2) и геометрическое место обратных пределов текучести при сжатии $\sigma_T^{/}$ (кривая 2 рис.2) с заданным допуском на остаточную деформацию Δ после растяжения до некоторых значений деформаций $\left(\left(e^{P1}\right)_{11}, \left(e^{P2}\right)_{11}, \ldots, \left(e^{Ph}\right)_{11}\right)$.

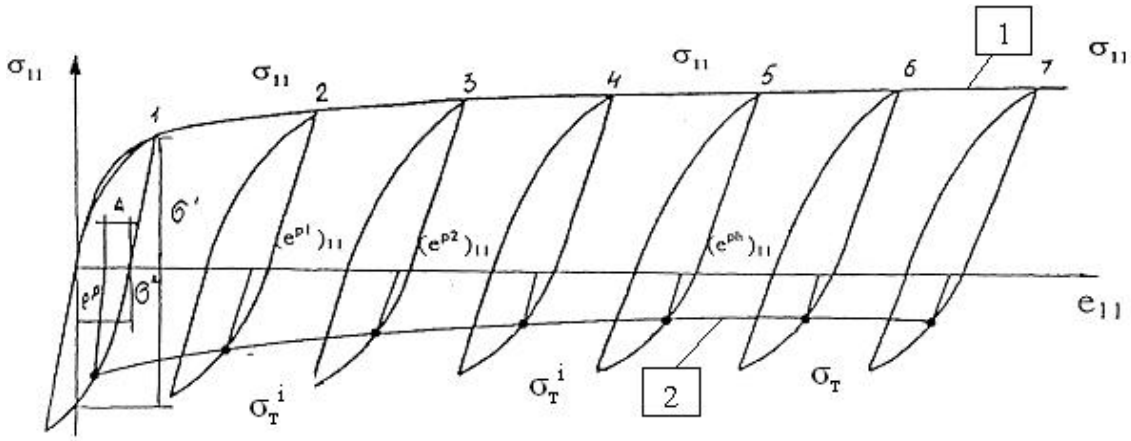


Рис. 2. Базовый эксперимент на термопластичность

С использованием экспериментальных кривых 1 и 2 получают экспериментальные зависимости напряжения при растяжении σ_{11} и обратных пределов текучести $\sigma_T^{(i)}$ от пластических деформаций e_{11}^p (рис. 3), а также функции $C_p(\chi)$, $\rho_{11}(\chi)$ при различных базовых температурах T_j.

В случае одноосного растяжения – сжатия $e_{11}^p = \chi$, где χ – относительная длина пути пластического деформирования.

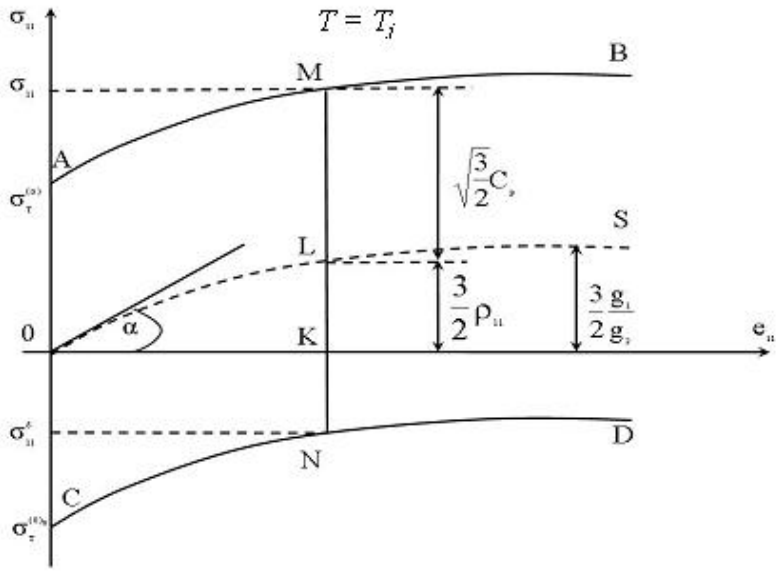


Рис. 3. Зависимость напряжения одноосного растяжения и обратных пределов текучести от пластической деформации

Для одноосного растяжения – сжатия уравнение поверхности текучести будет иметь вид:

$$\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_{11} - \sqrt{\frac{3}{2}}\rho_{11}\right) = C_p. \qquad (19)$$

Радиус поверхности текучести и координаты ее центра определятся как:

$$C_p = \sqrt{\frac{2}{3}}\frac{1+\delta}{2}\sigma_{11}; \quad C_{p_0} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_{T_0}; \qquad (20)$$

$$\rho_{11} = \frac{g_1}{g_2}\left(1 - e^{-g_2\chi}\right); \qquad (21)$$

где $\delta = \dfrac{\sigma_m^{(i)}}{\sigma_{11}}$.

