

УДК 539.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ И СЛОЖНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ КРУЧЕНИЕМ–РАСТЯЖЕНИЕМ (СЖАТИЕМ)

© 2011 г.

Е.В. Павленкова, Д.В. Жегалов

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

pavlyonkova@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Излагается постановка и метод численного решения обобщенных осесимметричных задач с кручением упругопластических тел вращения при больших деформациях в условиях неоднородного напряженно-деформированного состояния. Описывается применение этого метода для построения диаграмм деформирования на основе экспериментов на кручение. Приводятся экспериментальные и численные исследования процессов упругопластического деформирования и потери устойчивости цилиндрических образцов при простом и сложном нагружении кручением–растяжением, а также пенетрирования с кручением сферического индентора в пластину.

Ключевые слова: упругопластичность, большие деформации, кручение–растяжение, сжатие, пенетрирование с кручением, эксперимент, численное моделирование, потеря устойчивости пластического деформирования.

Математическая модель и методика численного решения

Полная система уравнений, описывающих динамическое деформирование тел вращения при осесимметричном нагружении с кручением, формулируется в цилиндрической системе координат на основе уравнения баланса виртуальных мощностей. В силу осевой симметрии все искомые функции зависят от радиальной и осевой координат и не зависят от окружной. Кинематические соотношения строятся в скоростях в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие формоизменения и деформации [1]. Поворот частицы среды как жесткого целого описывается производной Яуманна. Для описания упругопластических свойств материалов при больших деформациях модифицирован вариант теории течения [2] с комбинированным изотропным и кинематическим упрочнением

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \dot{\lambda} S_{ij}, & S_{ij} S_{ij} &= C_p^2, & S_{ij} &= \sigma'_{ij} - \rho_{ij}, \\ \dot{\rho}_{ij} &= g_1 \dot{\epsilon}_{ij}^p - g_2(\kappa) \rho_{ij} \dot{\kappa}, & \rho_{ij} &= \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \\ \kappa &= \sqrt{\frac{2}{3}} \int_0^t \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p} dt. \end{aligned}$$

Здесь $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ – тензор скоростей пластических дефор-

маций, σ'_{ij} – девиатор тензора напряжений, S_{ij} – тензор активных напряжений, $C_p = C_p(\kappa)$ – радиус поверхности текучести, ρ_{ij} – тензор микронапряжений, определяющий координаты центра поверхности текучести, $g_1 = \text{const}$ и $g_2 = g_2(\kappa)$ – модули кинематического упрочнения, κ – параметр Одквиста. Для определения материальных параметров $C_p(\kappa)$, g_1 и $g_2(\kappa)$ получены экспериментальные данные по монотонному нагружению и эффекту Баушингера при кручении и растяжении (материал – сталь 12Х18Н10Т). Для процессов активного нагружения, близких к пропорциональным, достаточно учитывать лишь нелинейное изотропное упрочнение, для которого не требуются данные по эффекту Баушингера. Система уравнений, дополненная соответствующими кинематическими граничными и начальными условиями, решается методом конечных элементов в сочетании с явной схемой интегрирования по времени типа «крест» [1].

Наибольшие однородные деформации до разрушения достигаются при кручении в поверхностном слое сплошных цилиндрических образцов, однако существенная неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС) по радиусу затрудняет определение параметров НДС по измеряемым в эксперименте интегральным величинам. При испытаниях тонкостенных цилиндрических образцов достичь больших величин дефор-

маций невозможно из-за потери устойчивости. В [1] предложена методика, являющаяся обобщением и развитием методики условной тонкостенной трубки [3], и позволяющая построить диаграмму деформирования (ДД) по данным эксперимента на одном сплошном образце переменного сечения в результате однократного прямого численного расчета процесса кручения. Физическое деформирование образца с меньшим радиусом [3] заменяется математическим моделированием. Для построения ДД выбирается поперечное сечение образца с наибольшими величинами интенсивности напряжений и параметра Одквиста. В случае объемного напряженного состояния в этом сечении предложен способ корректировки решения.

