

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ОПРАВОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ТРУБ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В КОНИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ

Амбарцумян А. Ф., Петросян Г. А.

Ա. Ֆ. Համբարձումյան, Գ. Ա. Պետրոսյան

Կոնական մանրամասնություններում կիրառվող բարակապատ խողովակների կալակավոր
ղեկորման գործընթացների տեսական հետազոտությունը

Այս առարկայի նկարագրում է խողովակների կալակավոր պլաստիկ ղեկորման կոնական
մանրամասնություններում ցրանց ներծնշման և կորգանման տեխնոլոգիական գործընթացները նկարագրող
հավասարումների համակարգի ստացմանը: Նշված խնդիրների լուծման իրականացվում է բարակ
հաստությունների մեխոլոգիկական իրական նյութերի պլաստիկության տեսության [4] հիման վրա:

Ստացված հավասարումների հասակարգը նյութի ղեկորման ամրացման և սկզբնական
ժակտիկներության ազդեցության հաշվառմամբ թույլ է տալիս հետազոտել խողովակների ներծնշման և
կորգանման կալակավոր ղեկորման գործընթացների մասնավորություններն ու
ստանդանդայնությունները, ինչը թույլ կտա կատարել տեխնոլոգիական և կոնստրուկտիվ բնույթի
հետազոտություններ:

A. F. Hambardzumyan, G. L. Petrossian

The theoretical investigation of ring sectional thin - wall tubes mandrel
deformation processes in conic dies

Работа посвящена получению системы уравнений, описывающих технологические
процессы пластического деформирования: оправочного выдавливания и волочения
тонкостенных труб в конических матрицах. Решение задач осуществляется методом тонких
сечений на основании зависимостей теории пластичности реальных пористых материалов
[4]

Полученная система уравнений позволяет с учетом влияния деформационного
упрочнения и начальной пористости материала исследовать специфику и особенности
процессов оправочного деформирования труб выдавливанием и волочением, что позволит
делать выводы технологического и конструктивного характера.

Технологические процессы оправочного прессования являются
одними из самых распространенных процессов Обработки Материалов
Давлением (ОМД), назначением которых является уменьшение внешнего
диаметра и толщины стенки труб путем их выдавливания или волочения
через матрицу. Процессы выдавливания и волочения на оправках
используются для получения труб с высокой степенью чистоты
поверхностей и строго лимитированными значениями диаметра и
толщины стенки.

Силы и напряжения при волочении и выдавливании, в основном,
определяют с использованием ряда допущений, упрощающих задачу
и математические операции [1]. При этом снижается точность
результатов и возникает необходимость уточнения принятых ранее
допущений.

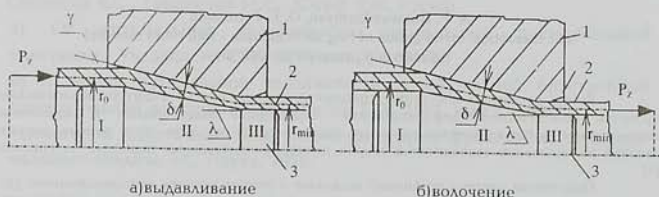
Вопросу анализа напряженно-деформированного состояния труб и
определению величины напряжений при оправочном волочении
посвящена работа [2], где используется метод тонких сечений. В

приведенном решении не учитывается фактор влияния упрочнения материала, а принятое допущение о плоском деформированном состоянии материала трубы, по нашему мнению не достаточно обосновано, так как при волочении труб наблюдаются очевидные деформации в трех направлениях: осевом, радиальном и окружном.

Целью настоящей работы является получение системы уравнений, описывающих технологические процессы оправочного пластического деформирования тонкостенных труб в конических матрицах. Учитывается влияние таких реальных свойств материалов, как эффект упрочнения и наличие микропор и неметаллических включений в металле, создающих в нем начальную микропористость [3]. Решение задачи основывается на теории пластичности реальных пористых материалов [4] с использованием метода тонких сечений.

