

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА И МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

А.В. Коновалов, А.С. Смирнов

Институт машиноведения Уральского отделения Российской Академии Наук, Екатеринбург, 620219, Комсомольская 34

## Аннотация

Описываются экспериментальная база, реологическая модель напряжения текучести и коэффициента вязкости в определяющих соотношениях упруговязкопластической среды и методика их идентификации по опытным данным сжатия цилиндрических образцов в условиях их неоднородной деформации.

## EXPERIMENTAL BASE AND TECHNIQUE OF CONSTITUTIVE EQUATION IDENTIFICATION OF ELASTICVISCOPLASTIC MEDIUM

The experimental base, rheological model of yield stress and viscosity factor in constitutive equations of elasticviscoplastic medium and technique of its identification by the experiment data of cylindrical sample compression in non-uniform deformation conditions are described.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При горячей деформации наряду с упрочнением в металле интенсивно происходят процессы разупрочнения, которые обусловлены в отсутствие фазовых превращений динамическим возвратом, полигонизацией и рекристаллизацией [1].

В работе [2] получены определяющие соотношения для металлов. Принята модель упруговязкопластической изотропной и изотропно упрочняющейся среды. Упругие деформации малые и удовлетворяют закону Гука, пластические – большие и подчиняются ассоциированному закону пластического течения с функцией нагружения Мизеса. Вязкие свойства материал проявляет только при сдвиговых деформациях, как при упругих, так и упругопластических. Изменение объема чисто упругое. Основные уравнения этих соотношений имеют вид

$$\sigma = \sigma^{ep} + S^v, \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}^{ep} = \lambda \dot{\Theta} + 2(\lambda \Theta + \mu) D - \nabla v \cdot \sigma^{ep} - \sigma^{ep} \cdot \nabla v^T - 2J \mu \dot{\Lambda}^p S / |S|,$$

$$S^v = \nu B, \quad B = D - \frac{1}{3} \dot{\Theta} I, \quad \nu = c q(H)/H,$$

$$0.5 S \cdot S - k^2 = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе;  $D$  – тензор скоростей деформаций;  $\nabla v$  – градиент скорости перемещений;  $S$  – девиатор тензора  $\sigma^{ep}$ ;  $I$  – единичный тензор;  $\Theta$  – относительное изменение объема частицы среды;  $\dot{\Lambda}^p$  – скалярная мера скорости пластической деформации;  $J$  – индикаторная функция;  $\nu$  – коэффициент вязкости;  $H = \sqrt{2B \cdot B}$  – интенсивность скоростей деформации сдвига;  $q(H)$  – функция вязких свойств среды;  $c$  – коэффициент, учитывающий различное проявление вязких свойств при упругих и упругопластических деформациях;  $k$  – напряжение текучести в условии текучести Мизеса (2).

Считаем, что коэффициенты Ламе априори известны. Для идентификации определяющих соотношений

(1) необходимо определить входящие в них напряжение  $k$  и функцию  $q$ . Пренебрегая малыми упругими деформациями при сжатии (растяжении) образцов в условиях одноосного напряженного состояния, имеем следующую связь между напряжением деформирования (сопротивлением деформации  $\sigma_s$ ) и величинами  $k$  и  $q$ :  $\sigma_s = \sqrt{3}k + (\sqrt{3}/2)q$ . Отсюда задача идентификации определяющих соотношений сводится к задаче идентификации модели сопротивления деформации  $\sigma_s$ .

В ранних работах [3], [4] была получена модель сопротивления деформации и разработана методика ее идентификации по опытным данным сжатия цилиндрических образцов в предположении одноосности напряженного состояния. Однако в опытах на сжатие при высокой температуре пластическая деформация образца неравномерная из-за наличия сил трения между образцом и бойком.

В данной работе описываются экспериментальная база и методика идентификации модели сопротивления деформации  $\sigma_s$  для определяющих соотношений упруговязкопластической среды при неоднородной деформации в испытаниях на сжатие цилиндрических образцов.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СЖАТИЕ ОБРАЗЦОВ

Опыты на сжатие цилиндрических образцов проводили на пластометрической установке, созданной в ИМаш УрО РАН. Общий вид установки показан на рис.1. Установка горизонтального типа предназначена для проведения высокотемпературных испытаний на растяжение и сжатие образцов при скорости деформации  $0.01 - 10 \text{ с}^{-1}$  и максимальной силе 25 кН.

