

ПРЕССОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ТЕЛ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

© 2020

- А. И. Ермаков** доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, научный руководитель ОНИЛ-1; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; ermakov_fdla@mail.ru
- Д. П. Давыдов** кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, старший научный сотрудник ОНИЛ-1; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; dpdavydov@yandex.ru
- В. И. Щемелев** аспирант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, инженер-конструктор ОНИЛ-1; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; vadimmenn@rambler.ru
- Г. В. Лазуткин** доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОНИЛ-1; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; lazutkin.gennadij@mail.ru

В работе излагается решение задачи определения основного уравнения прессования пористых тел из материала МР, связывающего не только давление прессования с плотностью МР, но и другие физические параметры, в том числе и технологические параметры формирования заготовок. В работе были изложены основные положения теории прессования изделий из волоконного материала МР. Доказано, что идеальный процесс прессования пористых тел содержит два этапа для диапазона относительных плотностей $[0,15; 0,7]$. Было определено основное уравнение прессования изделий из МР. Доказано, что уравнения идеального прессования (при отсутствии сил внешнего трения) имеют вид степенных зависимостей давления прессования от плотности пористого тела. Получена степенная функция упрочнения материала проволоки в прессовке. Была проведена экспериментальная проверка выдвинутых гипотез и принятых допущений, которая показала их правомерность. Полученную теорию осесимметричного прессования волоконных тел и полученное основное уравнение прессования материала МР можно распространить на различные характеры режимов прессования и формы изделий. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, а также их обобщение могут служить основой при изучении объёмного прессования пористых тел из волоконных материалов с учётом неравномерного распределения плотности по объёму.

Материал МР; пористое тело; прессование; плотность; усилие; уравнение

Цитирование: Ермаков А.И., Давыдов Д.П., Щемелев В.И., Лазуткин Г.В. Прессование пористых тел из материала МР // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 4. С. 87-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-87-98

Введение

В России широко применяются упругопористые изделия из волоконного материала, получившего название «металлическая резина» (МР). Материал МР представляет собой пористую металлическую структуру (рис. 1), получаемую путем холодного прессования заготовки из взаимоперекрещивающихся проволочных спиралей.



Рис. 1. Изделия из материала МР

Материал МР способен длительно противостоять агрессивным средам, высоким и низким температурам, глубокому вакууму, влажности, соленому морскому туману, радиации, плесневым грибкам и другим неблагоприятным внешним воздействиям. Такие уникальные возможности материала МР обусловили широкие области применения получаемых из него изделий:

- защита объектов от вибрации и ударов, подавление шума;
- термозащита объектов и их элементов;
- фильтрование различных сред с тонкостью очистки 10 – 300 мкм;
- уплотнение неподвижных стыков в конструкциях.

Метод получения МР допускает гибкое управление его характеристиками, главным образом за счёт соответствующего выбора свойств материала проволоки, а также параметров процесса прессования.

Технологический рывок в создании новых пористых материалов с уникальными свойствами определил особую важность и актуальность теоретических и экспериментальных исследований особенностей процессов формования изделий из таких материалов.

В настоящей работе решается задача определения основного уравнения прессования пористых тел из материала МР, связывающего не только давление прессования с плотностью МР, но и другие физические параметры, в том числе и технологические параметры формирования заготовок. Поставленная задача решается экспериментально и теоретически с учётом обобщения существующих результатов, полученных с помощью континуального представления пористых тел, а также на основе их общих и частных принципов консолидации [1 – 14].

Уравнение идеального прессования изделий из материала МР

Первоначально проведём анализ и обобщение основных результатов по прессованию порошковых и волоконных тел без учёта сил внешнего трения (идеальное прессование).

Изучение процессов прессования как порошковых, так и волоконных тел осуществляется обычно по двум направлениям. Первое из них основывается на применении гипотезы сплошности пористых материалов, получаемых при прессовании порошков или волокон [1; 2]. Второе направление базируется на теории контактных явлений [3; 4] и, согласно теории Ю.А. Бальшина, связано с процессом консолидации отдельных частиц порошка или волокон в пористом теле (неполная консолидация).

