

Г.Л. ПЕТРОСЯН, В.Г. ПЕТРОСЯН, Г.Л. ЛЕВОНЯН

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ ИЗ ПОРИСТЫХ
МАТЕРИАЛОВ В КОНИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ**

Выявлены особенности аналитического метода исследования процесса горячего прессования тонкостенных спеченных труб с различной начальной пористостью в конической матрице. Использована теория упрочнения кратковременной ползучести пористых материалов. Для определения начальных значений безразмерных меридиональных сжимающих напряжений в программной среде “MATCAD” выполнено численное моделирование. Рассмотрены вопросы получения и использования уравнения состояния горячей обработки материала. Дан анализ полученных численных значений и проведено их сравнение с данными горячего волочения труб.

Ключевые слова: спеченная труба, пористость, горячее прессование, теория упрочнения кратковременной ползучести пористых материалов, уравнение состояния, окружное и меридиональное напряжения, численное моделирование.

Для решения современных практических задач в различных областях промышленности широкое применение получили спеченные материалы с высокими физико-механическими и исключительными эксплуатационными свойствами. С точки зрения получения таких материалов, большую роль играют различные методы холодной и горячей [1-4] обработок давлением порошковых материалов (волочение, прессование, прокатка и т.д.).

Недостатками процессов холодной обработки являются большие силы деформирования и низкая плотность порошковых материалов, поэтому на практике часто используют методы обработки материалов в условиях высоких температур.

Решение технологических задач горячей обработки сплошных материалов при высоких деформациях основано на уравнениях кратковременной ползучести металлов и результатах сложно реализуемых экспериментальных исследований в условиях высоких температур [5-7], в итоге которых составляется уравнение состояния материала – формула зависимости эквивалентного напряжения σ_{eq} от эквивалентной скорости деформаций $\dot{\xi}_{eq}$, температуры деформирования T и параметров, характеризующих материал.

С учетом ползучести в [5, 6] решено множество технологических задач горячей обработки. В [5] показано, что если по сравнению с деформацией

ползучести не учитывать упругие и пластические деформации, то можно получить упрощенные и достаточно приемлемые результаты. В [6] работы, посвященные решению задач по теории ползучести, разделены по характеру использования уравнения состояния материала на три группы и приведен их подробный анализ.

Задачам горячей обработки давлением порошковых материалов посвящено мало работ, так как в отличие от сплошных материалов, в результате всех процессов уплотнения и формоизменения порошковых материалов имеет место изменение пористости материала, учет которой усложняет решение задач. Теоретическим и экспериментальным путем исследованы различные процессы горячей деформации спеченных порошковых материалов. В работах [2-4], имеющих материаловедческое направление, учитываются структурные вопросы материалов, обсуждаются молекулярные и атомные механизмы деформирования, анализируются методы формования заготовок и т.д. Работа [8] основана на классической теории ползучести, в которой, используя формулы теории пластичности пористых материалов [1], получен вариант теории упрочнения кратковременной ползучести пористых материалов (ТУКППМ), где за основу берутся понятия эквивалентного напряжения σ_{eq} , скорости изменения $\theta = dv/dt$ пористости материала v , эквивалентной скорости деформаций ползучести ξ_{eq} и компонентов тензора скоростей деформаций ξ_{ij} . Исходя из вышесказанного, представляет актуальность исследование технологических процессов получения спеченных труб из пористых порошковых материалов горячим прессованием.

Целью работы является выявление особенностей исследования аналитическим методом процесса горячего прессования тонкостенной пористой трубы в конической матрице и его численное моделирование в программной среде "MATCAD".

