

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ 9Х2 ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ*

© 2013 г. Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, А.И. Волков, И.С. Тарасов

Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород

pmpmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.09.2013

Для оценки достоверности и определения границ применимости определяющих соотношений вязкопластичности для сложных траекторий знакопеременного нагружения проведены численные исследования эффекта «циклической ползучести» («ратчеттинга») и выполнено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов. Показано, что развитая авторами модель вязкопластического деформирования качественно и количественно описывает основные эффекты сложного вязкопластического деформирования при произвольных сложных путях непропорционального нагружения.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, циклическая ползучесть, определяющие соотношения, материальные параметры, знакопеременное нагружение, жесткое нагружение, мягкое нагружение.

Введение

Характер вязкопластического деформирования конструкционных материалов (вид траектории деформирования, изменение механической нагрузки и температуры, вид напряженного состояния, история его изменения и т.п.) существенно влияет на скорости протекания процессов накопления повреждений [1–4]. В работах [4–6] разработана математическая модель вязкопластичности, описывающая процессы неупругого деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) для произвольных сложных траекторий деформирования. В настоящей статье путем сопоставления с имеющимися в литературе экспериментальными данными дается оценка применимости развитых в этих работах определяющих соотношений для описания эффекта «циклической ползучести» («ратчеттинга») при сложном знакопеременном нагружении.

Сравнение численных результатов с экспериментальными данными

При эксплуатации тонкостенных конструкций, таких как, например, трубы, сосуды высокого давления и др., в процессе циклического нагружения наблюдается явление накопления односторонних деформаций. Этот эффект получил название

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00204-а).

«циклической ползучести» или «ратчеттинга» («тренинга»). Он проявляется в экспериментах на мягкое нагружение при нагружении циклически анизотропных материалов либо при асимметричном нагружении изотропных материалов [7–9].

Испытания, в которых круговые тонкостенные цилиндрические оболочки подвергались воздействию силы и крутящего момента, проведены на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ, разработанном на базе модернизированной для кинематического типа нагружения испытательной машины ЦДМУ-30 [10] в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета под общим руководством профессора В.Г. Зубчанинова. С целью проверки начальной изотропии материала, из которого изготовлены трубчатые образцы, проведены испытания на простое нагружение: при растяжении, сжатии, внутреннем давлении, кручении. Сопоставление диаграмм деформирования при простых процессах показало, что при развитых деформациях сталь 9Х2 можно условно считать изотропной. Так, при значениях модуля вектора деформации больше 0,003 различие величин модуля вектора напряжений не превышает 10%, что лежит в пределах диапазона естественного разброса экспериментальных данных. Эксперименты при простом нагружении показали также, что при значениях модуля вектора деформации больше 0,003 коэффициент поперечной деформации материала близок к 0,5, что позволяет при обработке экспериментальных данных использовать условие несжимаемости.

Программа испытаний при мягком нагружении состояла в следующем. После предварительного растяжения ($S_1 = 300$ МПа), последующей разгрузки и последующего нагружения до уровня $S_1 = 318$ МПа осуществлялась полная выборка ползучести. После выборки ползучести при условии поддержания $S_1 = \text{const}$ осуществлялось с постоянной скоростью сложное циклическое нагружение знакопеременным кручением $-150 \leq S_3 \leq 150$ МПа. Для компонент S_k вектора напряжений $\sigma = S_k \mathbf{i}_k$ и компонент \mathcal{E}_k вектора деформаций $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathcal{E}_k \mathbf{i}_k$ с общим неподвижным девиаторным репером $\{i_k\}$ в пятимерном пространстве А.А. Ильюшина использованы соотношения:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{11}; \quad S_2 = 0; \quad S_3 = \sqrt{2} \sigma_{12}; \quad \sigma = \sqrt{S_1^2 + S_3^2}; \\ \mathcal{E}_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}} e_{11}; \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{2} \left(e_{22} + \frac{1}{2} e_{11} \right); \quad \mathcal{E}_3 = \sqrt{2} e_{12}; \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_2^2 + \mathcal{E}_3^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где компоненты тензоров напряжений и деформаций в рабочей части лабораторного образца вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{P}{2\pi R h}; \quad \sigma_{12} = \frac{M}{2\pi R^2 h}; \quad \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0; \\ e_{11} &= \frac{\Delta l}{l}; \quad e_{12} = \frac{\varphi R}{2l}; \quad e_{22} = \frac{\Delta R}{R}; \quad e_{13} = e_{23} = 0, \quad e_{33} \neq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь l – длина рабочей части лабораторных образцов, h – толщина стенки, R – радиус срединной поверхности, Δl – изменение длины образца, φ – угол закручивания. Образцы нагружались по заданной программе осевой силой P и крутящим моментом M .