Теорию прессования волоконного тела, основанную на рассмотрении суммарного сопротивления его волокон изгибу, впервые сформулировал Ю.Г. Дорофеев [5]. Основываясь на допущениях о неизменности распределения точек контакта на длинах единичных отрезков, а также об отсутствии упрочнения материала волокна, Дорофеев предлагает уравнение прессования волокна в следующем виде:

$$\sigma_n = K \sigma_m \bar{\rho}_k^m, \quad (1)$$

где σ_n – давление прессования; K – постоянный коэффициент, зависящий от гипотез и допущений в модели, а также геометрических характеристик волокна; σ_m – предел текучести для материала волокна; $\bar{\rho}_k = \rho_k / \rho_i$, ρ_k – соответственно относительная и размерная плотности прессовки; ρ_i – размерная плотность материала волокна; m – показатель степени, подлежащий определению.

М. Ю. Бальшин [3] уточнил рассмотренную теорию для начального этапа прессования $\forall \bar{\rho}_k \in [0,25; 0,35]$ волоконных тел. Основываясь на методах теории вероятности, он полагает длину единичного отрезка обратно пропорциональной относительной плотности – $\bar{\rho}_k$, а их число пропорциональным величине $\bar{\rho}_k^2$. В результате полученное уравнение прессования контактного типа для начального этапа прессования волокна имеет вид, аналогичный уравнению (1) для $m = 3$:

$$\sigma_n = K \sigma_m \bar{\rho}_k^3 = \sigma_k \bar{\rho}_k^3, \quad (2)$$

где $\sigma_k = K \sigma_m$ – критическое (контактное) напряжение прессования.

Углубляя анализ вопросов формирования пористых тел, отметим, что в работе [4] для всех реализуемых плотностей порошковых тел доказано, что основное уравнение прессования может интерполироваться зависимостью:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_k \bar{\rho}_k^m \left(1 - \frac{\bar{\rho}_3^m}{\bar{\rho}_k^m} \right)}{1 - \bar{\rho}_3^m}. \quad (3)$$

В практике изготовления волоконных тел, в том числе из материала МР, относительная плотность заготовок $\bar{\rho}_3 = \rho_3 / \rho_i$ обычно изменяется от 0,035 до 0,15, а величина $\bar{\rho}_3 / \bar{\rho}_k$ – от 0,1 до 0,25. Следовательно величины $\bar{\rho}_3^m$ и $(\bar{\rho}_3 / \bar{\rho}_k)^m$ при $m \geq 3$ приобретают значения второго порядка малости по сравнению с единицей. Тогда уравнение прессования порошковых тел (3) можно записать в виде $\sigma_n \approx \sigma_k \bar{\rho}_k^m$, аналогичном для уравнений прессования волоконных тел (1) и (2).

Следовательно между процессами прессования пористых тел с различной структурой существует взаимно однозначное соответствие, объясняемое наличием общих признаков, таких как пористость, упруго-пластичные и фрикционные связи между структурными элементами (гранулы порошка, проволоочные волокна). Этот важный вывод позволяет при создании теории прессования изделий из материала МР в равной степени использовать полученные ранее результаты исследований как волоконных, так и порошковых тел.

Начальный этап прессования для волоконного материала МР в диапазоне $\forall \bar{\rho}_k \in [0,25; 0,35]$ характеризуется наличием в большей мере упругих деформаций витков спиралей. Следующий, основной этап прессования МР $\forall \bar{\rho}_k \in [0,35; 0,7]$, отличается резко возрастающими пластическими деформациями проволоки за счёт её изгиба. Основной этап сопровождается упрочнением материала проволоки, постепенно расширяющимся по всей её длине в прессовке. Это явление не учитывается в работах Дорофеева и Бальшина.

