УДК 620.172.224.2

## Е.С.Лукин, А.М.Иванов

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОМУ ЭФФЕКТУ

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск

The experiment-calculated model of estimation of heat quantity, produced as a result of the plastic deformation of elasto-plastic material, is presented. The technique of estimation of the reserved energy of the plastic deformations at the material strengthening stage is described.

Пластическая деформация поликристаллических материалов представляет собой достаточно сложный процесс. Пластичность металлов хорошо описывается с позиций теории дислокаций. При достижении критического значения плотности дислокаций становится возможным проявление коллективных эффектов. Образование и движение (трансляция, ротация) дислокаций и дисклинаций приводит к необратимым деформациям — проявлению пластичности.

На макроскопическом уровне пластическая деформация статически растягиваемого упругопластического материала описывается несколькими стадиями: упрочнение, локализация пластических деформаций (образование шейки), зарождение и рост микротрещин, образование макротрещины и, наконец, разрушение образца. Таким образом, пластическая деформация представляет собой последовательность структурных изменений материала на различных масштабных уровнях [1]. Исследование явления пластичности на различных масштабных уровнях с привлечением различных подходов имеет большое значение для понимания природы формирования механических свойств конструкционных сталей и прогнозирования их поведения в различных условиях.

Известно, что металлы, подверженные внешнему силовому воздействию, при пластической деформации нагреваются. Явление повышения температуры пластически деформируемого материала называется термопластичностью. Измеряя величину приращения температуры статически деформируемых металлов при помощи калориметра, авторы [2,3] расчетным путем определяют функцию, описывающую истинное количество тепла, выделившегося в результате термопластического эффекта. Запасенная (поглощенная) энергия из первого начала термодинамики определяется как разность между работой, затраченной на деформирование материала, и количеством выделившегося тепла [2-4]:

$$dE_S = \delta A_{\rm nn} - dQ. \tag{1}$$

В работе [5] для оценки выделившегося количества тепла вводится механический эквивалент теплоты, который представляет собой некоторую экспериментально полученную функцию зависимости приращения температуры металла от мощности электрического тока.

В настоящей работе для измерения температуры исследуемых образцов использована тепловизионная система «ТКВр-ИФП». Данная ИК камера позволяет дистанционно измерять температуру в инфракрасном спектре электромагнитного излучения и формировать тепловое изображение исследуемого объекта на экране монитора. Отличительной особенностью камеры является высокая чувствительность (0,028°С), быстродействие (20 кадров/сек) и запись термограмм в цифровом формате на жесткий диск ПК в реальном режиме времени.

В качестве исследуемого материала были использованы плоские гладкие образцы типа «гантель» с размерами рабочей части 95×18×2 мм из стали 18Г2С. Испытания на статический разрыв с записью диаграммы деформирования в координатах «нагрузкаудлинение» проводились на испытательной машине «Instron-1195» при скоростях деформации  $\dot{\varepsilon} = 8,98 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,79 \cdot 10^{-3}$ ;  $3,58 \cdot 10^{-3}$  и  $8,93 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. В процессе испытания тепловизионная камера, установленная нормально к плоскости образца, записывала изменение температурного поля исследуемого материала в режиме «термофильм».

Высокочувствительная тепловизионная система позволяет дистанционно измерять изменение температуры поверхности исследуемого материала до сотых долей градуса. Однако в отличие от калориметрического метода применение ИК камеры не позволяет соблюсти условие адиабатичности эксперимента. Поэтому при определении количества тепла, выделившегося в результате пластической деформации, необходимо расчетным путем оценить тепло, рассеявшееся в окружающую среду (через поверхность образца и по захватам) вследствие теплоотдачи с поверхности образца и теплопроводности по образцу.