Материальные параметры в уравнениях (2, 3, 10) описывающих монотонное упругопластическое деформирование определятся как:

$$g_1 = \frac{2}{3}\cdot tg\alpha\ ;\ g_2 = \frac{3}{2}\cdot\frac{g_1}{\rho_{11}^{\max}}\ ;\ \frac{g_1}{g_2} = \frac{2}{3}\cdot\rho_{11}^{\max}. \qquad (22)$$

g_1, g_2 – модули кинематического упрочнения;

$$q_\chi = \frac{\partial C_P(\chi)}{\partial \chi}. \qquad (23)$$

q_χ – модуль изотропного упрочнения при пропорциональном нагружении.

Модуль g_T, описывающий изменение координат центра поверхности текучести в связи с повышением температуры, определяется из (11 и 12), используя значения g_1, g_2 при базовых температурах T_j.

Материальные параметры данной модели термопластичности определяются для каждой выбранной базовой температуры T_j, для которой экспериментально определены кривые AB и CD (рис. 3). Для одной температуры испытываются не менее трех образцов.

Эксперимент 2. Проводятся испытания на одноосное, циклическое, блочное, жесткое, изотермическое нагружение с постоянной амплитудой деформации (полной или остаточной) в каждом блоке нагружения и возрастанием (убыванием) амплитуды деформации при переходе к следующему блоку (рис. 4).

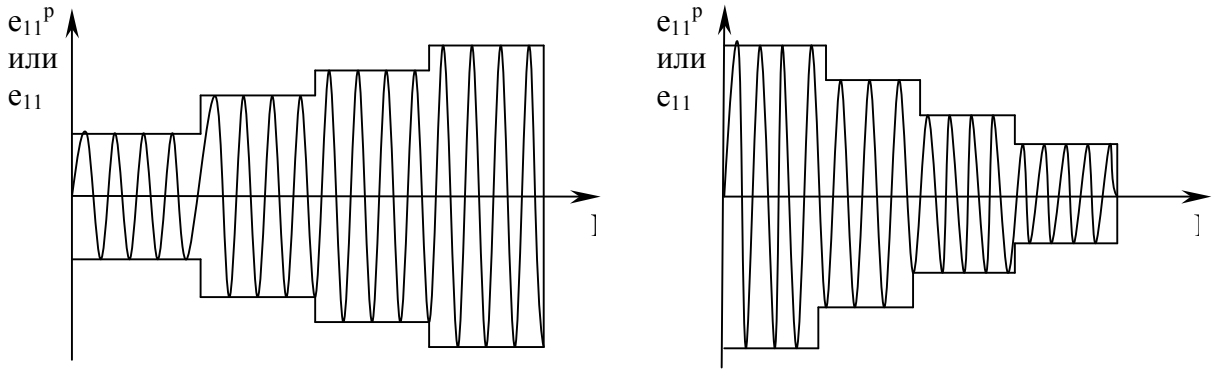


Рис. 4. Базовый эксперимент для определения материальных параметров циклического упругопластического деформирования

Число блоков нагружения при увеличении и уменьшении амплитуды деформации 3 – 6. Число циклов в каждом блоке определяется условием стабилизации параметров петли гистерезиса. Число повторных опытов при одинаковых наборах блоков нагружения не менее трех.

Для стабилизированной петли в каждом блоке определяются стабилизированное значение радиуса поверхности текучести $C_{pcm} = Q$ и $\rho_{\max}$ (рис.5). Параметр $a_ц$ определяется из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных закономерностей стремления C_p к установившемуся состоянию при циклическом деформировании с заданной постоянной амплитудой деформации e_{11}^a. При этом используется соотношение:

$$\Delta C_p^* = a_ц(\overline{Q}_S - C_p)\Delta\chi^* \qquad (24)$$

где ΔC_p^* – изменение C_p от начального состояния до стационарного значения, $\Delta\chi^*$ – длина траектории пластического деформирования до стационарного состояния. При одноосном растяжении – сжатии $\overline{Q}_S = Q$ ($\theta = 0$).

$$Q_{(i)} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_{11}^{\max} - \sqrt{\frac{3}{2}}\rho_{11}^{\max};\ T = T_j, \qquad (25)$$