Исследование технологических операций оправочного деформирования труб в конических матрицах с учетом реальных свойств материалов позволит описать поведение компонентов напряженно-деформированного состояния материала и осветить закономерности изменения механических свойств продукции в течении процесса и в зависимости от условий его производства (что, в свою очередь, даст возможность организовать оптимальную схему регулируемого технологического процесса для достижения комплекса заданных свойств продукции).

Оправочное деформирование труб в зависимости от условий приложения внешних сил осуществляется а) выдавливанием или б) волочением труб в матрицу (фиг. 1).



Фиг.1. Схемы нагрузок труб при их деформировании на неподвижной оправке
(1 – матрица, 2 – труба, 3 – оправка).

Деформационную зону при выдавливании в общем случае можно разделить на следующие три участка (фиг.1): I – осаживания, II – прессования и III – калибровки. Очевидно, что основные деформации имеют место во втором участке, образованном коническими поверхностями оправки и матрицы. В первом и третьем участках, образованных цилиндрическими поверхностями волочильного канала и оправки, энергия, в основном, расходуется на внешнее трение. Следовательно, отыскание полей напряжений и деформаций представляется более целесообразным для второго участка деформирования.

Оправочное выдавливание и волочение по своей сущности близко к задаче прессования металла со сплошным сечением в конических матрицах, при решении которой в [2] было принято допущение о равенстве радиальных и окружных деформаций. Поэтому, более

обоснованым является решение поставленной задачи не на основании допущения о плоском деформированном состоянии материала трубы, а с использованием предположения о равенстве приращений деформаций в окружном $d\epsilon_\theta$ и нормальном $d\epsilon_v$ направлениях поперечного сечения трубы:

$$d\epsilon_\theta = d\epsilon_v \quad (1)$$

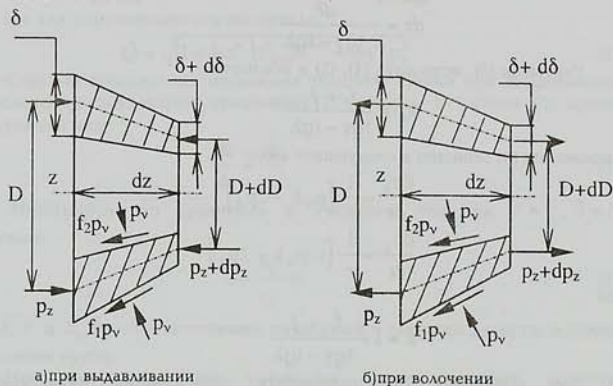
из чего следует также равенство радиальных и окружных напряжений [4]:

$$\sigma_\theta = \sigma_v \quad (2)$$

Заметим, что приращения деформаций $d\epsilon_\theta$ и $d\epsilon_v$ связаны с приращениями радиуса и толщины стенки трубы следующими зависимостями [5]:

$$d\epsilon_\theta = \frac{dr}{r}, \quad d\epsilon_v = \frac{d\delta}{\delta} \quad (3)$$

На фиг. 2 приведены схемы действий напряжений на элемент трубы при деформировании а) выдавливанием, б) волочением.



Фиг. 2. Схема напряженных состояний элементов труб.

Условие равновесия сил, действующих в осевом направлении на коническом элементе трубы длиной dz после некоторых преобразований имеет вид (в дальнейшем условимся помечать формулы для процесса выдавливания буквой а, волочения - б; остальные формулы пригодны для обоих вариантов деформирования):

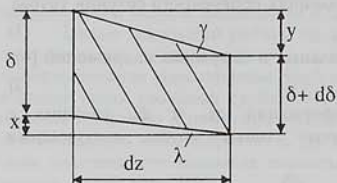
$$2p_z d\delta + \delta dp_z + p_v dz[(\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\lambda) + (f_1 + f_2)] = 0 \quad (4a)$$

$$2p_z d\delta + \delta dp_z - p_v dz[(\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\lambda) + (f_1 + f_2)] = 0 \quad (4б)$$

где γ - угол конусности матрицы, λ - угол конусности оправки, f_1 и f_2 - коэффициенты трения соответственно на внешней и внутренней поверхностях труб, δ - текущая величина толщины стенки трубы.

