

УДК 539.374, 621.762 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.1

А.А. Бабаян

Национальный политехнический университет Армении

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ СПЕЧЕННОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ УПРОЩЕННЫМ МЕТОДОМ

Процессы прессования и волочения труб в одной и той же конической матрице различаются схемами нагружения. При решении задач для этих процессов наблюдаются определенные сходства и различия. Учитывая, что процесс волочения упрощенным методом изучен в более полном объеме, для исследования процесса прессования спеченной тонкостенной трубы в конической матрице был проведен сравнительный анализ решения задачи указанным выше упрощенным методом процесса волочения.

Дана оценка деформированного и напряженного состояний волоченных и прессованных труб. Обосновывается упрощение основного уравнения равновесия для решения задачи волочения труб в случае отсутствия контактного трения, а для решения задачи прессования труб выбирается более простое условие пластичности. Обсуждаются условие пластичности и основное уравнение равновесия для решения задачи прессования труб.

Для определения пористости при прессовании спеченных труб используется формула деформационной теории пластичности пористых материалов. Численные расчеты производились в программной среде MS EXCEL для начальной пористости материала трубы 10, 20 и 30%. Определяются безразмерные меридиональные, окружные и средние напряжения в трубах, а также величины изменения интенсивности деформаций и текущей пористости материалов зависимости от параметра безразмерного радиуса.

Ключевые слова: тонкостенная труба, прессование и волочение, спеченный материал, пористость, безразмерные напряжения.

А.А. Babayan

INVESTIGATING THE PROCESS OF PRESSING THE SINTERED THIN-WALL PIPE IN A CONICAL MATRIX BY A SIMPLIFIED METHOD

The processes of pressing and drawing pipes in the same conical matrix differ in the loading patterns. Some similarities and differences in solving these problems are observed. Considering that the drawing process, using the simplified method is studied quite completely, to study the pressing process, a comparative analysis of the case for solving the drawing problem, using the simplified method is carried out.

The stress and strain states of the pressed and drawing pipes are evaluated. The simplification of the main equilibrium equation for solving the problem of drawing the tubes in the absence of contact friction, and to solve the problem on the tube pressing a simpler plasticity condition is chosen is justified. For solving the pressing problems, the basic equilibrium equation and the plasticity conditions are discussed.

At pressing sintered tubes, to determine the porosity, the equation of the deformation theory of plasticity of porous materials is used. Numerical calculations were performed in the MS EXCEL software environment with an initial porosity of the pipe material of 10, 20 and 30%.

The dimensionless meridian, circumferential and average stresses of the pipe, as well as the change in the strain intensity and the current porosity, depending on the pipe dimensionless radius parameter are determined.

Key words: thin-walled tube, pressing and drawing, sintered material, porosity, material substance, dimensionless stresses.

А.А. Бабаян

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ СПЕЧЕНИХ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ В КОНІЧНІЙ МАТРИЦІ СПРОЩЕНИМ МЕТОДОМ

Процеси пресування і волочіння труб в одній і тій же конічній матриці розрізняються схемами навантаження. При вирішенні завдань для цих процесів спостерігаються певні подібності та відмінності. З огляду на те, що процес волочіння спрощеним методом вивчений в більш повному обсязі, для дослідження процесу пресування спеченої тонкостінної труби в конічній матриці був проведений порівняльний аналіз рішення задачі зазначеним вище спрощеним методом процесу волочіння.

Дана оцінка деформованого і напруженого станів пресованих труб та труб отриманих методом волочіння. Обґрунтовується спрощення основного рівняння рівноваги для вирішення завдання волочіння труб в разі відсутності контактного тертя, а для вирішення завдання пресування труб вибирається більш проста умова пластичності. Обговорюється умова пластичності та основне рівняння рівноваги для вирішення завдання пресування труб.

Для визначення пористості при пресуванні спечених труб використовується формула деформаційної теорії пластичності пористих матеріалів. Чисельні розрахунки проводилися в програмному середовищі MS EXCEL для початкової пористості матеріалу труби 10, 20 і 30%. Визначаються безрозмірні меридіональні, окружні та середні напруги в трубах, а також величини зміни інтенсивності деформацій і поточної пористості матеріалів залежності від параметра безрозмірного радіусу.