В (25) $\rho_{11}^{\max}$ – максимальное расчетное значение ρ_{11} на i блоке нагружения при базовой температуре T_j. Модуль Q является функцией от $\rho_{\max}$. В случае одноосного растяжения-сжатия $\rho_{\max}$ определяется как:

$$\rho_{\max} = \sqrt{\frac{3}{2}}\rho_{11}^{\max}. \qquad (26)$$

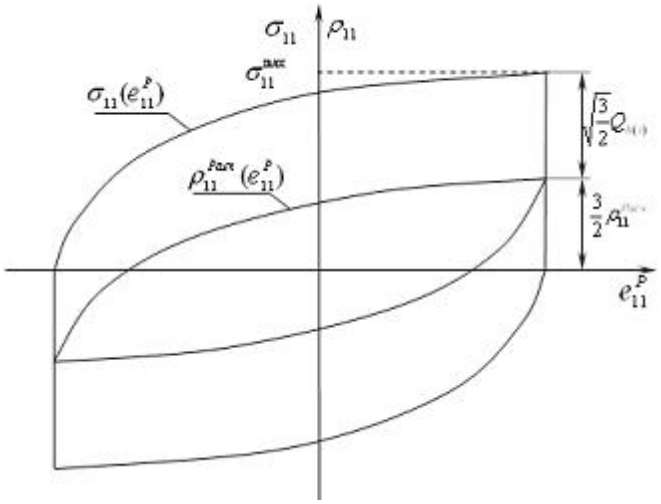


Рис. 5. Методика определения материальных параметров циклического упрочнения

Аналитическую зависимость $Q(\rho_{\max})$ получают путем аппроксимации экспериментальных (табличных) данных $Q_{(i)}(\rho_{\max(i)})$ при $T = T_j$.

Эксперимент 3. Для определения материального параметра $q_c(\chi_м, T)$ (4) необходим эксперимент на сложное изотермическое нагружение: растяжение до некоторого значения e_{11}^P и последующее кручение с построением траектории напряжений в пространстве $\sigma_{11} \sim \sigma_{12}$ и зависимости $\sigma_u \sim \chi_м$ Значение параметра $q_c(\chi_м, T)$ достаточно просто определяется из сравнения экспериментальных данных и численного моделирования аналогичного режима нагружения при различных q_c.

Эксперимент 4. Для определения в (5) необходим эксперимент на изотермическое циклическое деформирование по круговой траектории деформаций, имеющую постоянную кривизну во всех своих точках. Значение параметра $Q_c(\rho_{\max}, T)$ определяется из сравнения экспериментальных данных и численного моделирования аналогичного режима нагружения при различных Q_c.

4. Апробация и оценка адекватности методики

По разработанной методике были экспериментально получены материальные параметры математической модели пластического течения с кинематическим и изотропным упрочнением для стали аустенитного класса 08Х18Н10Т необходимых для моделирования процессов деформирования при пропорциональном нагружении, а также проведена оценка адекватности предложенной методики путем сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Лабораторные образцы (рис. 6) изготавливались из металла одной партии и плавки. Форма данного образца обеспечивает в рабочей части однородное распределение полей деформаций, напряжений и температур.

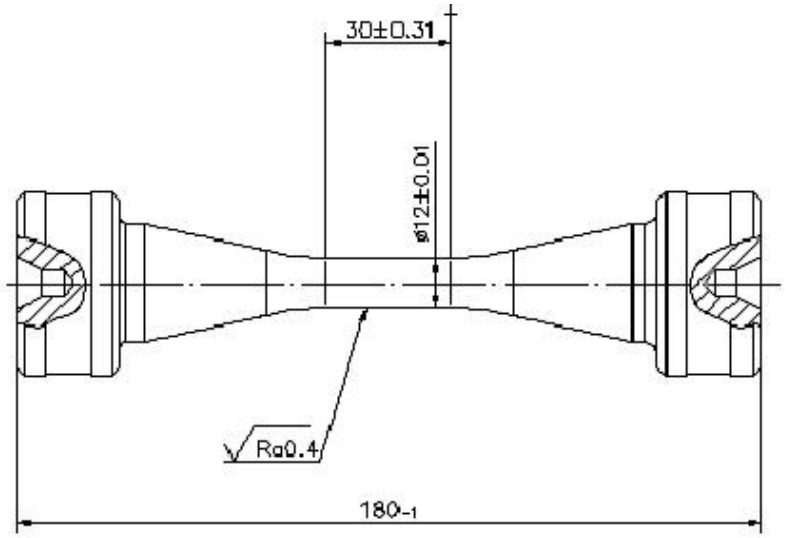


Рис. 6. Эскиз образца

Серия базовых экспериментов для расчета материальных параметров уравнений термопластичности проводилась при температуре 20 °С на универсальной испытательной машине МИУ-200.1КТ (предприятие – изготовитель НИКЦИМ Точмашприбор г.Армавир).