Формула (4 а) отличается от уравнения равновесия, приведенного в [2] коэффициентом 2 перед первым членом. Это отличие объясняется тем

обстоятельством, что в результате принятого в [2] предположения о плоском деформированном состоянии, диаметр труб в процессе волочения принимается постоянным.



Фиг. 3

Для упрощения уравнений (4) нужно располагать зависимостью между величинами $d\delta$ и dz , для чего из фиг.3 имеем:

$$y + \delta + d\delta = \delta + x \text{ или}$$

$$d\delta = x - y,$$

где

$$x = dz \cdot \operatorname{tg} \lambda,$$

$$y = dz \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

Следовательно, можем написать следующее выражение:

$$dz = - \frac{d\delta}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \lambda} \quad (5)$$

Учитывая (5), используя (1), (2) и обозначив

$$k_1 = \frac{f_1 + f_2}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \lambda}$$

выражения (4) запишем в следующем виде:

$$\frac{dp_z}{dr} = \frac{1}{r} \cdot [p_v k - 2p_z] \quad (6a)$$

$$\frac{dp_z}{dr} = \frac{1}{r} \cdot [-p_v k - 2p_z] \quad (6b)$$

где

$$k = 1 + \frac{f_1 + f_2}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \lambda} \quad (7)$$

Для выявления функциональных зависимостей характеристик процесса, воспользуемся понятием эквивалентного напряжения [4]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\beta^{n+0.5}} \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} + \alpha^m (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (8)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения, α и β — функции пористости материала, которые в пределах изменения пористостей $0 \leq \theta \leq 0.25$ имеют следующие аппроксимированные значения:

$$\alpha = 0.15\theta^{0.6}, \quad \beta = 1 - 1.8\theta^{0.9} \quad (9)$$

m — параметр реальной пористости, n — параметр приведения механических свойств пористого материала к свойствам беспористого.

Анализ схем на фиг. 2 показывает, что при волочении возникают растягивающие продольные напряжения p_z , сжимающие окружные σ_θ и радиальные p_r , а также контактные касательные напряжения fp_v . При выдавливании металл деформируется в условиях всестороннего сжатия, что вызывает существенные изменения напряженно-деформированного состояния материала в деформационной зоне в отличие от волочения.

Отметим также, что элемент трубы на фиг. 2 не является главным и напряжения p_z и p_v не являются главными напряжениями. Однако, в методе тонких сечений используют приближенное условие пластичности, принимая напряжения p_z и p_v главными. Тогда для процессов вдавливания и волочения соответственно будем иметь:

$$\sigma_1 = -p_z, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_\theta = -p_v \quad (10a)$$

$$\sigma_1 = p_z, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_\theta = -p_v \quad (10б)$$

Это предположение является достаточно приемлемым при небольших значениях углов γ, λ и коэффициентов трения f_1 и f_2 .

Постановкой значений главных напряжений (10) в (8) и решением полученного квадратного уравнения относительно p_v , будем иметь:

$$p_v = \frac{(1 - 2\alpha^m)p_z + Q}{1 + 4\alpha^m} \quad (a), \quad p_v = \frac{(2\alpha^m - 1)p_z + Q}{1 + 4\alpha^m} \quad (б) \quad (11)$$

где для упрочняющегося материала

$$Q = \sqrt{(1 + 4\alpha^m)\sigma_{\text{экв}}^2 \beta^{2n+1} - 9\alpha^m p_z^2} \quad (12)$$

С целью определения изменения толщины стенки при выдавливании и волочении используем уравнение (1), которое с учетом (3) примет следующий вид:

$$\frac{d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} \quad (13)$$

Интегрируя это уравнение и учитывая, что при $r = r_0, \delta = \delta_0$ получим:

$$\delta = \frac{\delta_0}{r_0} \cdot r \quad (14)$$

где r_0, r и δ_0, δ — соответственно, начальный и текущий радиусы и толщины стенки трубы.