Ключові слова: тонкостінна труба, пресування і волочіння, спечений матеріал, пористість, безрозмірні напруги.

Введение. В [1] изучено напряженно-деформированное состояние спеченных тонкостенных труб из материалов различной пористости в процессе волочения в конической матрице при отсутствии и наличии трения. В этой работе степень деформирования трубы предлагается определять не только по интенсивности деформаций ε_i , используемых для сплошных материалов, но и по эквивалентным деформациям ε_{eq} , применяемым для пористых материалов, для чего было получено уравнение, учитывающее компоненты напряжённого состояния. Численные расчёты, проведенные с помощью данных ε_i и ε_{eq} в программной среде MS EXCEL, для матрицы с конусностью 14° в случаях отсутствия и наличия пористости показывают, что при небольших деформациях их значения достаточно близки друг к другу, при пластической деформации – до $\varepsilon_i \approx 0.5$ (рис.1). Следовательно, в этих случаях вместо ε_{eq} можно использовать легко определяемые данные ε_i . При этом получено множество значений безразмерных меридиональных $\bar{\sigma}_m$ и окружных $\bar{\sigma}_\theta$ напряжений труб, а также множество значений изменения окружной деформации ε_θ , интенсивности деформаций ε_i и пористости ν в зависимости от относительного радиуса трубы r/r_0 , где r_0 – средний начальный радиус трубы у входа в матрицу.

Отметим, что решение [1], в отличие от исследований, проведённых в [2,3] с применением уравнений теории течения пористых материалов, является более простым и легко применимо на практике. Следовательно, проводимые в этом направлении исследования весьма актуальны.

Целью работы является исследование процесса прессования спеченной тонкостенной трубы в конической матрице путем проведения сравнительного анализа упрощённого метода волочения.

Оценка деформированного и напряженного состояний трубы. В обоих случаях труба с начальным средним радиусом r_0 (рис.2), проходя сквозь коническую матрицу, утончается, приобретая радиус r_1 . Допустим, что толщина стенки трубы не изменяется.

Основной деформацией сжимающей трубы является окружная:

$$\bar{\varepsilon}_\theta = \ln \left(\frac{r}{r_0} \right), \quad (1)$$

где r – текущий средний радиус. В этом случае значения главных деформаций будут: $\varepsilon_1 = \bar{\varepsilon}_m = -\bar{\varepsilon}_\theta$, $\varepsilon_2 = \bar{\varepsilon}_v = 0$ и $\varepsilon_3 = \bar{\varepsilon}_\theta$ (где $\bar{\varepsilon}_m$ и $\bar{\varepsilon}_v$ – логарифмические деформации по меридиональным и нормальным к поверхности трубы направлениям), а интенсивность деформаций ε_i определяется по следующей формуле [4]:

$$\varepsilon_i = (\sqrt{2/3}) \sqrt{(\bar{\varepsilon}_m - \bar{\varepsilon}_v)^2 + (\bar{\varepsilon}_v - \bar{\varepsilon}_\theta)^2 + (\bar{\varepsilon}_\theta - \bar{\varepsilon}_m)^2} = (2/\sqrt{3}) |\bar{\varepsilon}_\theta| = (1.155) \ln(r_0/r). \quad (2)$$

