

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРИСТОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕЕ КАЛИБРОВАНИИ

В данной работе исследовано деформированное состояние пористого (предварительно сформованного из порошка) осесимметричного изделия при калибровании его по внутреннему диаметру (рис. 1). Особенность осуществления процесса заключается в том, что увеличение внутреннего диаметра трубы при сохранении ее общей длины сопровождается уплотнением пористого материала. Рассматривая любую пористую среду с позиций механики континуума, следует иметь в виду, что возникновение в ней любых пластических деформаций связано с изменением объема и плотности пористого изделия.

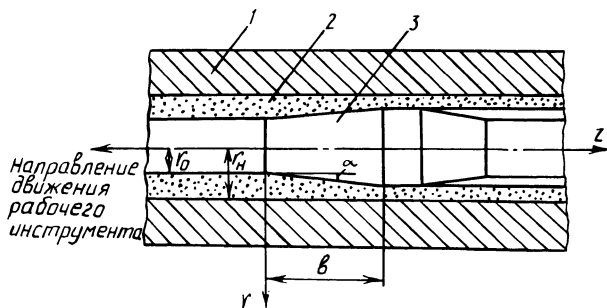


Рис. 1. Схема калибрования пористой трубчатой заготовки по внутреннему диаметру:

1 — матрица; 2 — пористая трубчатая заготовка; 3 — рабочий конический инструмент;  $r_n$  — наружный радиус пористого изделия;  $r_0$  — начальный внутренний радиус;  $\alpha$  — угол профиля рабочего инструмента

Для определения деформированного состояния пористой трубы при ее калибровании используем в качестве расчетной модель пластического поведения пористого тела вида [1], одним из определяющих уравнений которой является условие неразрывности среды:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_z = - \frac{1}{v} \frac{d(1-v)}{dt}, \quad (1)$$

где  $\dot{\epsilon}$ ,  $\dot{\epsilon}_r$ ,  $\dot{\epsilon}_\theta$ ,  $\dot{\epsilon}_z$  — соответственно скорости объемной, радиальной, тангенциальной и осевой деформаций;  $v$  — относительная плотность;  $d(1-v)/dt$  — скорость изменения плотности.

Принимая для упрощения задачи допущение о том, что перемещение порошка происходит только в радиальном направлении, т.е.  $\dot{\epsilon}_z = 0$ , представим соотношение (1) в виде дифференциального уравнения

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} = \dot{\epsilon},$$

общим решением которого является

$$V_r = C/r + 0,5\dot{\epsilon}_r,$$

где  $V_r$  — радиальная компонента вектора скорости;  $C$  — постоянная интегрирования.

Определив значение  $C$  из граничного условия  $V_r \Big|_{r=r_n} = 0$  ( все геометрические параметры соответствуют рис. 1), получим окончательно

$$V_r = -\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_r (r_n^2 / r^2 - 1). \quad (2)$$

Дифференцируя (2) по координате  $r$ , определим компоненты скоростей деформаций:

$$\dot{\epsilon}_r = 0,5\dot{\epsilon} (r_n^2 / r^2 + 1); \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = -0,5\dot{\epsilon} (r_n^2 / r^2 - 1). \quad (4)$$

Используя зависимости, связывающие деформации со скоростями деформаций,  $\dot{\epsilon}_r = d\epsilon_r / dt$  и  $\dot{\epsilon}_\theta = d\epsilon_\theta / dt$  и принимая во внимание (1), получим выражение для деформаций путем интегрирования соотношений (3) и (4):

$$\epsilon_r = -0,5 \ln (v/v_0) (r_n^2 / r^2 + 1); \quad (5)$$

$$\epsilon_\theta = 0,5 \ln (v/v_0) (r_n^2 / r^2 - 1), \quad (6)$$

где  $v_0$  — начальная относительная плотность пористого тела.

Экспериментальное исследование деформированного состояния пористой трубы в чаге уплотнения при ее калибровании проводили методом муаровых полос. Для этого из порошка изготавливались цилиндрические заготовки  $\varnothing 50 \times 42$  мм, длиной 60 мм и относительной плотностью 0,52...0,58, разъемные в меридиональной плоскости. На поверхность указанного меридионального сечения фотохимическим способом в соответствии с [2] наносилась исходная система растров. Затем образцы подвергали деформированию на специальных устройствах согласно схеме, представленной на рис. 1, путем протягивания рабочего конического инструмента с диаметром калибрующей части 46 мм и углом профиля  $6^\circ$ . В качестве смазочного материала использовался коллоидный графит, который наносился на поверхность инструмента. Картины муаровых полос получали непосредственным фотографированием при наложении на деформированный образец исходной сетки растров. Затем осуществляли численную реализацию полос муара.

На рис. 2 представлена зависимость компонент тензора деформаций  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_\theta$ ,  $\epsilon_z$  от плотности деформируемого материала. Экспериментальные кривые получены на основании вышеуказанного метода муаровых полос, а теоретические (показаны пунктиром) рассчитаны в соответствии с формулами (5) и (6). Как видно из рисунка, наблюдается соответствие экспериментальных данных теоретическим расчетам. Полученное значение осевой деформации  $\epsilon_z$  для данных условий нагружения пористого тела весьма незначительно, что дает ос-

нование считать принятое для теоретического решения допущение об отсутствии осевого перемещения порошка правомерным.