Используя следующие уравнения теории течения пористых материалов [4],

$$\begin{aligned} d\varepsilon_z &= \frac{\overline{d\varepsilon}_{\text{экв}}}{2\beta^{3n}\sigma_{\text{экв}}} \left[2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 + 2\alpha^m(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ d\varepsilon_\theta &= \frac{\overline{d\varepsilon}_{\text{экв}}}{2\beta^{3n}\sigma_{\text{экв}}} \left[2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1 + 2\alpha^m(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ d\varepsilon_v &= \frac{\overline{d\varepsilon}_{\text{экв}}}{2\beta^{3n}\sigma_{\text{экв}}} \left[2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2 + 2\alpha^m(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

и располагая равенством (3) для приращения окружной деформации, с учетом (2) и (10) устанавливаем:

$$\frac{\overline{d\varepsilon}_{\text{экв}}}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{2\beta^{3n}\sigma_{\text{экв}}}{(1 - 2\alpha^m)p_z - (1 + 4\alpha^m)p_v} \quad (a)$$

$$\frac{d\bar{\epsilon}_{\text{эКВ}}}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{2\beta^{3n}\sigma_{\text{эКВ}}}{(2\alpha^m - 1)p_z - (1 + 4\alpha^m)p_v} \quad (6) \quad (16)$$

где $d\bar{\epsilon}_{\text{эКВ}}$ - эквивалентное приращение пластических деформаций.

Для приращения осевой деформации трубы на основании (2), (15) и (16) имеем:

$$\frac{d\bar{\epsilon}_z}{dr} = \frac{2}{r} \cdot \frac{(1 - 2\alpha^m)p_z + (1 + \alpha^m)p_v}{(1 - 2\alpha^m)p_z - (1 + 4\alpha^m)p_v} \quad (a) ,$$

$$\frac{d\bar{\epsilon}_z}{dr} = \frac{2}{r} \cdot \frac{(1 + \alpha^m)p_z + (1 - 2\alpha^m)p_v}{(2\alpha^m - 1)p_z - (1 + 4\alpha^m)p_v} \quad (6) \quad (17)$$

Дифференциальные уравнения (16) позволят определить степень деформирования материала, и по методике [4] $-\int d\bar{\epsilon}_{\text{эКВ}}$ по длине деформированной части заготовки.

Далее, из диаграммы деформирования материала определяется эквивалентное напряжение в соответствующих точках заготовки. В частном случае, для материала из порошка ПМС-1 диаграмма деформирования может иметь следующий аппроксимированный вид:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_T + B \left(\int d\bar{\epsilon}_{\text{эКВ}} \right)^b \quad (18)$$

где $\sigma_T = 175$ МПа, $B = 500$ МПа, $b = 0.3$ [4].

Изменение величины пористости при пластическом деформировании устанавливается, используя следующее уравнение [4]:

$$d\theta = \frac{3\alpha^m(1-\theta)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)d\bar{\epsilon}_{\text{эКВ}}}{\beta^{3n}\sigma_{\text{эКВ}}} \quad (19)$$

Учитывая выражения (2), (10) и (16), для процессов выдавливания и волочения будем иметь:

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{6\alpha^m(1-\theta)(-p_z - 2p_v)}{(1 - 2\alpha^m)p_z - (1 + 4\alpha^m)p_v} \quad (a)$$

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{6\alpha^m(1-\theta)(p_z - 2p_v)}{(2\alpha^m - 1)p_z - (1 + 4\alpha^m)p_v} \quad (6) \quad (20)$$

Для сведения решений задач выдавливания и волочения к безразмерным величинам произведем следующие обозначения:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{\sigma_T}, \bar{p}_z = \frac{p_z}{\sigma_T}, \bar{p}_v = \frac{p_v}{\sigma_T}, \bar{\sigma}_{\text{эКВ}} = \frac{\sigma_{\text{эКВ}}}{\sigma_T}, \bar{B} = \frac{B}{\sigma_T}, \bar{r} = \frac{r}{r_0}, \bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_0},$$