На основании полученных данных было проведено:

– численное моделирование базового эксперимента. На рисунке 7 представлены расчетная и экспериментальная диаграммы деформирования при одноосном растяжении – сжатии для образцов из стали 08Х18Н10Т;

– численное моделирование упругопластического деформирования при циклическом «жестком» одноосном нагружении с амплитудами полной деформации.

На рисунках 8, 9, 10 представлены зависимости максимальных амплитудных напряжений в цикле от количества циклов при моделировании циклических процессов. Точками отмечены данные, полученные в ходе проведения испытаний.

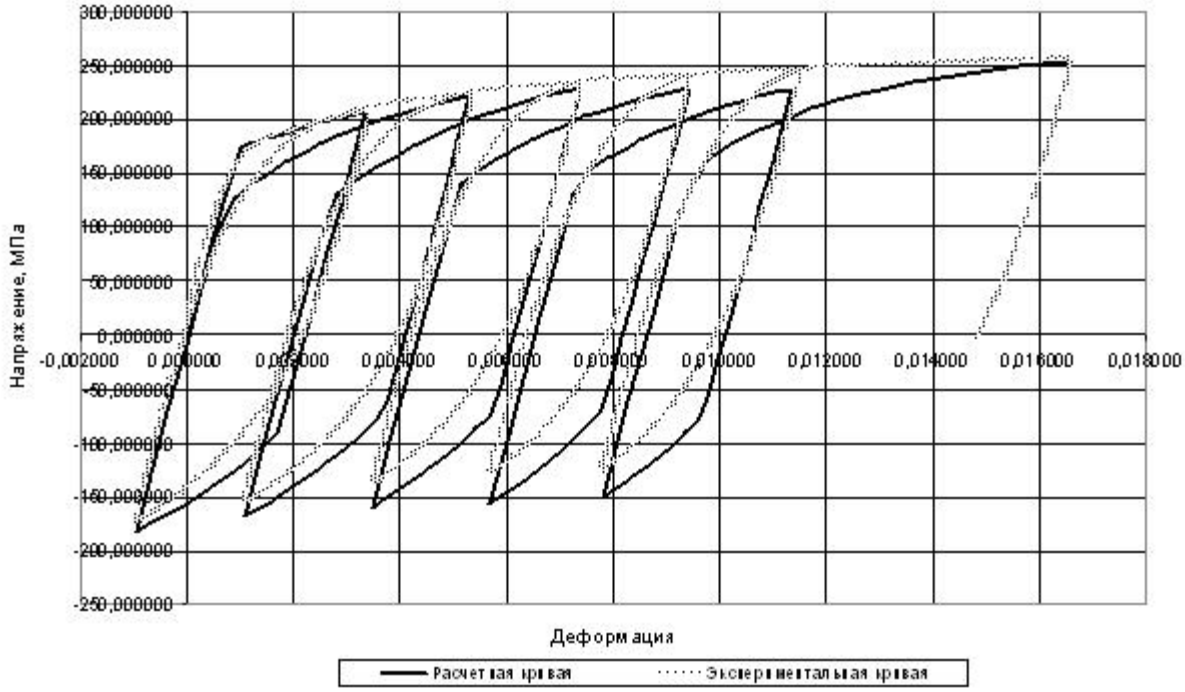


Рис. 7 – Моделирование базового эксперимента для образца из стали 08Х18Н10Т

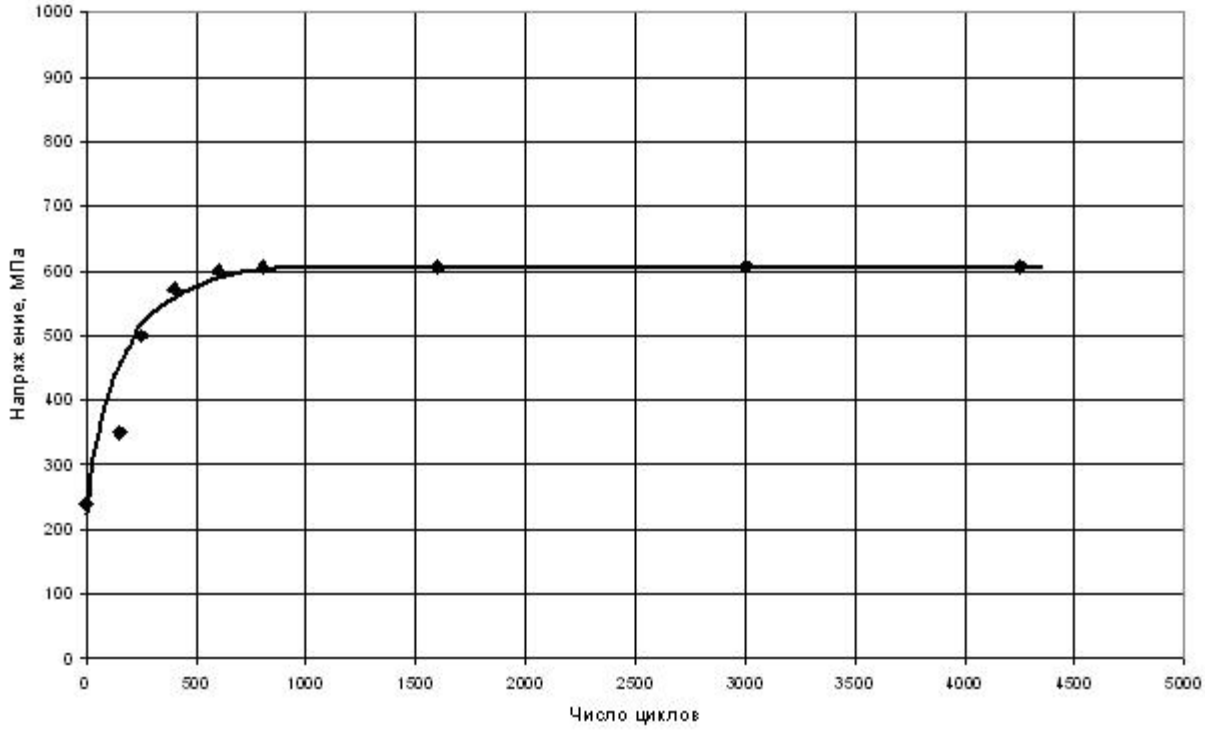


Рис. 8 – Зависимость максимальных амплитудных напряжений в цикле от количества циклов при амплитуде деформации 0,470 %.