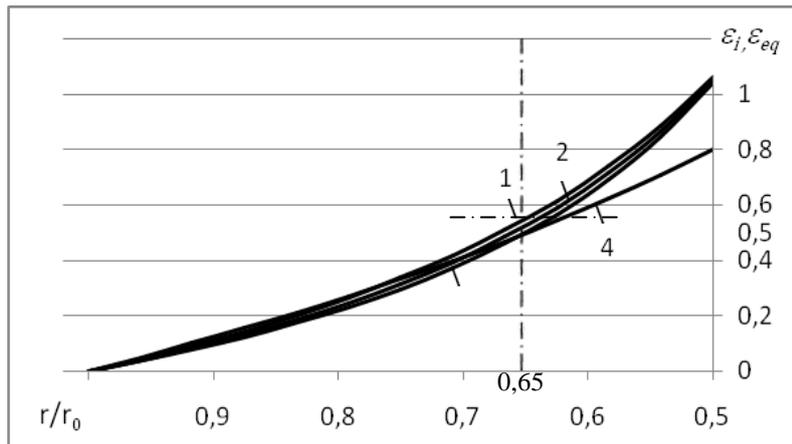


Рис. 1. Графики ε_i и ε_{eq} при разной степени деформации трубы, при небольших деформациях ($r/r_0=0,65$ слева) значения ε_i и ε_{eq} достаточно близки

Напряженное состояние во всех точках трубы плоское, а меридиональное σ_m и окружное σ_θ напряжения являются главными напряжениями:

- при волочении: $\sigma_1 = \sigma_m$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$; (3)

- при прессовании: $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = \sigma_m$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$. (4)

Как видим, при волочении трубы меридиональное напряжение положительное (растягивающее), а при прессовании - отрицательное (сжимающее).

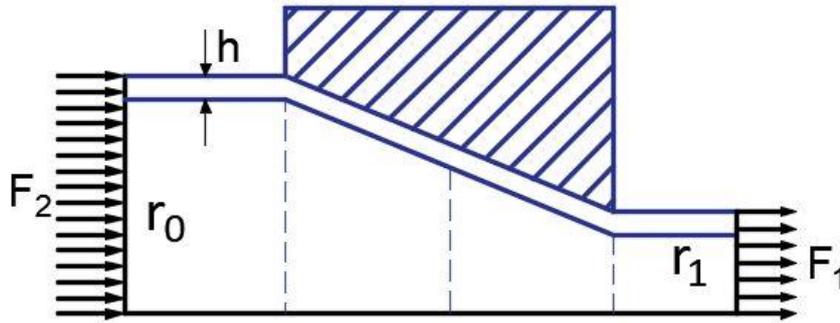


Рис. 2. Расчетная схема деформирования трубы: в случае воздействия только силы F_1 происходит волочение, а в случае воздействия только силы F_2 - прессование

Уравнения равновесия (УР) и условия пластичности (УП) при решении задачи волочения и прессования трубы. УР при деформировании тонкостенной цилиндрической трубы в конической матрице следующие [4]:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r h) - \sigma_\theta h + \frac{p_m r}{\sin \alpha} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = -\frac{p_v}{h}, \quad (6)$$

Где $\rho_\theta = r / \cos \alpha$ - радиус кривизны сечения трубы конической поверхностью, перпендикулярной к дуге меридионала; r - радиус окружности в сечении плоскостью, перпендикулярной коси трубы; h - толщина стенки трубы; p_m и p_v - интенсивности распределенной контактной нагрузки на внешнюю поверхность трубы соответственно в меридиональном и нормальном направлениях; α - угол между касательной к меридиану и осью трубы.

Для составления УП используем упрощенный метод из [5]:

1. При волочении для трубы используем следующее приближенное УП Мизеса [1, 5]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k \sigma_T, \quad (7)$$

где с учетом (3) получено

$$\sigma_m - \sigma_\theta = k \sigma_T, \quad (7a)$$

k - коэффициент Лодэ; σ_T - предел текучести материала.

2. При прессовании, учитывая приближенное УП Мизеса (4), уравнение (7) примет следующий вид [6]:

$$\sigma_\theta = -k \sigma_T. \quad (7б)$$

Особенности решения задачи при волочении трубы. При волочении трубы решение уравнений равновесия (5) и (7a) представляется в следующем виде [5]:

$$\frac{d\sigma_m}{\sigma_m \mu \cot \alpha - k \sigma_T (1 + \mu \cot \alpha)} = \frac{dr}{r}, \quad (8)$$

после интегрирования которого для определения безразмерного меридионального напряжения $\bar{\sigma}_m$ получим

$$\bar{\sigma}_m = \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha}\right) \left\{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \cot \alpha}\right\}, \quad (9)$$

где μ - коэффициент трения;

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_m}{k \sigma_T}. \quad (10)$$

Отметим, что решить задачу с помощью (9) при отсутствии трения ($\mu = 0$) невозможно, так как μ находится в знаменателе. Для этого необходимо преобразовать его.