При теоретическом исследовании процесса предполагалось условие сохранения массы порошка в очаге уплотнения, поэтому характер изменения плотности изделия по длине зоны прессования может быть описан зависимостью вида

$$v_z = v_0 \frac{r_H^2 - r_0^2}{r_H^2 - r_z^2}, \quad (7)$$

где  $r_z = r_0 + z \operatorname{tg} \alpha$  — текущее значение внутреннего радиуса трубы в очаге прессования.

Принятие такого допущения при решении задачи объясняет некоторое расхождение экспериментальных и теоретических результатов, так как в реальных условиях осевое перемещение порошка хотя и незначительно (это зависит от начальной плотности  $v_0$ ), но имеет место. Предполагая в первом приближении, что изменение плотности по длине очага прессования описывается зависимостью (7), отметим, что характер кривых будет соответствовать характеру распределения деформаций  $\epsilon_{ij}$  по длине зоны уплотнения.

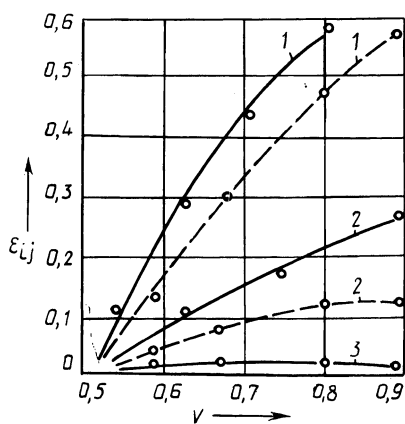


Рис. 2. Зависимость деформаций  $\epsilon_r$  (1),  $\epsilon_\theta$  (2),  $\epsilon_z$  (3) от плотности деформируемого пористого материала

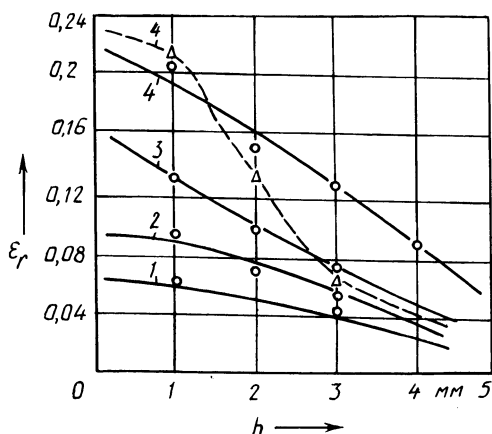


Рис. 3. Характер изменения радиальной деформации  $\epsilon_r$  по толщине стенки прессуемого изделия в очаге уплотнения:  
1 —  $z = 0$ ; 2 —  $z = 6$  мм; 3 —  $z = 12$  мм; 4 —  $z = 20$  мм

На рис. 3 показано изменение радиальной компоненты деформаций по толщине  $h$  стенки прессовки для различных значений координаты  $z$  очага уплотнения. Наблюдается градиент деформации по толщине стенки пористого изделия: наибольшее значение  $\epsilon_r$  имеет место в области его контакта с инструментом; далее, к матрице, радиальная деформация уменьшается. Аналогичен характер изменения плотности по толщине стенки: в объеме материала, прилегающем к поверхности инструмента, она больше, чем около поверхности мат-

рицы. В то же время распределение плотности по длине трубчатого изделия носит равномерный характер.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что калибрование пористых труб приводит к их уплотнению и при правильном выборе профиля инструмента и создании соответствующих условий трения на контактирующих поверхностях обеспечивает получение изделия хорошего качества. Однако применение способа ограничено из-за невозможности калибрования толстостенных пористых труб ввиду неравномерного распределения плотности материала по толщине стенки калибруемого изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др. — Киев, 1982. — 140 с. 2. Сегал В.М., Макушок Е.М., Резников В.И. Исследование пластического формоизменения металлов методом муаровых полос. — М., 1974. — 200 с.

УДК 539.374

А.С. МАТУСЕВИЧ, д-р техн.наук,  
И.Х. ЧУТАЕВ, канд.техн.наук (ФТИ АН БССР)

## УДЕЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ПРЕССОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Повышение прочностных характеристик изделий сложной конфигурации путем их упрочнения волокнами является одной из наиболее трудоемких задач. Разнообразные профили из композиционных материалов со сплошным и частичным армированием могут быть получены с использованием жидкофазной и твердофазной технологий. В первом случае применяется метод непрерывного литья [1], во втором — изостатическое прессование набора однослойных лент, полученных прокаткой или плазменным напылением материала матрицы, а также гибка листовых композиционных материалов в штампах или на профилегибочных станах [2]. При частичном армировании изготавливают профили с одним или несколькими сквозными отверстиями, полости заполняют непрерывными волокнами, а полученную заготовку пропитывают смолой [3].

Для получения частично армированных профилей с металлической матрицей разработан комбинированный способ, включающий непрерывное литье композиционных стержней и последующую их опрессовку материалом оболочки с одновременным формообразованием в профильной матрице [4]. Способ осуществляется на стандартных гидравлических прессах с использованием оснасток для прямого и бокового прессования.

В результате исследований установлено, что прочность соединения композиционного стержня с оболочкой зависит от физико-механических свойств материалов матрицы и оболочки, технологического режима изготовления и шероховатости поверхности упрочняющих стержней, температурно-скоростных параметров прессования и степени деформации материала оболочки в зоне непосредственного контакта со стержнем. Правильный выбор силовых воздейст-