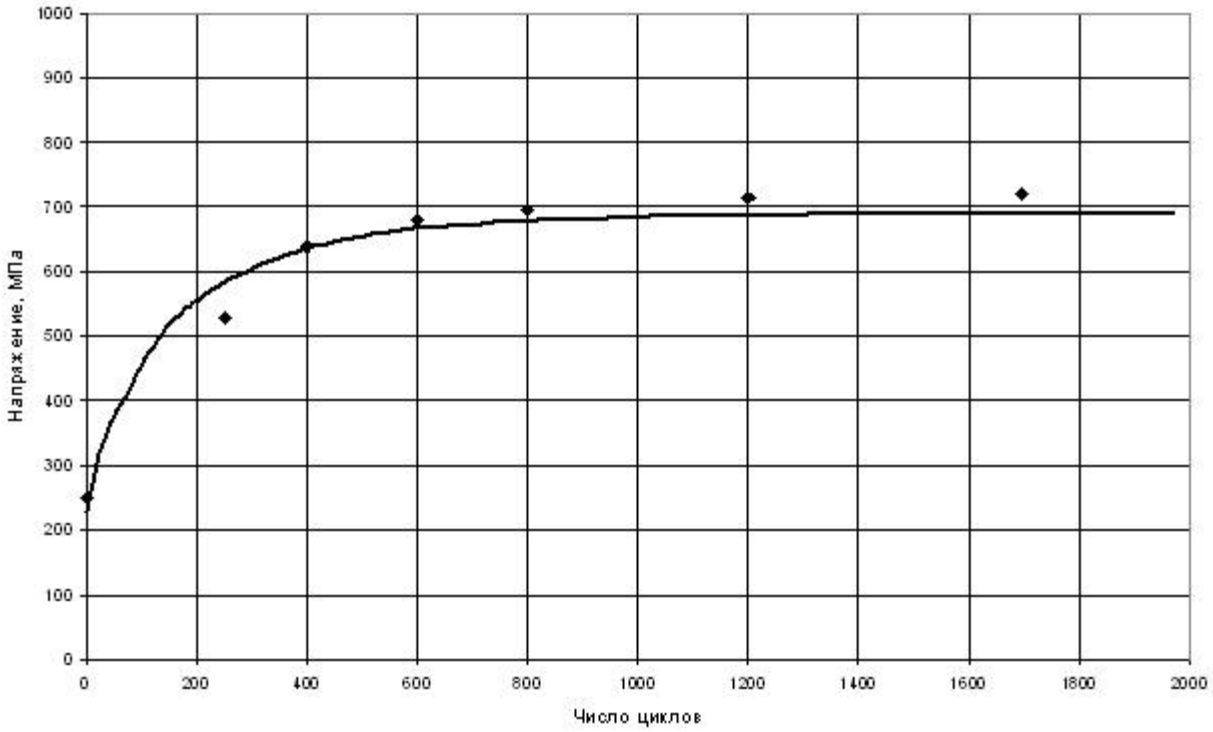


Рис. 9 – Зависимость максимальных амплитудных напряжений в цикле от количества циклов при амплитуде деформации 0,565 %.

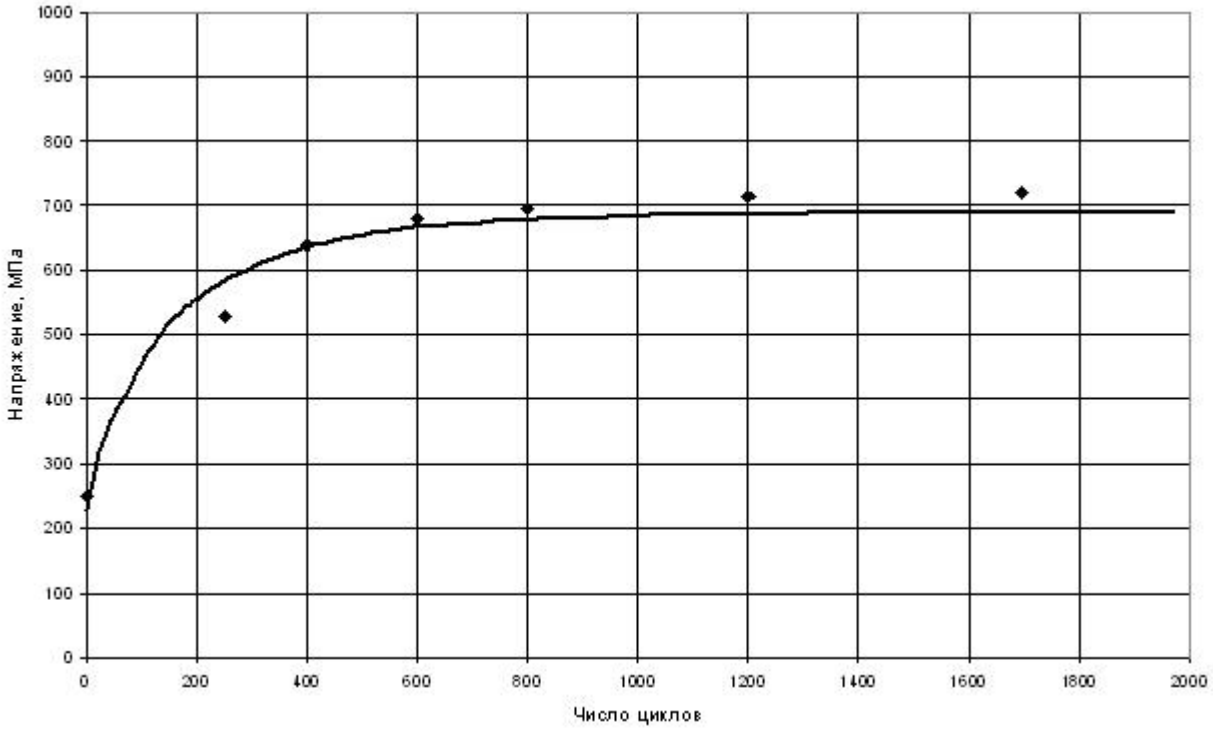


Рис. 10 – Зависимость максимальных амплитудных напряжений в цикле от количества циклов при амплитуде деформации 0,770 %.

На рисунках 11, 12, 13 представлены расчетные и экспериментальные петли гистерезиса на первых циклах нагружения.

