

УДК 539.376

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОСАДКИ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ**

© 2011 г.

А.М. Локощенко, В.В. Терауд

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

loko@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Проведено теоретическое исследование осадки при ползучести сплошных цилиндров с учетом бочкообразования и без его учета. Получено условие для программы нагружения, приводящей к минимальному уровню энергии деформации. Испытания цилиндров из алюминиевого сплава Д16Т при 400 °С показали хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений соответствующих параметров. Проведено теоретическое исследование осадки полых цилиндров с внутренним или внешним ограничениями.

Ключевые слова: ползучесть, осадка, цилиндр, метод конечных элементов, испытания, энергия деформирования, оптический метод измерения.

Рассматривается осадка сплошных и полых круговых цилиндров между двумя абсолютно жесткими плитами. Исследуются особенности деформирования таких цилиндров в условиях установившейся ползучести при разных программах нагружения и различных краевых условиях. В качестве характеристик установившейся ползучести материала использованы степенная и мелко-степенная модели.

**Теоретическое исследование осадки
сплошных цилиндров**

Основное внимание уделяется анализу осадки сплошных цилиндров с учетом бочкообразования и без его учета. Проведены вычисления всех основных параметров при двух программах нагружения: при постоянной сжимающей силе и при постоянной скорости сближения оснований цилиндра. Вычисления показали, что энергия деформации, затрачиваемая на осадку цилиндра в первом случае, больше, чем во втором. Разность между этими энергиями возрастает с увеличением коэффициента трения и отношения диаметра цилиндра к его высоте. Получено условие для программы нагружения, приводящей к минимальному уровню энергии деформации.

При исследовании осадки цилиндров с учетом бочкообразования используется метод конечных элементов (МКЭ) в пакете программ LS-DYNA. Анализ решений показывает, что в процессе осадки часть боковой поверхности цилиндра переходит в область контакта цилиндра с жесткими плитами.

Испытания сплошных цилиндров

Теоретический анализ осадки сплошных цилиндров дополнен проведением соответствующего экспериментального исследования. С этой целью был разработан бесконтактный метод измерений поля перемещений осаживаемого цилиндра при высокой температуре. Измерения проводились с помощью специальной оптической системы, фоторегистратора и программного комплекса. Для получения высокой точности измерений в качестве фоторегистратора была использована фотокамера Nikon с профессиональной оптикой Nikkor. Для возможности анализа поля перемещений цилиндр перед испытаниями шлифовался с боковой поверхности, на которой в двух направлениях – вдоль образующей и по окружности – выфрезеровывались узкие линии глубиной до 0.1 мм, образующие криволинейные прямоугольники размерами 3×2 мм. По изменениям расстояний между реперными линиями с помощью разработанного программного обеспечения вычислялись компоненты тензора деформаций ползучести на внешней поверхности деформированного цилиндра. С помощью программного комплекса Askim в автоматическом режиме проводилась обработка множества фотографий. Разработанная система измерений позволяет вычислять высоту цилиндра, его диаметр в любом сечении, координаты и скорости произвольных точек на поверхности цилиндра, деформации на видимой поверхности цилиндра. Все эти параметры измеряются в процессе осаживания цилиндра.

С помощью этого оборудования была проведена серия экспериментов, в которых осуществлялась осадка цилиндров из алюминиевого сплава Д16Т при температуре 400 °С. В испытаниях диаметр и высота цилиндров изменялись в широком диапазоне от 19.5 до 78 мм. Предварительно в испытаниях образцов этого сплава на одноосную ползучесть при той же температуре определялись материальные константы, соответствующие используемым моделям ползучести. Анализ результатов испытаний цилиндров при осадке показал хорошее согласие экспериментальных данных с соответствующими величинами, полученными в теоретическом решении.

Теоретическое исследование осадки полых цилиндров

Получено решение аналогичной задачи об осадке полого цилиндра с жестким внутренним или внешним ограничениями. Проведены вычисления всех основных параметров при различных программах нагружения и показаны результаты

сравнения решений, соответствующих этим программам с позиции энергетического подхода. В случае цилиндра с жесткой внутренней облойкой получены условия радиального перемещения внутренней поверхности цилиндра от этой облойки (отлипание цилиндра). Выяснено, что при заданных значениях показателя степени в моделях ползучести и коэффициента трения наличие или отсутствие отлипания зависит от двух безразмерных геометрических параметров, характеризующих соотношения высоты и его внутреннего и наружного диаметров. Показано, что в определенной области этих параметров отлипание соответствующего цилиндра наступает по истечении некоторого времени с начала нагружения. В случае внешнего ограничения полого цилиндра отлипание его наружной поверхности от жесткой облойки в принципе невозможно.

Авторы благодарят П.А. Моссаковского за консультации при проведении вычислений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-08-00007).

EXPERIMENTAL-THEORETICAL STUDY OF SHORTENING OF CIRCULAR CYLINDERS UNDER CREEP

A.M. Lokoshchenko, V.V. Teraud

Shortening of continuous cylinders under creep is theoretically investigated, with and without accounting for the formation of cask form. The condition for the loading program which provides the minimum level of deforming energy is obtained. Experiments with cylinders made of aluminum alloy D16T under 400 °C show good agreement between theoretical and experimental values. Shortening of hollow cylinders with inner or outer fixing is theoretically studied.

Keywords: creep, shortening, cylinder, finite element method, experiments, deforming energy, optical measuring method.