Для решения задач используются следующие уравнения ТУКППМ [8]:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\beta^{0.5}} (\sigma_i^2 + 9\alpha \sigma_0^2)^{0.5}, \quad (1)$$

$$\xi_{eq} = \beta^{-0.5} (\xi_i^2 + \xi_0^2 / \alpha)^{0.5}, \quad (2)$$

$$\xi_{ij} = 3\xi_{eq} [\sigma_{ij} - (1 - 2\alpha) \delta_{ij} \sigma_0] / 2\sigma_{eq}, \quad (3)$$

$$\theta = 9\alpha (1 - v) \sigma_0 \xi_{eq} / \sigma_{eq}, \quad (4)$$

где

$$\sigma_i = (1/\sqrt{2}) \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_0 = \delta_{ij} \sigma_{ij} / 3 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3. \quad (6)$$

Здесь σ_i - интенсивность напряжений; σ_0 - среднее нормальное напряжение; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные нормальные напряжения; σ_{ij} - компоненты тензора напряжений; δ_{ij} - символ Кронекера; α и β - функции пористости и $\xi_0 = \delta_{ij} \xi_{ij} / 3$ - средняя величина скоростей деформаций.

В [8] задача решается для модели нелинейно вязкого тела, и к формулам (1) - (6) добавляется при заданной температуре следующее уравнение состояния [5]:

$$\sigma_{eq} = \alpha_{(T)} \xi_{eq}^{b_1}, \quad (7)$$

где $\alpha_{(T)}$ и b_1 - постоянные механические характеристики вещества пористых материалов, получаемые методами, приведенными в работах [5-7]. Для упрощения определения основной характеристики, учитывающей пористости материала $\alpha_{(T)}$, можно предположить, что как b_1 , так и другие параметры (температура T и скорость деформации ξ) постоянны.

Отметим, что коэффициенты уравнения (7) для беспористой стали 45 при $800^0 C \leq T \leq 1200^0 C$ и $0,1 \leq \xi \leq 100 c^{-1}$ имеют следующий численный вид [5,7]: $\alpha_{(T)} = 1330 / (e^{0,0025T}) MPa$, $b_1 = 0,143$. В частном случае, если $T = 800^0 C$, то уравнение (7) примет вид

$$\sigma = 180 \xi^{0,143} MPa. \quad (8)$$

Для пористой стали 45 также принимаем $b_1 = 0,143$, а экспериментально определяемая величина $180 MPa$ уменьшится тем больше, чем больше пористость, как это имеет место при холодной обработке пористых материалов [1], т.е. $\alpha_{(T)}$ зависит также от пористости материала.

На рис. 1 показаны прессовка и схема прессования тонкостенной трубы 1 со средним начальным радиусом r_0 и толщиной стены δ_0 в матрице 2 с углом конусности φ . Задача решена на основании безмоментной теории оболочек вращения. Напряженное состояние трубы считается плоским, а напряжения σ_m и σ_θ - главными [5].

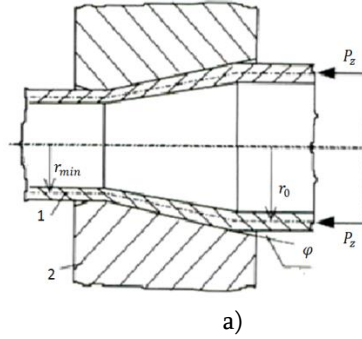


Рис. 1. Схема прессования трубы в конической матрице (а) и прессовка (б)

Аналитическое решение задачи горячего волочения тонкостенной пористой трубы в конической матрице приведено в [9]. Отметим, что в этом случае полученная безразмерными величинами система основных уравнений применима также при прессовании трубы:

$$\frac{d\bar{\sigma}_m}{d\bar{r}} = -\frac{1}{\bar{r}} \left[\frac{\bar{\sigma}_m(1-2\alpha)[3\bar{\sigma}_m - (2 + fctg\varphi)\bar{Q}] + (1 + fctg\varphi)\bar{Q}^2}{2(1+\alpha)\bar{Q}} - \bar{\sigma}_m \right], \quad (9)$$

$$\frac{d\bar{\delta}}{d\bar{r}} = \frac{\bar{\delta}}{\bar{r}} \frac{(1-2\alpha)(3\bar{\sigma}_m - \bar{Q})}{2(1+\alpha)\bar{Q}}, \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{v}}{d\bar{r}} = \frac{3\alpha(1-\nu)(\bar{Q} - 3\bar{\sigma}_m)}{\bar{r}(1+\alpha)\bar{Q}}, \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{eq} = \left[(1+\alpha)\beta - 3(1+4\alpha)(\bar{\sigma}_m / 2\bar{\sigma}_{eq})^2 \right]^{m_1/2} (\bar{r}^2 \bar{\delta} \bar{\rho})^{m_1}, \quad (12)$$