На рис. 1 изображен отклик на данную программу нагружения, представленный в виде траектории деформаций. Точки А и В отвечают началу и окончанию процесса выборки ползучести. Точки, обозначенные цифрами, соответствуют началу циклов

сложного нагружения. В опытах В.Г. Зубчанинова заданными являлись траектории напряжений, а траектории деформаций являлись результатом процесса пластического деформирования материала. При численном моделировании данных экспериментальных процессов с использованием модели термопластичности [4] заданными являлись экспериментальные траектории деформаций (см. рис. 1). Траектории напряжений $\sigma_{ij}(t)$ получались в результате интегрирования определяющих соотношений упругопластичности по заданной истории изменения e_{ij} . Полученные численные результаты сопоставлялись с имеющимися экспериментальными данными.

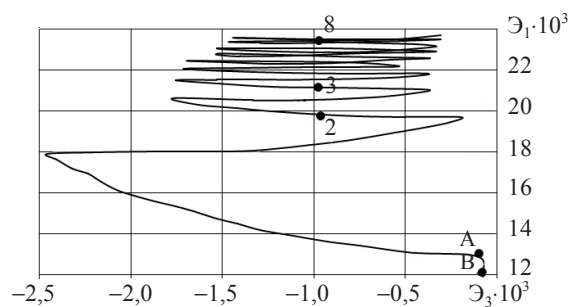


Рис. 1

Определяющие соотношения [4–6] (соотношения между тензорами напряжений и деформаций) не зависят от того, что является заданным: траектории напряжений или траектории деформаций. Это положение отражено в теории процессов А.А. Ильюшина теоремой изоморфизма [11], соотношение между тензорами напряжений и деформаций в пространстве напряжений является следствием соотношений между этими тензорами в пространстве деформаций. Тем не менее следует отметить [12] принципиальное различие в поведении векторов σ и ϵ при нагружении по заданным траекториям деформаций и по заданным траекториям напряжений. В первом случае при деформировании вектор σ стремится сблизиться с касательной к траектории деформаций, а во втором, при заданной траектории напряжений, направление вектора ϵ отстает от направления вектора напряжений σ и стремится сблизиться с этим направлением. Это свидетельствует о том, что об изоморфизме можно говорить, только если речь идет об одном и том же экспериментальном процессе, проходящем в одинаковых внешних условиях либо по заданным траекториям напряжений, либо по заданным траекториям деформаций. Это обстоятельство учитывалось авторами при математическом моделировании экспериментальных процессов [9].

Расчетный анализ процессов циклического упругопластического деформирования лабораторных образцов с использованием определяющих соотношений [4–6] проводился при следующих материальных параметрах стали 9Х2: модуль сдвига $G = 71500$ МПа, модуль объемного сжатия $K = 292600$ МПа, начальный радиус поверхности текучести $C_p^o = 200$ МПа, модули анизотропного упрочнения $g_1 = 37500$ МПа, $g_2 = 275$ (остальные параметры по причине отсутствия необходимой для их определения экспериментальной информации принимались равными нулю).

Результаты испытаний, их сравнение с полученными численными значениями приведены на рис. 1–8. Как видно из рис. 1, знакопеременное закручивание оболочки при $S_1 = \text{const}$ приводит к существенному увеличению компоненты \mathcal{E}_1 вектора деформаций ϵ , причем наибольший рост характерен для первого цикла сложного нагру-

жения и составляет более 50% от значения \mathcal{E}_1 в точке начала реализации процесса сложного нагружения. После пятого цикла степень прироста модуля вектора деформаций практически стабилизируется (см. рис. 1). Всего выполнено 10 полных циклов нагружения по S_3 .

На рис. 2 представлена «глобальная» диаграмма деформирования $\sigma - \varepsilon$, а на рис. 3, 4 – «локальные» диаграммы $S_1 - \mathcal{E}_1$ и $S_3 - \mathcal{E}_3$ (штриховой линией отмечены опытные данные [9]). Видно качественное и количественное соответствие опытных и расчетных данных.