Поскольку материал металлической проволоки МР на растяжение или сжатие имеет одинаковые характеристики упрочнения, то для их учёта по аналогии с порошковыми телами можно принять модель жёстко упрочняющегося тела с пределом текучести $\sigma_m = \sigma_{02}$, где σ_{02} – условный предел текучести (напряжение при деформации, равной 0,2%). Такая постановка позволяет воспользоваться приведенными в работе [4] расчётными данными относительной функции упрочнения в зависимости от плотности прессовки порошкового тела. Их аппроксимация степенной функцией с показателем 0,6 позволила найти зависимость (4) упрочнения материала проволоки МР от плотности.

$$\sigma_k = K_B \sigma_{02} \bar{\rho}_k^{0,6}, \quad (4)$$

где K_B – постоянный коэффициент, учитывающий влияние параметров материала МР.

Преобразуя выражение (2), запишем уравнение для основного этапа прессования МР $\forall \bar{\rho}_k \in [0,35; 0,7]$ с учётом упрочнения материала проволоки:

$$\sigma_n = K_B \sigma_{02} \bar{\rho}_k^{3,6}. \quad (5)$$

Для начального этапа идеального прессования ($\bar{\rho}_k < 0,35$) упрочнение проволоки практически не происходит и уравнение (5) преобразуется к виду, аналогичному (2):

$$\sigma_n = K \sigma_{02} \bar{\rho}_k^3. \quad (6)$$

Полученные уравнения (5), (6) не учитывают влияние сил внешнего трения на процесс прессования, что приводит к значительным погрешностям при проектировании пористых тел из материала МР.

Уравнение прессования изделий из материала МР с учётом внешнего трения

Проанализируем основные силовые факторы процесса одностороннего прессования порошковых и волоконных изделий цилиндрической формы (рис. 2).

Усилие прессования P_n складывается из усилия, необходимого для уплотнения порошка или проволоки, и сил внешнего трения P_T при взаимодействии с прессформой.

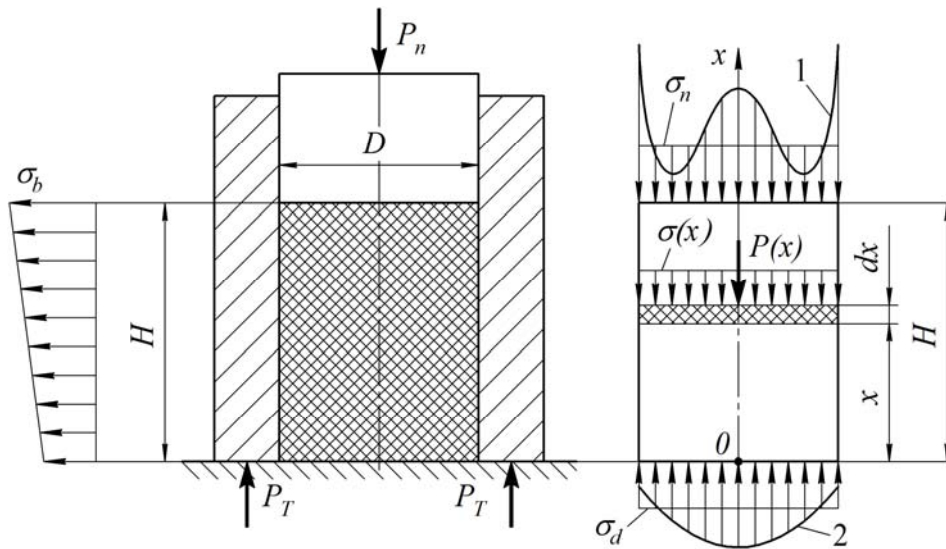


Рис. 2. Схема одностороннего прессования цилиндрических пористых тел из МР:
1, 2 – характерный вид эпюр давления прессования на верхнем пуансоне и дне пресс-формы

Рассматривая прессуемое тело как квазисплошную среду, запишем выражение для элементарной силы трения dP_T :

$$dP_T = \frac{4fK_b}{D} P(x) dx, \quad (7)$$

где f – коэффициент внешнего трения о гильзу пресс-формы; $K_b = \sigma_b(x)/\sigma(x)$ – коэффициент бокового давления; $\sigma(x)$ – давление прессования в сечении x ; $\sigma_b(x)$ – давление на стенку пресс-формы в сечении x ; dx – толщина элементарного кольца диаметром D ; $P(x) = P_n - P_T(x) = \sigma(x)\pi D^2/4$ – усилие прессования в сечении x ; $P_T(x)$ – сила внешнего трения в сечении x ; $P_n = \sigma_n \pi D^2/4$ – усилие прессования; σ_n – осредненное полное давление прессования.