$$\bar{Q} = \left[4(1+\alpha)\beta \bar{\sigma}_{eq}^2 - 3(1+4\alpha)\bar{\sigma}_m^2 \right]^{1/5}, \quad (13)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \left[(1-2\alpha)\bar{\sigma}_m - \bar{Q} \right] / 2(1+\alpha), \quad (14)$$

где $\bar{r}$ – радиус окружности сечения, перпендикулярного к оси трубы; $\bar{\delta}$ – текущая толщина стенки; f – коэффициент трения. При этом сделаны следующие обозначения: $r/r_0 = \bar{r}$, $dr/r_0 = d\bar{r}$, $\delta/\delta_0 = \bar{\delta}$, $d\delta/\delta_0 = d\bar{\delta}$, $\rho/\rho_0 = \bar{\rho}$, $\sigma_{eq}/\sigma_* = \bar{\sigma}_{eq}$, $\sigma_m/\sigma_* = \bar{\sigma}_m$, $\sigma_\theta/\sigma_* = \bar{\sigma}_\theta$, а также

$$\sigma_* = a\xi_*^{m_1}, \quad \xi_* = V_0 \sin\varphi/r_0. \quad (15)$$

Из (15) следует, что величины ζ_* и σ_* в заданных температурно-скоростных условиях (a , m_1 и V_0) для данного материала трубы, подвергающейся прессованию в конической матрице (φ, r_0) , постоянны.

Отметим, что для получения дифференциальных уравнений (9)-(11) используются формулы $d\varepsilon_\theta = dr/r$, $d\varepsilon_v = d\delta/\delta$ определения приращения деформаций в окружном направлении и в направлении нормали оболочки трубы, а также формулы $d\varepsilon_\theta = \xi_\theta dt$, $d\varepsilon_v = \xi_v dt$, выраженные скоростями деформаций (ξ_θ , ξ_v) [5], и уравнения (3) и (4) ТУКППМ.

С целью получения численных данных зону деформации разделим на степени деформации ($\Delta \bar{r}_i$) и, придавая величинам v_0 , $\bar{\delta}_0 = 1,0$; $\bar{r}_0 = 1,0$ и $\bar{\sigma}_{m_0}$ начальные значения, численным методом проинтегрируем систему дифференциальных уравнений (9)-(11). Используя выражения (12)-(14), для каждой степени процесса деформирования трубы получим текущие значения v , $\bar{\sigma}_m$, $\bar{\sigma}_\theta$, $\bar{\delta}$.

Важное значение в процессе интегрирования придается формуле (12) – уравнению состояния материала при его горячей обработке, чем и отличается, в основном, горячее деформирование от холодного. Это уравнение трансцендентное, с чего и начинается решение задачи: на основании начальных данных, определяя $\bar{\sigma}_{eq_0}$ и используя другие уравнения и формулы, определяются все неизвестные величины.

Отметим, что решение задачи горячей обработки тонкостенной пористой трубы в конической матрице по сравнению с волочением в основном отличается тем, что начальное значение меридионального напряжения $\bar{\sigma}_{m_0}$ неизвестно, в то время как меридиональное начальное напряжение волочения нулевое $\bar{\sigma}_{m_0} = 0$. Это достаточно упрощает решение задачи, так как упрощается трансцендентное уравнение (12) для определения $\bar{\sigma}_{eq_0}$.

При прессовании трубы для определения $\bar{\sigma}_{m_0}$ используется метод компьютерного моделирования, согласно которому учитывается тот факт, что на практике процесс прессования реализуется маленьким шагом, в соответствии с чем зона деформирования делится на 5 степеней, по $\Delta \bar{r}_i = -0,05$ в каждой. Придавая $\bar{\sigma}_{m_0}$ определенные значения, выполняется численное интегрирование (9)-(14) таким образом, чтобы после пятого интегрирования $\bar{\sigma}_m$ приняло значение 0. После полученного значения $\bar{\sigma}_{m_0}$ по формуле (12) определяется $\bar{\sigma}_{eq}$.