тогда:

$$\frac{d\bar{p}_z}{dr} = \frac{1}{r} \cdot [\bar{p}_z k - 2\bar{p}_z] \quad (a) \quad , \quad \frac{d\bar{p}_z}{dr} = \frac{1}{r} \cdot [-\bar{p}_z k - 2\bar{p}_z] \quad (6) \quad (21)$$

$$\bar{p}_v = \frac{(1 - 2\alpha^m)\bar{p}_z + \bar{Q}}{1 + 4\alpha^m} \quad (a) \quad , \quad \bar{p}_v = \frac{(2\alpha^m - 1)\bar{p}_z + \bar{Q}}{1 + 4\alpha^m} \quad (6) \quad (22)$$

$$\bar{Q} = \sqrt{(1 + 4\alpha^m)\bar{\sigma}_{\text{эКВ}}^2 \beta^{2n+1} - 9\alpha^m \bar{p}_z^2} \quad (23)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}}}{d\bar{r}} = \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{2\beta^{3n} \bar{\sigma}_{\text{ЭКВ}}}{(1-2\alpha^m)\bar{p}_z - (1+4\alpha^m)\bar{p}_v} \quad (\text{а})$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}}}{d\bar{r}} = \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{2\beta^{3n} \bar{\sigma}_{\text{ЭКВ}}}{(2\alpha^m-1)\bar{p}_z - (1+4\alpha^m)\bar{p}_v} \quad (\text{б}) \quad (24)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_z}{d\bar{r}} = \frac{2}{\bar{r}} \cdot \frac{(1-2\alpha^m)\bar{p}_z + (1+\alpha^m)\bar{p}_v}{(1-2\alpha^m)\bar{p}_z - (1+4\alpha^m)\bar{p}_v} \quad (\text{а})$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_z}{d\bar{r}} = \frac{2}{\bar{r}} \cdot \frac{(1+\alpha^m)\bar{p}_z + (1-2\alpha^m)\bar{p}_v}{(2\alpha^m-1)\bar{p}_z - (1+4\alpha^m)\bar{p}_v} \quad (\text{б}) \quad (25)$$

$$\frac{d\theta}{d\bar{r}} = \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{6\alpha^m(1-\theta)(-\bar{p}_z - 2\bar{p}_v)}{(1-2\alpha^m)\bar{p}_z - (1+4\alpha^m)\bar{p}_v} \quad (\text{а})$$

$$\frac{d\theta}{d\bar{r}} = \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{6\alpha^m(1-\theta)(\bar{p}_z - 2\bar{p}_v)}{(2\alpha^m-1)\bar{p}_z - (1+4\alpha^m)\bar{p}_v} \quad (\text{б}) \quad (26)$$

$$\bar{\sigma}_{\text{ЭКВ}} = 1 + B \left(\int d\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}} \right)^n \quad (27)$$

$$\bar{\delta} = \bar{r} \quad (28)$$

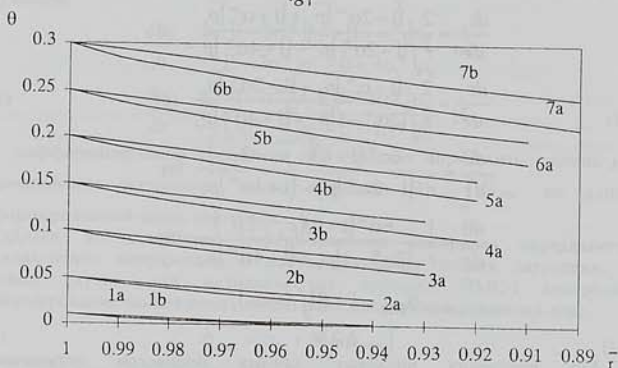
Для получения числовых данных процессов оправочного пластического деформирования тонкостенных труб в конических матрицах, деформационную зону разбиваем на i ступеней деформации и, задаваясь начальными значениями величин $\theta_0, d\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}0}, d\bar{\varepsilon}_z, \bar{\sigma}_{\text{ЭКВ}0}, \bar{\sigma}_z, \bar{\delta}_0, \bar{r}_0$ методом численного интегрирования полученной системы дифференциальных уравнений (21) и (24 - 26), а также зависимостей (22), (23), (27) и (28) находим текущие и конечные значения величин $\theta_i, d\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}}, d\bar{\varepsilon}_z, \bar{\sigma}_{\text{ЭКВ}}, \bar{p}_z, \bar{p}_v, \bar{Q}_i, \bar{\delta}_i$ для каждой ступени процесса деформирования.