Из анализа выражения (7) следует, что коэффициенты внешнего трения f и бокового давления K_b являются главными факторами, определяющими величину силы трения P_T . Причём сила трения, изменяющаяся по высоте прессовки H и вызывающая неравномерность эпюры давления прессования (рис. 2, кривые 1 и 2), способствует возникновению регулярной неоднородности плотности изделия по объёму.

Обратимся к анализу экспериментальных данных по закономерностям поведения коэффициентов внешнего трения и бокового давления при прессовании порошковых тел. Так, в работе [4] приведённые данные для пористых тел из железного восстановленного порошка показывают, что произведение fK_b , именуемое в дальнейшем комплексом трения, в диапазоне относительных плотностей $\bar{\rho}_k \in [0,4; 0,85]$ изменяется соответственно в пределах $fK_b \in [0,095; 0,11]$. Следовательно с погрешностью около 7% можно указать среднее значение величины $(fK_b)_{cp} = 0,1025$.

В свою очередь, взаимно однозначное соответствие процессов прессования порошковых и волоконных тел позволяет предположить, что для них условие

$f K_b = \text{const}$ является общим. Тогда уравнение (7) можно записать в интегральном виде:

$$\int_0^{P_T(x)} \frac{dP_T}{P_n - P_T(x)} = \frac{4fK_b}{D} \int_0^x dx. \quad (8)$$

Решение этого уравнения позволяет получить выражение для силы трения в сечении x :

$$P_T(x) = P_n \left(1 - e^{-\frac{4fK_b x}{D}} \right). \quad (9)$$

Соответственно для давления в сечении x прессовки получим:

$$\sigma(x) = \sigma_n e^{-\frac{4fK_b(H-x)}{D}}. \quad (10)$$

Принимая в выражении (9) $x = H$, а в выражении (10) $x = 0$, соответственно получим:

для полной силы трения P_T

$$P_T = P_n \left(1 - e^{-\frac{4fK_b H}{D}} \right); \quad (11)$$

для осреднённого давления на дно пресс-формы σ_d (рис. 2)

$$\sigma_d = \sigma_n e^{-\frac{4fK_b H}{D}}. \quad (12)$$

Рассмотрим влияние внешнего трения на процесс прессования изделий из МР. Высоту элементарного кольца dx (рис. 2) можно выразить с помощью массовых характеристик прессовки:

$$dx = \frac{4dM}{\rho(x)\pi D^2}, \quad (13)$$

где M – масса проволоки в прессовке; $\rho(x)$ – плотность прессовки в сечение x .

Тогда плотность $\rho(x)$ с учётом выражений (5), (10) и (13), на основном этапе прессования может быть представлена в виде соотношения

$$\rho(x) = \rho_i \left(\frac{\sigma_n}{K_B \sigma_{02}} \right)^{0,278} e^{-\frac{1,11fK_b}{D}(H-x)}. \quad (14)$$

С помощью выражения (14) запишем уравнение (13) в квадратурах:

$$\int_0^M dM = \rho_i \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\sigma_n}{K_B \sigma_{02}} \right)^{0,278} \int_0^H e^{-\frac{1,11f K_b}{D}(H-x)} dx. \quad (15)$$

Массу M можно выразить с помощью параметров заготовки и прессовки:

$$\rho_3 H_3 = \rho_k H, \quad (16)$$

где H_3 – высота цилиндрической заготовки с плотностью ρ_3 .