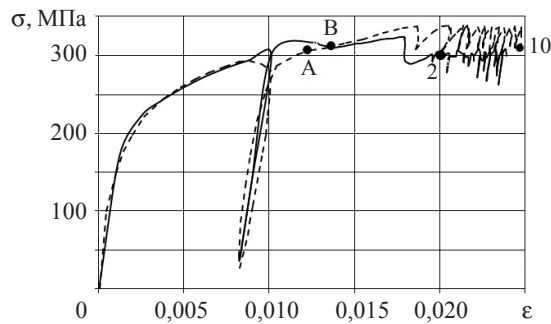


Рис. 2

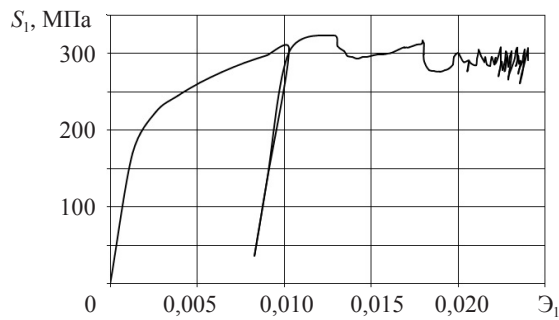


Рис. 3

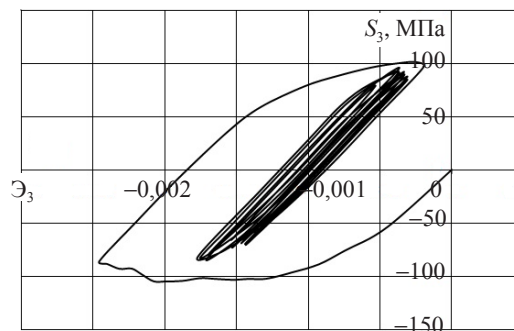


Рис. 4

Программа испытаний в пространстве деформаций (жесткое нагружение) и результаты расчетов представлены на рис. 5–8. Предварительное нагружение было осуществлено растяжением до уровня деформаций $\varepsilon = \mathcal{E}_1 = 0,9\%$. После разгрузки ($\sigma = 0$) и повторного нагружения $\varepsilon = \mathcal{E}_1 = 1\%$ было реализовано циклическое деформирование кручением $-0,1\% \leq \mathcal{E}_3 \leq 0,1\%$. На рис. 5 представлена траектория нагружения в векторном пространстве напряжений, отвечающая реализованной про-

грамме деформирования (штриховой линией отмечены опытные данные [9]). Видно качественное и количественное соответствие опытных и расчетных данных. Сложное деформирование приводит к уменьшению модуля вектора напряжений σ за счет изменения компоненты S_1 . При этом наибольшее падение значения S_1 наблюдается на первом цикле деформирования и составляет 23% от достигнутого уровня S_1 в точке начала реализации сложного процесса. К 10-му циклу траектория нагружения практически стабилизируется.

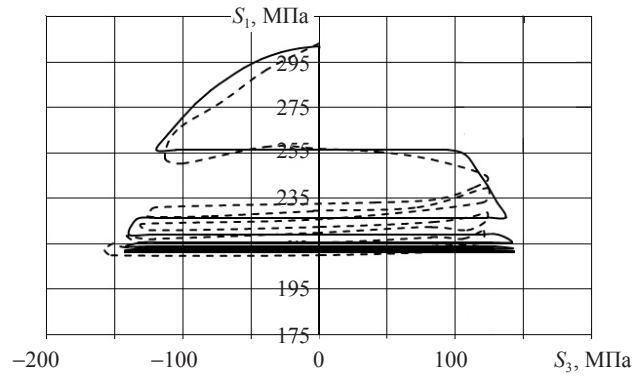


Рис. 5

На рис. 6 представлена расчетная «глобальная» диаграмма деформирования $\sigma-\epsilon$, а на рис. 7, 8 показаны расчетные «локальные» диаграммы $S_1-\epsilon_1$ и $S_3-\epsilon_3$.