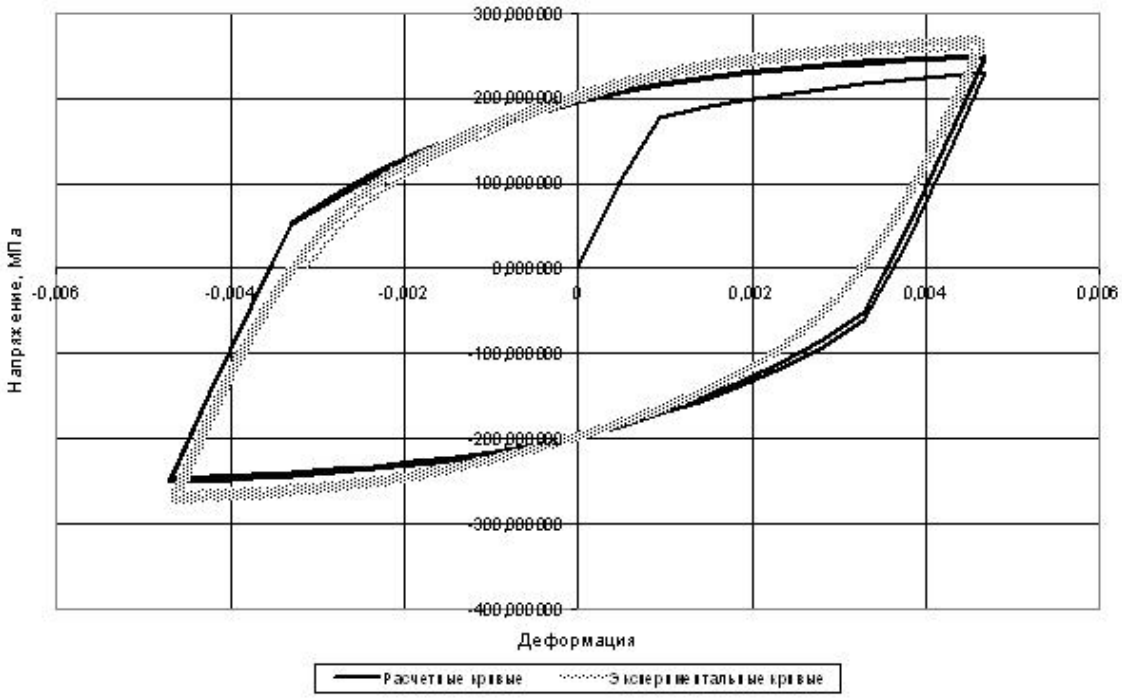


Рис. 11 – Моделирование первых циклов нагружения при МЦУ. Амплитуда деформации 0,470 %.