Для регулирования скорости нагружения и ее изменения во времени по заданному закону установка снабжена управляемым приводом. Управление работой установки, снятие и обработка экспериментальной информации осуществляется персональным компьютером.



Рис.1. Пластометрическая установка

Образцы для уменьшения тепловых потерь помещаются вместе с бойками в специальный массивный контейнер, показанный на рис. 2. Контейнер нагревается в камерной электропечи до температуры испытания.

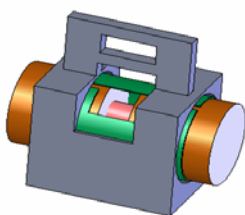


Рис.2. Контейнер с бойками и образцом

Для измерения температуры поверхности образца в процессе испытания применялась тепловизионная система NEC TH-9100WL.

С целью получения опытных данных для определения коэффициента трения  $\psi$  между образцом и бойком в законе трения Амонтона-Куллона проводили серию экспериментов, в которых использовали специально подготовленные образцы. На торцах образцов наносили две взаимно перпендикулярные риски глубиной 0.1 мм и заполняли их графитом. По положению этих рисков после сжатия образца определяли величину его боковой поверхности, перешедшей на контакт с бойком.

Образцы в нагретом состоянии деформировали с разной величиной сжатия и после охлаждения замеряли на них максимальный диаметр  $D_{max}$  и ширину зоны  $\Delta$  свободной поверхности образца, перешедшей на контакт с бойком. Используя многократное конечно-элементное моделирование сжатия образца, подбирали коэффициент трения  $\psi$  путем минимизации отклонения расчетных значений  $D_{max}$  и  $\Delta$  от экспериментальных.

### 3. ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА БОЛЬШИМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ

Построенная в работе [3] вязкопластическая модель сопротивления металла большим высокотемпературным пластическим деформациям представляет следующую систему уравнений:

$$\sigma_s = \sqrt{3}k + (\sqrt{3}/2)\sigma_v, \tag{3}$$

$$\dot{k} = \dot{\rho}V_n - \rho\dot{V}_r, \quad \dot{\rho} = a_1 \exp(-a_2\rho)H - a_3\rho,$$

$$\dot{V}_r = \begin{cases} a_5\Lambda_r R^2 \frac{dR}{dt}, & \text{если } V_r \leq a_6, \\ \dot{V}_r^* \left( \frac{1-V_r}{1-a_6} \right)^{a_7}, & \text{если } V_r > a_6, \\ \dot{V}_r^*, & \text{при } V_r = a_6, \end{cases}$$

$$\Lambda_r = \int_0^{t_r} H dt, \quad \frac{dR}{dt} = H\rho,$$

$$\sigma_v = a_8 \ln(1 + a_9 H).$$

Здесь  $\sigma_v$  – вязкая составляющая напряжения;  $\rho$  – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций за счет пластической деформации;  $\Lambda_r$  – степень деформации сдвига до начала динамической рекристаллизации;  $V_n, V_r$  – нерекристаллизованная и рекристаллизованная доли объема металла, соответственно,  $V_n + V_r = 1$ ;  $R$  – радиус рекристаллизованного зерна,  $R(t_r) = 0$ ,  $t_r$  – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием  $\rho = a_4$ ;  $a_i, i=0, \dots, 9$  – параметры модели, подлежащие идентификации по опытным данным,  $a_0 = k(0)$ ;  $t$  – время.

### 4. АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Разработанный алгоритм идентификации модели сопротивления деформации (3) состоит из нескольких этапов.

На первом этапе производится идентификация модели в начальном приближении по опытным данным на сжатие образцов в предположении о реализации одноосного напряженного состояния в эксперименте. При этом сопротивление деформации в каждый момент времени нагружения рассчитывается по формуле

$$\sigma_s = P/F,$$

где  $P$  – сила сжатия;  $F$  – площадь поперечного сечения образца.

Коэффициенты модели определяются минимизацией квадратичного отклонения расчетных  $\sigma_s(t)$  от экспериментальных  $z(t)$  значений сопротивления деформации на интервале времени  $[0, T]$  деформирования:

$$\Phi(a_0, \dots, a_9) = \int_0^T [\sigma_s(t) - z(t)]^2 dt \rightarrow \min.$$

На втором этапе подбирается коэффициент трения  $\psi$  между образцом и бойком (процедура описана выше). Конечно-элементное моделирование сжатия цилиндрических образцов плоскопараллельными бойками с определяющими соотношениями (1)-(3) выполняли при помощи программы, разработанной в ИМАШ УрО РАН. Напряженно-деформированное состояние образца осесимметричное. При расчетах использовали регулярную сетку с размерностью 75x55 конечных элементов и с переменным шагом.