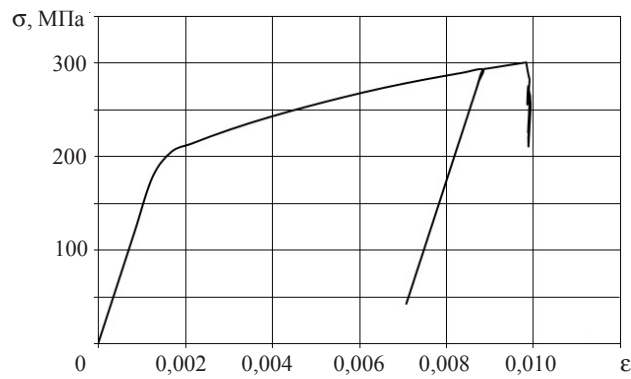


Рис. 6

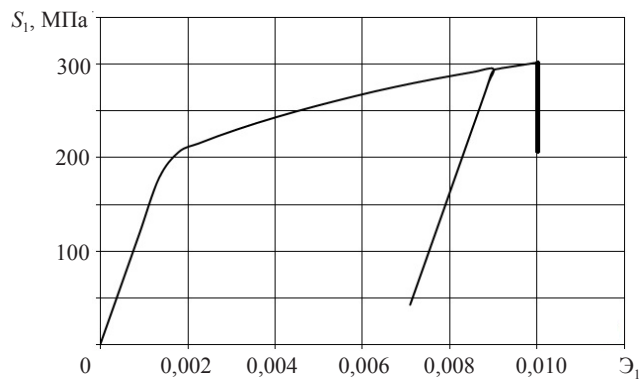


Рис. 7

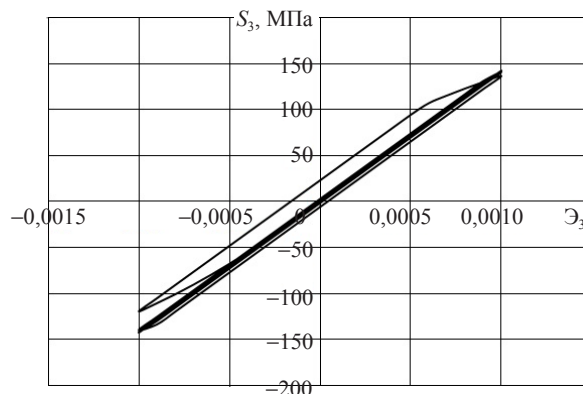


Рис. 8

В целом, сопоставляя полученные численные результаты с экспериментальными данными, можно отметить качественное и количественное соответствие модельных представлений по описанию эффекта циклической ползучести металлов для сложных траекторий знакопеременного нагружения опытным данным. Некоторое отличие расчетных значений от экспериментальных может быть объяснено отсутствием необходимой экспериментальной информации для определения ряда материальных параметров определяющих соотношений циклического упругопластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) [4–6].

Заключение

Проведена оценка достоверности и подтверждена правильность определяющих соотношений неупругого деформирования металлов и их сплавов [4–6] путем сопоставления результатов численного моделирования экспериментальных процессов с опытными данными для описания эффекта циклической ползучести.

Список литературы

1. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1988. 279 с.
2. Митенков Ф.М. и др. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
3. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // Int. J. Plasticity. 1989. V. 5, No 3. P. 247–302.
4. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
5. Numerical modeling of elasto-plastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions / I.A. Volkov, Yu.G. Korotkikh, I.S. Tarasov, D.N. Shishulin // Strength Mater. 2011. V. 43, No 4. P. 471–485.
6. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов сложного пластического деформирования материалов по произвольным траекториям термосилового нагружения // Изв. РАН. МТТ. 2007. №6. С. 69–83.
7. Бородий М.В. Моделирование асимметричного малоциклового нагружения в пространстве напряжений // Проблемы прочности. 1998. №5. С. 27–37.
8. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев: Наукова думка, 1978. 238 с.
9. Зубчанинов В.Г. Экспериментальное исследование ползучести стали 9Х2 при циклическом изменении напряжений и деформаций. Устойчивость и пластичность. В 2 т. Т. 2. Пластичность. М.: Физматлит, 2008. С. 310–313.

10. Зубчанинов В.Г., Акимов А.В., Охлопков Н.Л. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сложном нагружении: Свидетельство Роспатента на полезную модель № 7202. Бюл. Роспатента №7 от 19.07.98.

11. Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Наука, 1963. 293 с.

12. Зубчанинов В.Г., Гуляев В.И., Зубчанинов Д.В. Экспериментальное исследование процессов сложного деформирования материала Ст 45 на многозвенных траекториях // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2007. Вып. 69. С. 95–98.

NUMERICALLY ANALYZING THE CYCLIC CREEPING OF THE 9X2 STEEL FOR ALTERNATE CHANGES IN STRESSES AND STRAINS

Yu.G. Korotkikh, I.A. Volkov, A.I. Volkov, I.S. Tarasov

To assess the adequacy and to define the scope of use of the defining equations of visco-plasticity for alternate loading with complex trajectories, the «ratcheting» effect has been numerically analyzed; the numerical results obtained have been compared with the data of full-scale experiments. The model of visco-plastic deformation developed by the present authors is shown to qualitatively and quantitatively describe the main effects of complex visco-plastic deformation for non-proportional loading with random complex trajectories.

Keywords: sstressed-strained state, cyclic creep, defining equations, material parameters, alternate loading, hard loading, soft loading.