Введём обозначение:

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \cot \alpha} = a \quad (11)$$

и логарифмируем его:

$$-\mu \cot \alpha \left(\ln \frac{r_0}{r}\right) = \ln a.$$

В результате получим

$$a = \exp\left(-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}\right) \quad (12)$$

Подставив значение a из (12) в (11), получим

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha} = e^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}. \quad (13)$$

Далее, разложив $e^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}$ в ряд и используя два первых члена согласно следующей формуле [7]:

$$e^{-x} = 1 - \frac{x}{1!},$$

получим

$$e^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}} = 1 - \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}{1!}.$$

Следовательно, (13) примет следующий вид:

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha} = 1 - \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}{1!}.$$

Подставив его в (9), получим

$$\bar{\sigma}_m = \left(1 + \frac{1}{\mu \operatorname{ctg} \alpha}\right) \left(\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}\right).$$

Далее преобразуем ее к виду

$$\bar{\sigma}_m = \mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r} + \ln \frac{r_0}{r}. \quad (14)$$

В случае отсутствия трения, когда $\mu = 0$, из (14) получится приведенная в [5] формула

$$\bar{\sigma}_m = \ln \frac{r_0}{r}. \quad (15)$$

Что касается определения безразмерной величины окружного напряжения $\bar{\sigma}_\theta$ при волочении, то используется формула (7а):

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{k \sigma_T}. \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_m - 1. \quad (17)$$

Значения меридионального σ_m и окружного σ_θ фактических напряжений для различных материалов, имеющих важное практическое значение, определяются на основе (10) и (16):

$$\sigma_m = \bar{\sigma}_m k \sigma_T \text{ и } \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta k \sigma_T. \quad (18)$$

Что касается случая спеченных труб, то вместо (18) необходимо использовать УП пористых материалов, приведенные в [2]. В результате уравнения (18) примут вид

$$\sigma_m = \bar{\sigma}_m (1 - \nu_0)^{n+0.5} k \sigma_T \text{ и } \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta (1 - \nu_0)^{n+0.5} k \sigma_T. \quad (19)$$

Следовательно, для определения компонентов напряженного состояния при решении задачи волочения спеченной трубы в конической матрице без контактного трения необходимо использовать систему уравнений (15), (17) и (19).

Решение задачи для прессования трубы. Используя уравнения равновесия (5) и (6) и УП (7б), получим следующее дифференциальное уравнение решения задачи:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r) + (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \sigma_T = 0,$$

решение которого при граничном условии (когда $r = r_1, \bar{\sigma}_m = 0$) (рис. 2) проводится по следующей формуле определения безразмерного меридионального напряжения $\bar{\sigma}_m$:

$$\bar{\sigma}_m = -(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) (1 - r_1/r). \quad (20)$$

Что касается определения безразмерного окружного напряжения $\bar{\sigma}_\theta$, то для этого используется формула (7б):

$$\bar{\sigma}_\theta = -1. \quad (21)$$

Таким образом, для определения безразмерных компонентов напряженного состояния при прессовании трубы используются формулы (20) и (21).

Определение пористости при прессовании спеченных труб. Для определения пористости при прессовании спеченных труб используется следующая формула определения текущей пористости V деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТПМ) [2, 8]:

$$v = 1 - (1 - \nu_0) \exp\left(-\frac{9\nu_0^m \sigma_0 \varepsilon_{\theta q}}{(1 - \nu_0)^{3m} \sigma_{\theta q}}\right), \quad (22)$$

Где v_0 - начальная пористость материала; m и n - параметры пористости материала; $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ - среднее напряжение.

Предположим, что материал неупрочняемый, т.е. $\sigma_{\text{ср}} = \sigma_{\text{Тв}}$, и в соответствии с [1] эквивалентную деформацию заменим интенсивностью деформаций $\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_i$.