На третьем этапе методом конечных элементов решается краевая задача сжатия цилиндрического образца с найденным коэффициентом трения  $\psi$ . В результате определяется расчетная зависимость силы дефор-

мирования образца от величины его сжатия, которая в общем случае из-за наличия трения отличается от экспериментальной.

На четвертом этапе производится коррекция кривой сопротивления деформации по рекуррентной формуле  $\sigma_s^{i+1} = \sigma_s^i P/P^i$ , где  $i$  – номер итерации ( $i=0,1,\dots$ );  $\sigma_s^i$  – значение сопротивления деформации на  $i$ -й итерации;  $\sigma_s^{i+1}$  – скорректированное значение сопротивления деформации;  $P^i$  – значение величины силы сжатия образца, полученное по результатам конечно-элементного моделирования на  $i$ -й итерации;  $P$  – экспериментальное значение силы деформирования.

На пятом этапе производится идентификация модели по скорректированным данным сопротивления деформации. После этого осуществляется возврат к четвертому этапу. Если рассчитанная кривая силы деформирования, полученная на четвертом этапе, отличается от экспериментальной на приемлемую величину, то итерационная процедура прекращается.

## 5. ПРИМЕР ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Из стали 08X18H10T (Cr – 18.4; Ni – 9.07; Mn – 0.73; Ti – 0.35; Mo – 0.22; V – 0.057; S – 0.004; P – 0.031; Si – 0.61%) изготовили цилиндрические образцы диаметром  $8 \pm 0.1$  мм и высотой  $12 \pm 0.1$  мм. Для выравнивания механических свойств металла по объему образцы предварительно выдерживали в печи при температуре  $1050^\circ\text{C}$  в течении четырех часов с последующим охлаждением на воздухе.

Образцы помещали в контейнер и нагревали в электропечи до температуры  $950^\circ\text{C}$ . Нагретый контейнер с образцом переносили из печи в захваты установки и деформировали.

Испытания проводили без применения смазки, используя полированные бойки. В процессе деформации измеряли перемещение захватов, силу и температуру поверхности образца. Изменение температуры поверхности образца измеряли профессиональной тепловизионной системой NEC TH-9100WL через прорезь в контейнере, содержащем образец.

Сжатие образцов производили по сложному закону изменения скорости деформирования. При этом на этапе активного нагружения при постоянной скорости перемещения захватов скорость деформации возрастала за счет уменьшения текущей высоты образца. После выключения электропривода установки образец оставался зажатым бойками, и активное нагружение сменялось стадией релаксации. Эксперименты проводили с тремя различными законами изменения средней по объему образца интенсивности скорости деформации сдвига  $H$ , представленными на рис.3, а, б.

Средняя температура поверхности образцов после момента установки контейнера в захваты до начала деформации не понижалась больше чем на  $1^\circ\text{C}$ , а при выдержке в течении 10 с после момента установки контейнера в захваты – не больше чем на  $5^\circ\text{C}$ . Поскольку время деформации не превышало 10 с, то пренебрегли тепловыми потерями в окружающую среду и считали, что вся тепловая энергия пластической деформации расходуется на разогрев образца.

Пунктирными линиями (кр.1 – 3) на рис. 3, в, г показаны соответствующие этим законам экспериментальные кривые изменения сопротивления деформации во времени.