Пропорциональное комбинированное нагружение кручением–растяжением

В [1] приведено экспериментальное и численное исследование деформирования осесимметричных образцов переменной толщины с цилиндрической рабочей частью при монотонном кинематическом нагружении кручением–растяжением (материал – сталь 12Х18Н10Т). Расчеты проводились при различных соотношениях кручения и растяжения. По результатам расчетов построена область устойчивости пластического деформирования при совместном действии растяжения и кручения. При кручении не происходит потери устойчивости пластического деформирования с образованием шейки, как при растяжении. Преобладание растяжения по отношению к кручению вызывает потерю устойчивости и локализацию пластических деформаций на более ранней стадии кручения.

Сложное нагружение кручением–растяжением

Проводились экспериментальные и численные исследования процессов деформирования сплошных осесимметричных образцов (материал – сталь 12Х18Н10Т) по двум вариантам двухзвенных ломаных траекторий: растяжение до условной осевой деформации 0,2, затем кручение до разрушения и кручение до условной сдвиговой деформации на поверхности рабочей части образца 0,8, затем растяжение до разрушения. Экспериментальные и расчетные данные, полученные с применением моделей пластичности с изотропным и комбинированным упрочнением, при лучевых нагружениях и после излома траектории по исчерпанию следа запаздывания вектор-

ных свойств материала практически совпадают. Расхождение результатов расчетов и экспериментов после излома траектории до исчерпания следа запаздывания не превышает 6%. Использование модели только с изотропным упрочнением приводит к более раннему образованию шейки при наложении растяжения на кручение и значительно меньше сказывается при наложении кручения на растяжение. Это объясняется высокой чувствительностью устойчивости процесса пластического деформирования к модулю упрочнения материала. При малых упругопластических деформациях след запаздывания для стали составляет 1% по деформациям и увеличивается в зависимости от степени деформации. Согласно проведенным расчетам, при предварительной деформации $k = 0.36-0.73$ ширина «нырка» составляет 4–6% по деформациям, то есть при сложном нагружении «память» материала, обусловленная кинематическим упрочнением, ограничена следом запаздывания в области малых изменений деформаций текущего состояния. Поскольку в рассматриваемой обобщенной осесимметричной задаче в формулах для скоростей деформаций исключены вращения материальных частиц как жесткого целого, тензор активных напряжений определяется теми же соотношениями, что и при малых упругопластических деформациях.

Пенетрирование с последующим кручением

Проведены экспериментальные [4] и численные исследования процесса деформирования при внедрении с кручением индентора в форме шара в пластину. Ступенчатый режим нагружения начинается внедрением индентора на определенную глубину. При постоянно действующей на индентор сжимающей нагрузке осуществляется нагружение крутящим моментом. На следующем этапе порядок нагружения повторяется. Таким образом, устанавливается зависимость между постоянной сжимающей нагрузкой и крутящим моментом при ступенчатом пенетрировании шара в пластину. Наблюдалось падение сжимающей силы при кинематическом кручении после достижения его максимального значения за счет проскальзывания относительно лунки. Максимум момента соответствует максимуму силы трения при кручении.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-4807.2010.8), а также при поддержке РФФИ (проект 08-01-00500-а).

Список литературы

1. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Крамарев Л.Н., Павленкова Е.В. // ПММ. 2008. Т. 72, вып. 2. С. 342–350.
2. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разру-

шения материалов и конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999.

3. Васин Р.А., Ильюшин А.А., Моссаковский П.А. // Изв. РАН. МТТ. 1994. №2. С. 177–184.

4. Крамарев Л.Н., Жегалов Д.В. // Проблемы прочности и пластичности. 2008. Вып. 70. С. 79–88.

THEORETICALLY AND EXPERIMENTALLY STUDYING THE ELASTOPLASTIC DEFORMATION PROCESSES AND ULTIMATE STATES OF BODIES OF REVOLUTION UNDER PROPORTIONAL AND COMPLEX LOADING BY TORSION-TENSION (COMPRESSION)

E.V. Pavlyonkova, D.V. Zhegalov

A formulation and a method of numerically analyzing generalized axisymmetric problems on twisting elastoplastic bodies of revolution with large deformations under inhomogeneous stressed-strained state are presented. The method is used to construct deformation diagrams based on the results of twisting tests. Experimental and numerical studies of processes of elastoplastic deformation and loss of stability in cylindrical specimens under simple and complex loading by torsion-tension are given, as well as of the penetration with torsion of a spherical indenter into a plate.

Keywords: elastoplasticity, large deformations, torsion–tension, compression, penetration with torsion, experiment, numerical model, loss of stability of plastic deformation.