Интегрируя уравнение (15) с учётом выражения (16), получаем уравнение основного этапа прессования материала МР с учётом внешнего трения:

$$\sigma_n = 1,46 K_B \sigma_{02} \left(\frac{f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3}{1 - e^{-\frac{1,11f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3}{\bar{\rho}_k}}} \right)^{3,6}, \quad (17)$$

где $\Phi_3 = H_3/D$ – фактор формы заготовки.

Учитывая выражение (6), аналогично получаем уравнение начального этапа прессования материала МР с учётом внешнего трения:

$$\sigma_n = 2,37 K \sigma_{02} \left(\frac{f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3}{1 - e^{-\frac{1,33f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3}{\bar{\rho}_k}}} \right)^3. \quad (18)$$

Запишем в классе кусочно-непрерывных функций основное уравнение прессования пористых тел из волоконного материала МР на начальном и основном этапах. Для этого произведём сшивку уравнений (17) и (18) в точке $(\bar{\rho}_k, \sigma_n(\bar{\rho}_k))$. Неизвестное значение коэффициента K найдём из условия $\bar{\rho}_k = 0,35$:

$$K = 0,616 K_B \frac{(1 - e^{-3,8f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3})^3}{(1 - e^{-3,17f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3})^{3,6}} (f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3)^{0,6}. \quad (19)$$

Значение коэффициента K_B определяется экспериментально с помощью соотношения

$$K_B^{(e)} = 0,685 \frac{\sigma_n^{(e)}}{\sigma_{02}} \left(\frac{1 - e^{-\frac{1,33f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3}{\bar{\rho}_k^{(e)}}}}{f K_b \bar{\rho}_3 \Phi_3} \right)^{3,6}, \quad (20)$$

где $\sigma_n^{(e)}$ и $\bar{\rho}_k^{(e)}$ – соответственно экспериментальные значения давления прессования и плотности, связанные теоретической зависимостью (17).

Таким образом, получение корректного основного уравнения прессования изделий из МР должно быть неразрывно связано с результатами экспериментальных иссле-

дований. Они должны подтвердить степенной вид функций на начальном и основном этапах прессования, а также уточнить теоретически найденные значения показателей m . С помощью указанных выше результатов должна быть осуществлена проверка достоверности гипотезы $fK_b = \text{const}$ и определено осреднённое значение коэффициента $K_B^{(e)}$.

Экспериментальное изучение процесса прессования материала МР

Проверка гипотезы $fK_b = \text{const}$ и определение его значений осуществлялась на основе расчётной зависимости (21), полученной из выражения (11):

$$fK_b = \frac{\bar{\rho}_k^{(e)}}{4\bar{\rho}_3^{(e)}\Phi_3^{(e)}} \ln \left(1 - \frac{P_T^{(e)}}{P_n^{(e)}} \right), \quad (21)$$

где $\bar{\rho}_k^{(e)}$, $\bar{\rho}_3^{(e)}$, $\Phi_3^{(e)}$, $P_T^{(e)}$, $P_n^{(e)}$ – экспериментальные значения соответствующих величин.

На рис. 3 представлены результаты испытаний образцов из материала МР в интересующем диапазоне плотностей $\bar{\rho}_k \in [0,11; 0,7]$, полученные обработкой с помощью формулы (21) экспериментальных данных, приведённых в работе [6]. При этом среднее значение комплекса трения оказалось равным $(fK_b)_{cp} = 0,105$, а значение коэффициента $K_B^{(e)} = 2,089$.

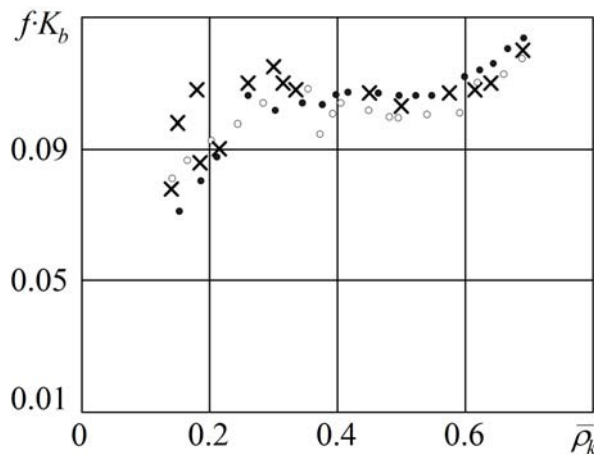


Рис. 3. Зависимость комплекса трения от плотности пористого тела из материала МР:

• – $\Phi_3^{(e)} = 2$; ◦ – $\Phi_3^{(e)} = 4$; × – $\Phi_3^{(e)} = 6$

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости безразмерных давления прессования $\bar{\sigma}_n$ от средней плотности прессовки при различных параметрах материала МР и механических характеристиках материала проволоки.

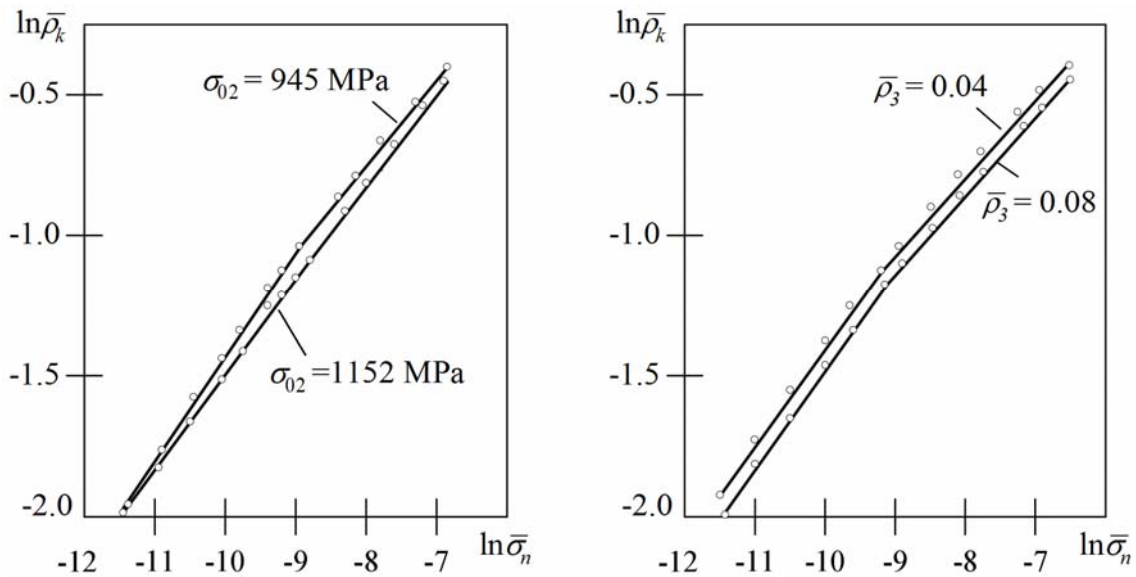


Рис. 4. Исследования процесса прессования пористых цилиндрических тел из материала МР

Все полученные зависимости характеризуются двумя явно выраженными участками (два этапа прессования). Диапазоны изменения показателя степени m для начального этапа составили [2,42; 2,89], а для основного – [3,46; 4,0]. То есть для основного этапа оказывается справедливой гипотеза об упрочнении материала проволоки, по характеру близкому к упрочнению частиц в порошковых прессовках. Уменьшение показателя степени для начального этапа прессования до 2,89 определяется, по-видимому, влиянием сил внешнего трения.

Оказалось, что давление σ_n при других зафиксированных параметрах прямо пропорционально величине σ_{02} . Эти результаты хорошо согласуются с теоретическими данными (смотри выражения (5), (6)). Кроме того, было выявлено влияние на процесс прессования плотности заготовки (степени радиального прессования заготовки) $\bar{\sigma}_n = K_p \bar{\rho}_3^{0,22}$, где K_p – постоянный коэффициент). Влияние геометрических параметров проволочных спиралей и фактора формы Φ_3 на характер процессов прессования находится в пределах погрешности эксперимента.