Численные расчеты были произведены в программной среде MS EXCEL. В табл. 1 и 2 приводятся данные изменения компонентов напряженно-деформированного состояния трубы в случаях отсутствия ($\mu = 0, \alpha = 14^\circ, c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1$) и наличия ($\mu = 0.1, \alpha = 14^\circ, c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1.4$) трения и изменения значений начальной пористости ($v_{10}=0.1, v_{20}=0.2$ и $v_{30}=0.3$) материала в конической матрице, в зависимости от его относительного радиуса r/r_0 , приследующих заданных значениях параметров пористости материала: $m = 1, n = 0.25$.

Таблица 1

Данные прессования трубы в случае наличия трения при $c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1.4$

r/r_0	$\bar{\varepsilon}_\theta$	$\bar{\varepsilon}_i$	r_1/r	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{\sigma}_0$	v_1	v_2	v_3
1	0	0	0.6	-0.560	-0.520	0.1	0.2	0.3
0.98	-0.020	0.023	0.612	-0.543	-0.514	0.089	0.179	0.270
0.96	-0.041	0.047	0.625	-0.525	-0.508	0.079	0.158	0.238
0.94	-0.062	0.071	0.638	-0.506	-0.502	0.068	0.137	0.206
0.92	-0.083	0.096	0.652	-0.487	-0.496	0.057	0.114	0.172
0.9	-0.105	0.122	0.667	-0.467	-0.489	0.046	0.092	0.137
0.88	-0.128	0.148	0.682	-0.445	-0.482	0.035	0.069	0.100
0.86	-0.151	0.174	0.698	-0.423	-0.474	0.025	0.046	0.063
0.84	-0.174	0.201	0.714	-0.400	-0.467	0.014	0.023	0.025
0.82	-0.198	0.229	0.732	-0.376	-0.459	0.003	-0.001	-0.014
0.8	-0.223	0.258	0.75	-0.35	-0.450	-0.008	-0.024	-0.054

Таблица 2

Данные прессования трубы в случае отсутствия трения при $c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1$

r/r_0	$\bar{\varepsilon}_\theta$	$\bar{\varepsilon}_i$	r_1/r	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{\sigma}_0$	v_1	v_2	v_3
1	0	0	0.6	-0.400	-0.467	0.1	0.2	0.3
0.98	-0.020	0.023	0.612	-0.388	-0.463	0.090	0.181	0.273
0.96	-0.041	0.047	0.625	-0.375	-0.458	0.081	0.162	0.245
0.94	-0.062	0.071	0.638	-0.362	-0.454	0.071	0.143	0.215
0.92	-0.083	0.096	0.652	-0.348	-0.449	0.061	0.123	0.185
0.9	-0.105	0.122	0.667	-0.333	-0.444	0.051	0.102	0.153
0.88	-0.128	0.148	0.682	-0.318	-0.439	0.041	0.082	0.120
0.86	-0.151	0.174	0.698	-0.302	-0.434	0.031	0.060	0.086
0.84	-0.174	0.201	0.714	-0.286	-0.429	0.021	0.039	0.051
0.82	-0.198	0.229	0.732	-0.268	-0.423	0.011	0.017	0.015
0.8	-0.223	0.258	0.75	-0.250	-0.417	0.001	-0.005	-0.022

На рис. 3 показаны кривые изменения пористости материалов для тонкостенных труб зависимости от r/r_0 при начальных значениях пористости 10, 20 и 30%.