Следует отметить, что для обычных материалов формула (12) достаточно упрощается, так как характеризующие пористость члены уравнения приравни-

ваются единице, а из-за меньшего значения $\bar{\sigma}_{m0}$ начальное и текущее значения $\bar{\sigma}_{eq}$ достаточно близки единице ($\bar{\sigma}_{eq} \approx 1$).

Использование формулы (12) для пористых материалов показало, что для случаев $v_{01}=0,1$, $v_{02}=0,2$ и $v_{03}=0,3$ также получаем $\bar{\sigma}_{eq} \approx 1$, причем самая большая разница получается при 30% - й пористости, когда $\bar{\sigma}_{eq} = 1,048$. В таблице приведены численные данные задачи при 20% - й начальной пористости и $\bar{\sigma}_{eq} = 1$, $\varphi = 14^\circ$, $f = 0,1$, $\Delta \bar{r}_i = -0,05$.

Таблица

Данные решения задачи при $v_0=0,2$, $\bar{\sigma}_{eq} = 1$, $\varphi = 14^\circ$, $f = 0,1$, $\Delta \bar{r}_i = -0,05$

$\bar{r}$	$\bar{\sigma}_{eq}$	$\Delta \bar{\sigma}_m$	$-\bar{\sigma}_m$	$-\bar{\sigma}_\theta$	$\Delta \bar{\delta}$	$\bar{\delta}$	$-\Delta v$	v	$\bar{Q}$
1,0	1,0	-	0,17	0,842	-	1,0	-	0,2	1,92
0,95	1,039	0,031	0,139	0,899	0,0158	1,02	0,025	0,175	2,02
0,90	1,049	0,033	0,106	0,927	0,0179	1,03	0,023	0,152	2,06
0,85	1,062	0,033	0,074	0,954	0,0201	1,05	0,022	0,130	2,10
0,80	1,075	0,033	0,041	0,976	0,0224	1,08	0,020	0,110	2,14
0,75	1,090	0,033	0,008	0,996	0,0250	1,10	0,018	0,092	2,17

На основании полученных данных построены графики безразмерных величин $\bar{\sigma}_m$; $\bar{\sigma}_\theta$; $\bar{\delta}$ и текущей пористости v в зависимости от безразмерного радиуса $\bar{r}$ (рис. 2 и 3): кривая 1 – при $v_0=0,1$; кривая 2 – при $v_0=0,2$; кривая 3 – при $v_0=0,3$. Причем соответствующие им меридиональные напряжения получили следующие начальные значения: $\bar{\sigma}_{m01} = -0,12$; $\bar{\sigma}_{m02} = -0,17$ и $\bar{\sigma}_{m03} = -0,20$.

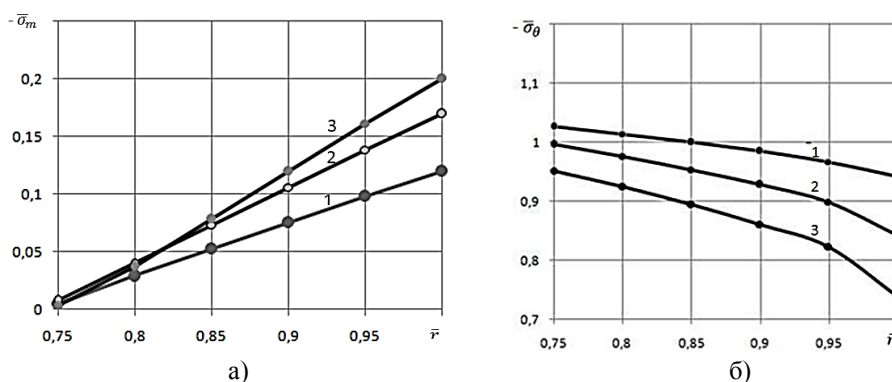


Рис. 2. Графики меридионального $\bar{\sigma}_m$ (а) и окружного $\bar{\sigma}_\theta$ (б) напряжений трубы: 1 - $v_0=0,1$, 2 - $v_0=0,2$, 3 - $v_0=0,3$

