

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВТОРНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРЕВЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ

Е. П. Дац<sup>1</sup>, С. Н. Мокрин<sup>2</sup>, Е. В. Мурашкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет,  
murashkin@dvo.ru

Работа посвящена изучению процессов формирования необратимых деформаций металлических изделий вследствие влияния на них высоких градиентов температур. Известно, что перепад температур порождает температурные напряжения, уровень которых может быть достаточным для возникновения пластического течения в материале. В качестве исследуемого объекта возьмем бесконечно длинный полый цилиндр, свободный от внешних нагрузок при начальной температуре  $T_0$ . Внешняя поверхность поддерживается при постоянной начальной температуре. На внутренней поверхности температура повышается до некоторого максимального значения  $T_m$ , причем процесс роста температуры считается достаточно медленным для того, чтобы пренебречь скоростью распространения тепла в материале цилиндра. Подобные задачи рассматривались ранее [4-7] либо без учета упругих эффектов, либо в отсутствие зависимости параметров материала от температуры.

Для определения напряженно-деформированного состояния цилиндра, воспользуемся математической моделью малых упруго-пластических деформаций типа Прандтля-Рейса, в которой деформации  $e_{ij}$  полагаются малыми и складываются из упругих  $e_{ij}^e$  и пластических  $e_{ij}^p$  составляющих деформаций

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (1)$$

Уровень и распределение упругих деформаций внутри цилиндра задают температурные напряжения, рассматриваемые согласно закону Дюамеля-Неймана [1]

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk}^e + m\Theta)\delta_{ij} + 2\mu e_{ij}^e, \quad m = \alpha(3\lambda + 2\mu)(T_m - T_0). \quad (2)$$

Здесь  $\lambda$ ,  $\mu$  – параметры Ламе,  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения материала,  $\Theta = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ . В случае достаточно высокого градиента температур, уровень температурных напряжений может оказаться достаточным для начала процесса пластического течения в цилиндре, которое свяжем с выполнением условия пластичности в форме Треска [2]

$$f(\sigma_{ij}) = \max |\sigma_i - \sigma_j| - 2k(\Theta) = 0, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  – главные напряжения,  $k(\Theta)$  – предел текучести материала при заданной температуре. Далее в расчетах для  $k(\Theta)$  принимается простейшая линейная зависимость  $k(\Theta) = k_0 - \beta\Theta$ , в которой  $k_0$  – предел текучести материала при комнатной температуре,  $\beta$  – теплофизическая постоянная материала, задающая степень падения предела текучести с повышением температуры. В условиях принимаемого принципа максимума Мизеса [2] поверхность (3) становится пластическим потенциалом, следствием которого является ассоциированный закон пластического течения.

Если к соотношениям (1) – (3) добавить локальные следствия законов сохранения (уравнение равновесия и уравнение баланса внутренней энергии), приняв при этом в качестве закона теплопроводности закон Фурье, получим замкнутую математическую модель термоупругопластической среды.

Проблема определения поля перемещений в теории идеального упругопластического тела впервые была рассмотрена Д.Д. Ивлевым [3]. Была показана возможность вычисления перемещений в статически определимых задачах теории идеальной пластичности и указаны условия, когда данная возможность осуществляется. Указанный способ вычисления перемещений используется и для решения поставленной задачи.

Оказывается, что в процессе нагрева с развитым пластическим течением возможен момент времени, при котором необратимые деформации в окрестности поверхности шара перестают накапливаться, что говорит о начале разгрузки материала. Причем, область необратимого деформирования продолжает развиваться. Граничную поверхность, отделяющую область пластического течения от развивающейся области разгрузки, согласно можно найти из условия

$$\frac{\partial}{\partial t}(f(r, t)) = 0 \quad (4)$$

Таким образом, график распределения остаточной деформации оказывается огибающей к семейству к графикам возможных распределений необратимых деформаций. С некоторого момента времени начнем охлаждать материал шара, при этом, возможен повторный выход на условие пластичности с развитием области пластического течения и вслед за ним процесс разгрузки пока температура тела не станет равной комнатной.

В представленном сообщении рассматривается задача о равномерном нагреве и последующем охлаждении закрепленного (свободного) составного диска. При постепенном увеличении температуры наступает момент времени, при котором впервые в окрестности контактной поверхности термоупругопластических материалов выполняется условие пластичности Треска. Начиная с некоторого момента времени, температура диска постепенно понижается и начинается процесс разгрузки материала среды. По результатам численного счета построены поля остаточных деформаций и напряжений.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-776.2012.1 и гранта РФФИ мол\_a\_вед 12-01-33064.

#### «ЛИТЕРАТУРА»

1. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений // М.: Мир, 1964. 520с.
2. Быковцев Г.И., Ивлев Д.Д. Теория пластичности // Владивосток: Дальнаука. 1998. 528с.
3. Ивлев Д.Д. К определению перемещений в задаче Л.А. Галина // Прикл. математика и механика. 1957. Т. 21, вып. 5. С.716-718.
4. Качанов Л.М. Упругопластическое равновесие неравномерно нагретых толстостенных цилиндров, находящихся под действием внутреннего давления // ЖТФ, 1940. №10(14). С. 1167-1172.
5. Ульяновцев В.П., Макаров А.Ф. Упругопластическое деформирование цилиндра при неравномерном нагреве // Пластичность машиностроительных материалов. Тула: Приокское кн. изд-во, 1987. С. 102-113.
6. Ульяновцев В.П., Макаров А.Ф. Влияние неравномерного температурного поля на деформирование цилиндров // Проблемы технологии машиностроения. Тула: Изд-во ТулПИ, 1991. С. 35-41.
7. Шорр Б.Ф. К расчету неравномерно нагретых цилиндров в упругопластической области // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1960. № 6. С. 57-62.