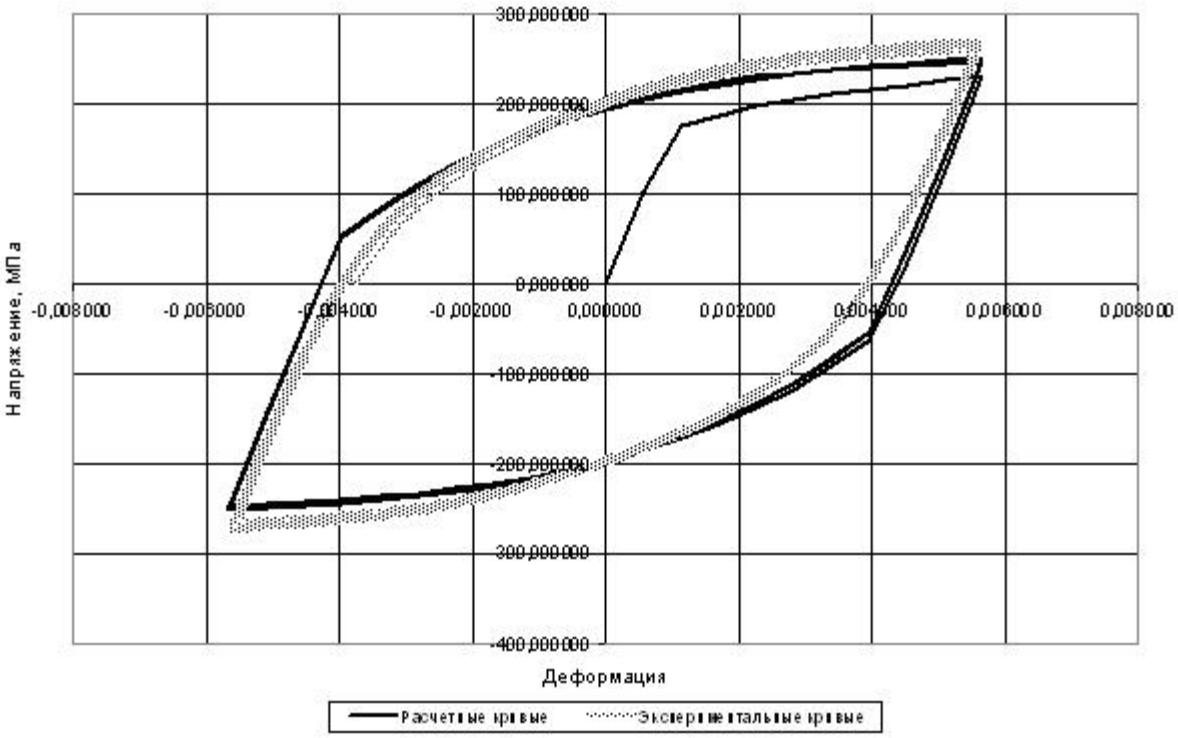


Рис. 12 – Моделирование первых циклов нагружения при МЦУ. Амплитуда деформации 0,565 %.

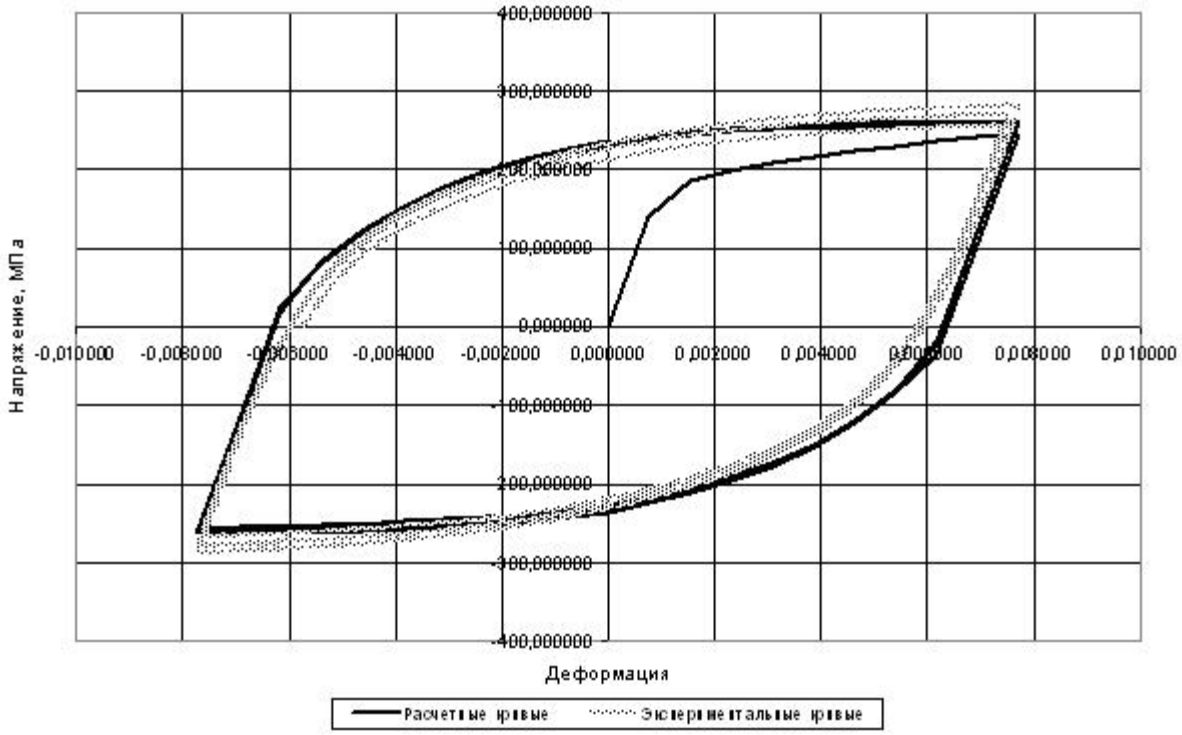


Рис. 13 – Моделирование первых циклов нагружения при МЦУ. Амплитуда деформации 0,770 %.

5. Заключение

Анализируя экспериментальные кривые и сравнивая их с расчетными, можно сделать вывод об адекватности предложенной методики и правильности определения материальных параметров используемых зависимостей термопластичности для случая одноосного растяжения-сжатия.

Литература

1. И.А. Волков, Ю.Г. Коротких Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008 – 422с.
2. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1968.–420с.
3. Voce, E., "Metallurgica", Col. 51, pp. 219 (1955).
4. Chaboche, J.L., "On Some Modifications of Kinematic Hardening to Improve the Description of Ratcheting Effects", International Journal of Plasticity, Vol. 7, pp. 661-678 (1991).

Поступила: 03.02.11.