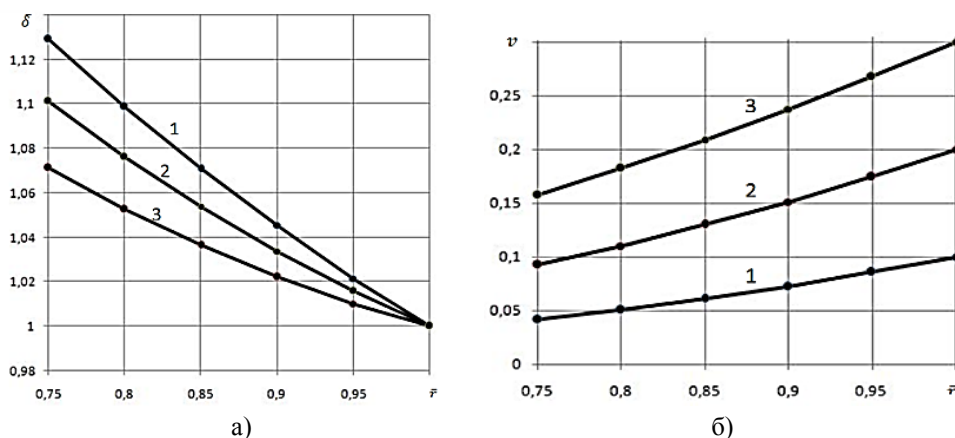


Рис. 3. Графики изменения безразмерной величины толщины стенки труб $\bar{\delta}$ (а) и текущей пористости v (б):
1 - $v_0 = 0,1$; 2 - $v_0 = 0,2$; 3 - $v_0 = 0,3$

Данные решения задачи горячего прессования в конической матрице трубы с различной начальной пористостью показывают:

- начальные отрицательные значения (труба сжата) меридиональных напряжений, постепенно увеличиваясь, при $\bar{r} = 0,75$ приравняются нулю - деформированная труба выходит из матрицы, и на нее не действуют внешние осевые силы;

- абсолютные значения окружных напряжений $\bar{\sigma}_\theta$ (основные формирующие напряжения труб) у выхода матрицы являются наибольшими;

- под действием сжимающих меридиональных и окружных напряжений удлиняются трубы, уменьшаются их диаметры и увеличиваются толщины, а также уменьшаются пористости - в формуле (4) средние напряжения отрицательны, а остальные величины положительны.

Сравнение данных с результатами случая волочения с достаточно большими меридиональными положительными напряжениями [9] показало большую интенсивность уменьшения пористости при прессовании.

Отметим, что результаты решения задачи безразмерными величинами для случаев волочения и горячего прессования обычных (сплошных) и спеченных пористых труб в конической матрице применимы для любого материала. Известно, что для сплошных материалов реальные напряжения при холодном деформировании определяются с использованием напряжения предела текучести $\sigma_T = \text{const}$ или в случае горячего деформирования в данных температурно-скоростных условиях - постоянных величинах ζ_* и σ_* (15). Например, для горячего деформирования стали 45 постоянным коэффициентом является 180 МПа (формула (8)).

В отличие от сплошных материалов, при горячей и холодной обработках пористых материалов решение задачи связано с трудностями, о чем было отмечено выше: в (7) основная механическая характеристика пористого материала $a_{(T)}$ зависит не только от температуры, но и от пористости.

Для определения параметров уравнения состояния горячей обработки пористых материалов необходимо выполнить многочисленные эксперименты типа [7], используя методы [5,6] и результаты теоретических и экспериментальных исследований горячей обработки [2,3].

Выводы

1. Анализ результатов решения задачи горячего волочения труб в безразмерных величинах выявил особенности аналитического метода исследования процесса горячего прессования тонкостенных спеченных пористых труб в конической матрице, а также получения и использования уравнения состояния горячей обработки спеченных материалов для определения реальных напряжений деформированных заготовок из различных материалов.