В итоге, обобщая результаты теоретических и экспериментальных исследований с учётом выражений (17) – (21), запишем полуэмпирическое основное уравнение для одностороннего прессования пористых тел из материала МР в следующем виде:

$$\sigma_n = \sigma_{02} \bar{\rho}_3^{0,22} \cdot 10^{-3} \begin{cases} 4,839 \left(\frac{\bar{\rho}_3 \Phi_3}{1 - e^{-\frac{0,133 \bar{\rho}_3 \Phi_3}{\bar{\rho}_k}}} \right)^3, & \forall \bar{\rho}_k \in [0,11; 0,35]; \\ 1,406 \left(\frac{\bar{\rho}_3 \Phi_3}{1 - e^{-\frac{0,111 \bar{\rho}_3 \Phi_3}{\bar{\rho}_k}}} \right)^{3,6}, & \forall \bar{\rho}_k \in [0,35; 0,7]. \end{cases} \quad (22)$$

Заключение

Разработанную теорию осесимметричного прессования волоконных тел и полученное основное уравнение прессования материала МР (22) можно распространить на различные характеры режимов прессования и формы изделий.

Так, для двухстороннего режима прессования цилиндрических изделий достаточно принять $\Phi_3^{(d)} = 0,5\Phi_3$.

В случае произвольного контура боковой поверхности изделия, имеющего внутреннюю полость, достаточно определить фактор формы заготовки:

$$\Phi_3 = \frac{(L_H + L_B)H_3}{4S_n},$$

где L_H, L_B – геометрические параметры наружного и внутреннего контуров поперечного сечения прессуемого тела; S_n – площадь поперечного сечения.

Результаты проведённых теоретических и экспериментальных исследований, а также их обобщение могут служить основой при изучении объёмного прессования пористых тел из волоконных материалов с учётом неравномерного распределения плотности по объёму.

Библиографический список

1. Перельман В.Е. Формование порошковых материалов. М.: Metallurgy, 1979. 232 с.
2. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. Феноменологические теории прессования порошков. Киев: Наукова думка, 1982. 140 с.
3. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Metallurgy, 1972. 336 с.
4. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М.: Metallurgy, 1969. 264 с.
5. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов. М.: Наука, 1977. 216 с.
6. Лазуткин Г.В., Суханов К.И. Исследование процесса прессования изделий из материала МР // В сб.: «Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов». Куйбышев: КуАИ, 1987. С. 85-93.
7. Sokol L. Metal-fibre filters // Powder Metallurgy. 1965. V. 8, Iss. 15. P. 114-128. DOI: 10.1179/pom.1965.8.15.007
8. Карпинос Д.М. Особенности уплотнения проницаемых материалов на основе непрерывных металлических волокон // Порошковая металлургия. 1985. № 1. С. 15-18.
9. Косторнов А.Г. Проницаемые металлические волокнистые материалы. Киев: Техника, 1983. 128 с.
10. Шайморданов Л.Г. Статическая механика деформирования волокнистых нетканых пористых тел. Красноярск: Красноярский государственный университет, 1989. 152 с.
11. Reut O., Boginskyi L., Petiushik Y. Dry isostatic pressing of compactable materials. Minsk: Debor, 1998.
12. German R.M. Particle packing characteristics. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989. 443 p.

13. Huo S.H., Qian M., Schaffer G.B., Crossin E. Aluminium powder metallurgy // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. 2010. P. 655-701. DOI: 10.1533/9780857090256.3.655

14. Lee M.G., Lee K.W., Hur H.K., Kang K.J. Mechanical behavior of a wire-woven metal under compression // *Composite Structures*. 2013. V. 95. P. 264-277. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.06.016

PRESSING OF POROUS BODIES MADE OF MR WIRE MATERIAL

© 2020

- A. I. Ermakov** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Aircraft Engine Construction and Design, Scientific Director of ONIL-1; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; ermakov_fdla@mail.ru
- D. P. Davydov** Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Aircraft Engine Construction and Design, Senior Researcher of ONIL-1; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; dpdavydov@yandex.ru
- V. I. Shchemelev** Postgraduate Student of the Department of Aircraft Engine Construction and Design, Design Engineer of ONIL-1; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; vadimmenn@rambler.ru
- G. V. Lazutkin** Doctor of Science (Engineering), Leading Researcher of ONIL-1; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; lazutkin.gennadij@mail.ru