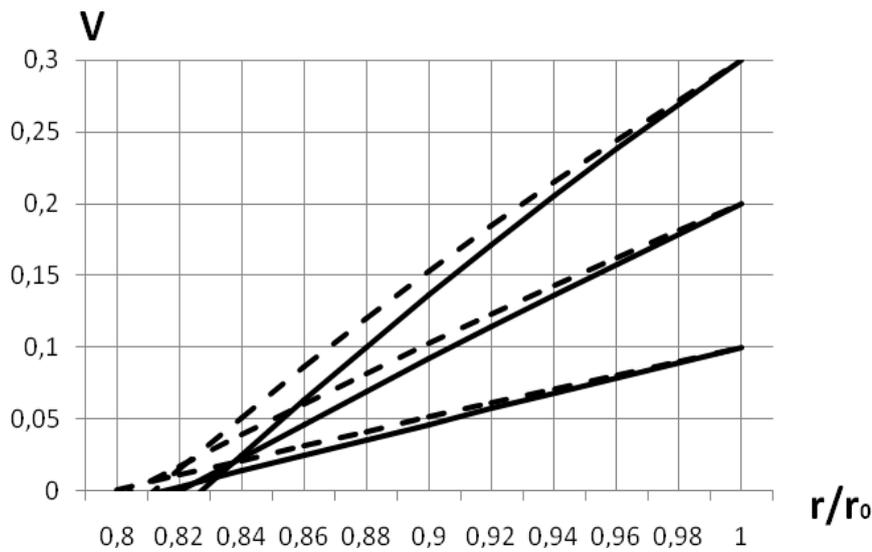


Рис. 3. Кривые изменения начальной пористости $v_0 = 10, 20$ и 30% в зависимости от r/r_0 в случаях: $f = 0$ (пунктир) и $f = 0.1$ (сплошная линия)

Данные табл. 1 и 2, а также рис. 3 показывают, что в случае наличия контактного трения уплотнение материала происходит более интенсивно. Пористость материалов становится нулевой при интенсивности деформаций ε_i в пределах $21,9...25,8\%$, что соответствует величинам относительных радиусов r/r_0 интервала $0,8275...0,8$.

Заключение

1. Исследование напряженно-деформированного состояния процесса прессования труб в конической матрице при отсутствии и наличии трения проводится путем сравнительного анализа упрощенного метода решения задачи волочения.

2. Обосновывается упрощение основного уравнения равновесия при решении задачи волочения трубы в случае отсутствия контактного трения, а при решении задачи прессования выбирается более простое условие пластичности.

3. При прессовании спеченных труб для определения пористости используется формула деформационной теории пластичности пористых материалов. При этом вместо $\varepsilon_{\text{вк}}$ используются легко определяемые данные ε_i , которые при небольших деформациях достаточно близки значениям $\varepsilon_{\text{вк}}$.

4. Численные расчеты производились в программной среде MS EXCEL при начальной пористости материала трубы 10, 20 и 30%. Определены безразмерные меридиональные, окружные и средние напряжения труб, а также величины изменения интенсивности деформаций текущей пористости материала в зависимости от r/r_0 .

5. Графики пористости материала из тонких труб различной пористости показывают, что вид кривых изменений в зависимости от r/r_0 одинаков, и пористость становится нулевой при интенсивности деформаций ε_i в пределах $21,9...25,8\%$. При этом в случае наличия контактного трения уплотнение материала происходит более интенсивно.

Литература

1. Петросян Г.Л., Маргарян М.А., Варданян Г., Бабаян А.А. Исследование процесса волочения тонкостенной спеченной трубы через коническую матрицу // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. - Ереван, 2019. - Том 72, N1. - С.5-14.
2. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов.- М.: Metallurgia, 1988.-153с.
3. Petrosyan G.L., Hambardzumyan A.F. Investigation of porous materials processing in conic dies // NATO Workshop. Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Process, Kiev, 2000.- IOS Press, Amsterdam. NATO Science. Series III.- 2001.- Vol. 176.- P.204-216.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975.- 400 с.
5. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров. - М.: Машиностроение, 1979.- 567 с.
6. Сторожев М.Б., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. -М.: Машиностроение, 1977. -423с.
7. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы.- М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983.- 173 с.
8. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Левонян Г.Л. Усовершенствование инженерного метода использования формулы для определения пористости спеченных материалов // Материалы секции <<Наука и технологии будущего>> Международного конгресса, посвященного 160-летию со дня рождения выдающегося русского инженера В.Г. Шухова, 17-18 апреля 2014 года. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.- С. 211-217.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2019