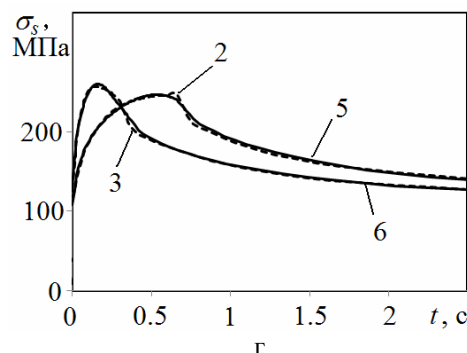
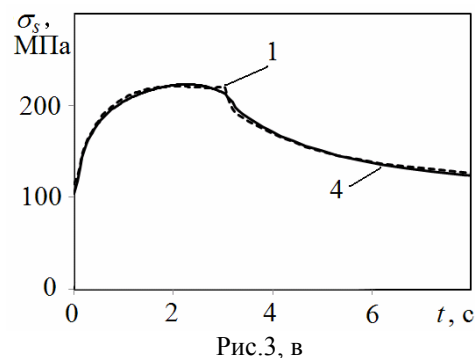
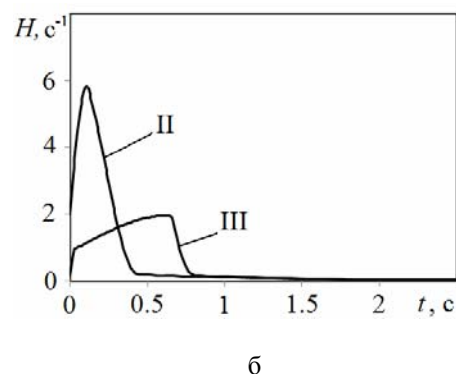
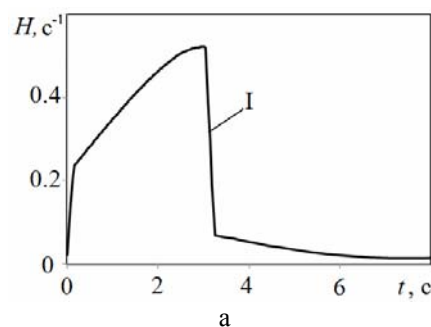


Рис.3. Законы изменения средней по объему образца интенсивности скорости деформации сдвига  $H$  во времени  $t$  (а,б) при испытаниях на сжатие образцов из стали 08X18H10T при температуре испытания  $950^\circ\text{C}$  и изменение сопротивления деформации  $\sigma_s$  (кр.1 – 6) во времени (в, г) при законах деформирования I (кр.1, 4), II (кр.2, 5) и III (кр.3, 6): пунктир – экспериментальные значения, сплошная линия – расчетные значения

На всех этапах алгоритма идентификации модели сопротивления деформации (3) ее параметры  $a_i$  находили, минимизируя суммарное по результатам экспериментов с тремя разными законами изменения  $H$ , представленными на рис. 3, а, б, среднеквадратичное отклонение расчетных значений  $\sigma^j(t)$  от экспериментальных данных  $z^j(t)$  сопротивления деформации на интервалах времени  $[0, T_j]$ , где  $j=1, \dots, 3$ :

$$\Phi(a_0, \dots, a_9) = \sum_{j=1}^3 \int_0^{T_j} [\sigma^j(t) - z^j(t)]^2 dt \rightarrow \min.$$

Целевую функцию  $\Phi$  минимизировали методом конфигураций. Интегрирование системы дифференциальных уравнений модели (3) осуществляли методом Рунге – Кутты четвертого порядка.

Окончательно получили следующие значения параметров модели  $a_0, \dots, a_9$ :  $a_0 = 58$ ,  $a_1 = 1258$ ,  $a_2 = 0.049$ ,  $a_3 = 0.38$ ,  $a_4 = 8.5$ ,  $a_5 = 0.0016$ ,  $a_6 = 0.14$ ,  $a_7 = 2$ ,  $a_8 = 8.3$ ,  $a_9 = 11.9$ .

Температура поверхности образцов в процессе деформации поднялась в среднем на  $35^\circ\text{C}$ . При повышении температуры увеличивается скорость прохождения релаксационных процессов, а так же происходит уменьшение сопротивления деформации металла. В связи с этим полученные значения параметров модели являются усредненными по температурному диапазону процесса испытания.

Сплошными линиями (кр.4 – 6) на рис. 3, в, г показаны рассчитанные по модели (3) с данными коэффициентами зависимости изменения сопротивления деформации  $\sigma_s$  во времени. Данные на этих рисунках свидетельствуют об адекватности модели сопротивления деформации для испытанной марки стали. Среднее по времени относительное отклонение опытных и расчетных значений сопротивления деформации не превысило 2.5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны экспериментальная база и методика идентификации модели сопротивления деформации  $\sigma_s$  для определяющих соотношений упруговязкопластической среды с учетом неоднородности деформации в испытаниях на сжатие цилиндрических образцов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1982. 584 с.
2. Коновалов А. В. Определяющие соотношения для упруговязкопластической среды при больших пластических деформациях // Известия РАН. Механика твердого тела. 2000. № 4. С. 110–118.
3. Коновалов А.В. Вязкопластическая модель сопротивления металла высокотемпературной деформации // Металлы. 2005. № 5. С. 94–98.
4. Коновалов А.В., Смирнов А.С. Вязкопластическая модель сопротивления деформации стали 08X18H10T при температуре горячей деформации // Металлы, 2008, №2, С. 55–59.