2. Для определения начальных значений безразмерных сжимающих меридиональных напряжений, позволяющих произвести решение задачи горячего прессования труб с различной начальной пористостью (10, 20, 30%), в программной среде “MATCAD” выполнено численное моделирование.

3. На основании полученных результатов решения задачи составлены таблицы параметров напряженно-деформированного состояния труб, построены графики, проведены их анализ и сравнение с данными горячего волочения труб.

Исследование проведено в рамках научного проекта N 13-2Д161 при финансовой поддержке ГКН Министерства образования и науки РА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. - 153 с.
2. **Скороход В.В.** Реологические основы теории спекания.- Киев: Наук. думка, 1972. – 151 с.
3. **Ковальченко М.С.** Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением. - Киев: Наукова думка, 1980. - 238 с.
4. Феноменологические теории прессования порошков / **М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др.** - Киев: Наукова думка, 1982. - 140 с.
5. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. - М.: Машиностроение, 1986.- 221с.
6. **Романов К.И.** Механика горячего формоизменения металлов. - М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.
7. Теория прокатки: Справочник / **А.И. Целиков, А.Д. Томленов, Б.Н. Зюзин и др.** - М.: Металлургия, 1982. - 334 с.

8. **Петросян Г.Л.** Теория кратковременной ползучести пористых материалов // Механика: Межвуз. сб. науч. тр. / ЕГУ. - Ереван, 1991. - С. 150-153.
9. **Петросян В.Г.** Горячее волочение пористых цилиндрических труб в жестких конических матрицах // Материалы науч. конф. ГИУА.- Ереван, 2001.- Том. 1.- С.189-190.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.02.2015.

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Հ.Լ. ԼԵՎՈՆՅԱՆ

ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՆՅՈՒԹԻՑ ԽՈՂՈՎԱԿԻ ԿՈՆԱԿԱՆ ՄԱՍԼԱՄԱՅՐՈՒՄ ՏԱՔ ՄԱՍԼՄԱՆ ԳՈՐԾՐՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՎԵՐԼՈՒԾԱԿԱՆ ԵՎ ԹՎԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐՈՎ

Բացահայտվել են կոնական մամլամայրում տարբեր սկզբնական ծակոտկենությամբ բարակապատ եռակալված խողովակների տաք մամլման գործընթացների՝ վերլուծական մեթոդով հետազոտման առանձնահատկությունները: Օգտագործվել է ծակոտկեն նյութերի կարճատև սողքի ամրացման տեսությունը: Չափում չունեցող միջօրեական սեղմող լարումների սկզբնական արժեքների որոշման համար՝ *MATCAD*՝ ծրագրային միջավայրում կատարվել է թվային մոդելավորում: Քննարկվել են նյութի տաք մշակման վիճակի հավասարման ստացման և օգտագործման հարցերը: Ստացված թվային արդյունքները վերլուծվել և համեմատվել են խողովակների տաք քարշման տվյալների հետ:

Առանցքային բառեր. եռակալված խողովակ, ծակոտկենություն, տաք մամլում, ծակոտկեն նյութերի կարճատև սողքի ամրացման տեսություն, վիճակի հավասարում, շրջանալին և միջօրեական լարումներ, թվային մոդելավորում:

G.L. PETROSYAN, V.G. PETROSYAN, H.L. LEVONYAN

ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS FOR INVESTIGATING THE HOT EXTRUSION PROCESS OF THE TUBES OF POROUS MATERIALS IN CONICAL DIES

The peculiarities of the analytical investigation method of the hot extrusion process of thin-walled sintered tubes with various initial porosity in a conical die are revealed. The hardening theory of a short-term creep of porous materials is used. To determine the initial values of the dimensionless meridian compressive stresses in the software environment, «*MATHCAD*», numerical simulation is carried out. The issues on obtaining and using the equation of the state of the hot material are considered. The obtained numerical results are analyzed and compared with the data on the hot drawing of tubes.

Keywords: sintered tube, porosity, hot extrusion, hardening theory of short-term creep of porous materials, equation of state, circular and meridian stress, numerical modeling.