Из системы уравнений (21) - (26), описывающих технологические процессы оправочного деформирования труб в конических матрицах, видно, что в основном уравнении равновесия (21) присутствует параметр k , учитывающий влияние коэффициентов трения на обеих поверхностях трубы f_1 и f_2 и углов конусности матрицы γ и оправки λ . Ясно, что разные значения параметра k будут оказывать соответствующее влияние на величину $d\bar{p}_z$ и посредством $d\bar{p}_z$ также на другие компоненты напряженно-деформированного состояния материала. Заметим, что значение параметра k будет определяться, исходя от особенностей процессов деформирования, т. е. вида применяемой оправки и качества смазки на поверхностях трубы. В работе [1] предлагаются разные модификации процессов выдавливания и волочения, среди которых практический интерес представляет применение неподвижных и подвижных цилиндрических оправок ($\lambda = 0$).

При применении подвижной оправки главной особенностью деформирования является отличие напряженного состояния во втором участке по сравнению с деформированием на неподвижной оправке,

закрывающееся в том, что силы трения на внутренней поверхности трубы направлены в сторону выдавливания или волочения, помогая движению металла через канал матрицы [1]. В связи с этим параметр k преобразуется к следующему виду:

$$k = \frac{f_1 - f_2}{\text{tg}\gamma} \quad (29)$$



Фиг. 4

На фиг. 4 приведены диаграммы изменения начальной пористости материала образцов, подвергаемых выдавливанию и волочению при: $\bar{p}_z = 0.4$, $\gamma = 14^\circ$, $\lambda = 10^0$, $f_1 = f_2 = 0.1$. Линии 1 - 7 с индексом а) соответствуют выдавливанию, с индексом б) - волочению образцов с начальной пористостью соответственно $\theta_0 = 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$. Прерывания линий 1 - 7 объясняются завершением процесса деформирования труб (при выдавливании - изменением знака сжимающего напряжения $\bar{\sigma}_z$ на положительный, а при волочении - достижением осевого напряжения величины $\bar{p}_z = 0.4$). Как видно из фиг. 4, в процессах выдавливания и волочения пористость труб уменьшается, причем, при выдавливании труб наблюдается более выраженное "залечивание" пор, чем при волочении. Заметно также, что чем больше начальная пористость образцов, тем большим деформациям подвергается труба, и следовательно, тем меньших значений достигают предельные коэффициенты выдавливания и волочения $K_{\text{пл}} = r_k / r_0 = \bar{r}$, причем возможности формоизменения при обоих видах деформирования одни и те же.

Выявленный эффект влияния пористости материала на характер процесса деформирования позволит предварительно определить возможные значения предельных коэффициентов выдавливания и волочения, даст возможность выбора той или иной схемы нагружения, а также проектирования конструкций матриц и оправок с необходимыми углами конусности и длинами рабочей части, приводящими к получению бездефектной продукции.

Таким образом, полученное решение процессов оправочного деформирования труб выдавливанием и волочением, учитывает влияние пористости и упрочнения материала, специфики и особенностей технологического процесса, что дает возможность делать выводы технологического и конструктивного характера, необходимые в плане организации оптимальной схемы процесса для достижения требуемых механических и эксплуатационных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения. - М.: Металлургия, 1971. 448с.
2. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов: Пер. с англ. -М.: Машиностроение, 1969. 503с.
3. Колмогоров В. Л., Богатов А. А. и др. Пластичность и разрушение. - М.: Металлургия, 1977. 336 с.
4. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. 153 с.
5. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести.-М.: Машиностроение, 1975. 399 с.

Государственный Инженерный
Университет Армении

Поступила в редакцию
7.05.1999