The paper presents a solution to the problem of determining the basic equation for pressing of porous bodies made of MR material that relates not only the molding pressure to the MR density, but also other physical parameters, including the technological parameters of blank formation. The paper outlines the basic assumptions of the theory of compression molding of items made of MR fibrous material. It has been proved that the ideal process of pressing porous bodies contains two stages for a range of relative densities [0,15; 0,7]. The basic equation of pressing of MR products was determined. It was proved that the equations of ideal pressing (in the absence of external friction forces) have the form of power-law dependences of the molding pressure on the density of the porous body. The power function of hardening of the wire material in the press was obtained. An experimental test of the hypotheses put forward and the assumptions made was carried out, which showed their validity. The obtained theory of axisymmetric pressing of fiber bodies and the obtained basic equation for pressing the MR material can be extended to various types of pressing modes and product shapes. The results of the performed theoretical and experimental studies, as well as their generalization, can serve as a basis for studying mass molding of porous bodies made of fiber materials, taking into account the uneven distribution of density over the volume.

MR material; porous body; pressing; density; force; equation

Citation: Ermakov A.I., Davydov D.P., Shchemelev V.I., Lazutkin G.V. Pressing of porous bodies made of MR wire material. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 4. P. 87-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-87-98

References

1. Perel'man V.E. *Formovanie poroshkovykh materialov* [Forming of powder materials]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. 232 p.
2. Shtern M.B., Serdyuk G.G., Maksimenko L.A. *Fenomenologicheskie teorii pressovaniya poroshkov* [Phenomenological theories of powder pressing]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1982. 140 p.

3. Bal'shin M.Yu. *Nauchnye osnovy poroshkovoy metallurgii i metallurgii volokna* [Scientific foundations of powder and fiber metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1972. 336 p.
4. Zhdanovich G.M. *Teoriya pressovaniya metallicheskih poroshkov* [Theory of metal powder pressing]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1969. 264 p.
5. Dorofeev Yu.G. *Dinamicheskoe goryachee pressovanie poristykh materialov* [Dynamic hot pressing of porous materials]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 216 p.
6. Lazutkin G.V., Sukhanov K.I. Issledovanie protsessa pressovaniya izdeliy iz materiala MR. *V sb.: «Vibratsionnaya prochnost' i nadezhnost' dvigateley i sistem letatel'nykh apparatov»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1987. P. 85-93. (In Russ.)
7. Sokol L. Metal-fibre filters. *Powder Metallurgy*. 1965. V. 8, Iss. 15. P. 114-128. DOI: 10.1179/pom.1965.8.15.007
8. Karpinos D.M. Features of the compaction of permeable materials based on continuous metal fibers. *Poroshkovaya Metallurgiya*. 1985. No. 1. P. 15-18. (In Russ.)
9. Kostornov A.G. *Pronitsaemye metallicheskie voloknistye materialy* [Permeable metallic fibrous materials]. Kiev: Tekhnika Publ., 1983. 128 p.
10. Shaymordanov L.G. *Sticheskaya mekhanika deformirovaniya voloknistykh netkanykh poristykh tel* [Static mechanics of deformation of nonwoven fibrous porous bodies]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University Publ., 1989. 152 p.
11. Reut O., Boginskyi L., Petiushik Y. Dry isostatic pressing of compactable materials. Minsk: Debor, 1998.
12. German R.M. Particle packing characteristics. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989. 443 p.
13. Huo S.H., Qian M., Schaffer G.B., Crossin E. Aluminium powder metallurgy. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. 2010. P. 655-701. DOI: 10.1533/9780857090256.3.655
14. Lee M.G., Lee K.W., Hur H.K., Kang K.J. Mechanical behavior of a wire-woven metal under compression. *Composite Structures*. 2013. V. 95. P. 264-277. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.06.016