

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО КОСВЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

**Михаил Киселев**

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна (Украина)*

[kiseleva47@ukr.net](mailto:kiseleva47@ukr.net)

Рассматривается задача об определении механических свойств материала на основе информации об его остаточном деформировании при внедрении индентора в массив материала. В качестве параметров, описывающих свойства материала, принимается вектор  $\sigma = \{\sigma_T, \sigma_b, E, \mu, \varepsilon_T, \delta\}^T$ , в качестве измеряемых параметров –  $W = \{w_{\max}, w_{it}^{\max}, k, w_{ост}, a_{\max}, t_{сoud}\}$ , где  $k$  – коэффициент восстановления,  $w_{\max}$  – максимальная глубина внедрения индентора,  $w_{ост}$  – глубина остаточной вмятины,  $a_{\max}$  – размер отпечатка,  $t_{сoud}$  – полное время соударения. Измерение указанных параметров производится с помощью экспериментального комплекса [1]. Задача решается методом обратных задач. Квазирешение обратной задачи формулируется следующим образом

$$\sigma = \arg \min_{\sigma \in \bar{\sigma}} I(\sigma), \quad (1)$$

где  $I(\sigma) = 1/2 [W_{\sigma}(\sigma) - W(\sigma)]^2$ ,  $W_{\sigma}, W$  – измеренные и вычисленные векторы,  $\bar{\sigma}$  – множество возможных состояний.

Для определения значений  $W(\sigma)$  используется модель, описывающая внедрение индентора в массив материала, в качестве которой используется конечноэлементная динамическая модель механики среды (пакет прикладных программ). Для описания зависимости  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$  используется деформационная теория пластичности и, базирующийся на ее гипотезах, итеративный метод дополнительных деформаций. Кривая зависимости  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  аппроксимируется ломаной, при этом до  $\sigma_i < \sigma_T$  принимается линейная зависимость, а, при  $\sigma_i > \sigma_T$  – участок с линейным упрочнением, линия упрочнения проходит через точки  $T(\sigma_T, \varepsilon_T), B(\sigma_B, \varepsilon_B)$ . Интегрирование разрешающих уравнений по времени ведется пошагово  $\theta$ -методом Вилсона. Уравнения для массива материала дополняются уравнением движения индентора. Область кон-

такта находится итеративно, когда на каждом шаге итеративного процесса проверяется условие совместности движения некоторой области массива и индентора. Точки, принадлежащие области контакта, фиксируются, их множество используется для следующего шага итерационного процесса. Для определения неизвестного вектора  $\sigma$  из условия (1) используется метод Ньютона, градиент функционала определяется с помощью разностного аналога. В качестве начального приближения используются значения  $\sigma$  из ГОСТ.

На основе изложенного алгоритма был проведен масштабный численный эксперимент. Варьировались как физические свойства материала, так и скорость полета и масса индентора. Из полученных результатов вытекает, что для фиксированного значения  $\sigma_b$  с повышением  $\sigma_T$  увеличиваются максимальные остаточные перемещения, время соударения, а коэффициент восстановления уменьшается. С ростом  $\sigma_b$  при фиксированном  $\sigma_T$  материал характеризуется большей степенью упрочнения, перемещения и время соударения уменьшаются, а коэффициент восстановления увеличивается. Время соударения с ростом скорости полета или уменьшением массы индентора уменьшается. Увеличение скорости полета и массы индентора повышают значения максимальных и остаточных перемещений.

Рассмотрена задача информативности каждого из измеряемых параметров при определении различных компонентов вектора  $\sigma$ . Так, для идентификации  $E, \mu$  наиболее информативными оказались пары  $\{w_{\max}, k\}, \{w_{it}^{\max}, k\}$ .

При определении параметров  $\{\sigma_T, \sigma_b, \varepsilon_T, \delta\}$  оптимальными измеряемыми параметрами являются  $\{w_{\max}, k, w_{ocm}, a_{\max}\}$ . Для вектора  $\{\sigma_b, \sigma_T, \delta\}$  ответственными параметрами будут  $\{w_{\max}, k, w_{ocm}\}$  или  $\{w_{it}^{\max}, k, w_{ocm}\}$ .

В процессе проведения экспериментальных исследований и компьютерного моделирования установлено, что основным фактором, влияющим на соответствие полученных результатов действительным, является точность аппроксимации  $\sigma_i(\varepsilon_i)$ . Используемая двухзвенная аппроксимация хорошо отражает поведение марганцовистых сталей, хуже – никелевых и углеродных.

1. *Закиров К.Е., Ободан Н.В.* Автоматизированная установка для измерения пластической твердости стали ударным способом / В сб. «Контроль и управление в технических системах». Ч. 2. – Винница: ВТТУ, 1995. – С. 513-514.

#### IDENTIFICATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS USING NON-DIRECT MEASUREMENTS

*The approach to solve identification problem was proposed and tested with the employment of the problem to estimate mechanical properties using residual stresses resulted from indenter application; the direct problem was modelled with dynamical finite element approximation of continuum. Simulation allows revealing factors most informative for identification.*