Рабочую часть плоского гладкого образца, подвергаемого осевому статическому растяжению, можно рассматривать как осесимметричный стержень с известными геометрическими размерами. Воспользовавшись известным решением нестационарной одномерной задачи теплопроводности для стержня конечных размеров с внутренними источниками тепла, определяющего зависимость распределения температуры на поверхности стержня от времени и координат, выразим мощность источников тепла:

$$q_{v}(\tau) = \frac{T(l,\tau)}{a_{1}(l) - a_{2}(l) \cdot \exp[-b_{1}(l) \cdot \tau] - a_{3}(l) \cdot \exp[-b_{2}(l) \cdot \tau]},$$
(2)

где  $\overline{T}(l, \tau)$  — среднее значение температуры стержня длиной l в зависимости от  $\tau$ ;  $a_1(l)$ ,  $a_2(l)$ ,  $a_3(l)$ ,  $b_1(l)$  и  $b_2(l)$  — некоторые функции, зависящие от длины стержня l, коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и коэффициента теплоотдачи с поверхности образца  $\alpha$ .

Определив изменение температуры образца  $\overline{T}(l, \tau)$  по данным тепловизионных измерений и подставив его в уравнение (2), найдем мощность внутренних источников тепла. Данное уравнение представляет собой решение обратной задачи теплопроводности с уче-



том тепловых потерь вследствие теплопроводности и теплоотдачи (см. рис.1). Рис.1. Изменение мощности внутренних источников тепла на стадии упрочнения стали 18Г2С при скорости деформирования  $\dot{\epsilon} = 8,98 \cdot 10^{-4} \, \text{с}^{-1}$  в зависимости от времени

Для нахождения количества тепла, выделяющегося в процессе пластической деформа-

ции, выражение (2) необходимо проинтегрировать по времени (полученное выражение в статье не приводится). Решение данной задачи реализовано в среде MathCAD 2000 и Maple v.6. Теплофизические коэффициенты, использованные при решении, ввиду незначительного приращения температуры ( $\Delta T < 20^{\circ}$ C) принимаются постоянными.

Работа, затраченная на пластическое деформирование материала, определяется из условной диаграммы деформирования и численно равна площади под кривой «нагрузкадеформация» за вычетом работы упругой деформации. С учетом того, что методика нацелена на оценку запасенной энергии пластических деформаций, из совершенной работы необ-



ходимо вычесть упругую составляющую (рис.2):  $A_{nn} = A - A_{ynp}$ .





Удельная запасенная энергия, определенная по выражению (1), графически представлена на рис.3 в зависимости от относительного удлинения.

Рис.3. Графики изменения работы пластических деформаций  $a_{nn}$ , запасенной энергии  $e_S$  и количества выделившегося тепла q в удельных единицах в зависимости от относительного удлинения стали 18Г2С на стадии равномерного пластического удлинения при скорости деформирования  $\dot{\varepsilon} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ 

Следует отметить, что характер поведения кривых изменения запасенной энергии и количества выделившегося тепла, оцененного по предложенной методике, сохраняется при различных скоростях деформирования.

Таким образом, представленная расчетно-экспериментальная модель и основанная на ней методика могут быть использованы для оценки запасенной энергии пластических деформаций на стадии упрочнения материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №03-01-96065 p2003арктика\_а) и по Программе 3.11 Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (проект 4).

1. Григорьев А.К., Колбасников Н.Г., Фомин С.Г. Структурообразование при пластической деформации металлов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1992. 244 с.

- 3. Максимкин О.П., Гусев М.Н. // Письма в ЖТФ. 2001. Т.27. Вып.24. С.85-89.
- 4. Taylor G.I., Quinney H. // Proc. Roy. Soc. 1934. Vol. CXLIII. A. P.307-326.
- Pieczyska E.A., Gadaj S.P., Nowacki W.K. // Quantitative infrared thermography. 5, QIRT'2000. Proceedings of Eurotherm Seminar No.64. Reims, France, 2000. P.260-264.

<sup>2.</sup> Астафьев И.В., Максимкин О.П. // Заводская лаборатория. 1994. № 1. С.44-46.