

УДК 621.762

**РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО НЕПРЕРЫВНОГО ВОЛОКНА**

**Е.Е. ПЕТЮШИК, О.П. РЕУТ, А.Ч. ЯКУБОВСКИЙ, Ч.А. ЯКУБОВСКИЙ**

*(Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики, Минск)*

*Исследованы деформационные процессы, происходящие при радиальном уплотнении тела намотки за счет контактной деформации витков проволоки в местах их взаимодействия и изгибной деформации витков в межконтактных зонах (пролетах). Получено уравнение, выражающее зависимость давления прессования тел намотки от требуемой относительной плотности получаемого пористого материала с учетом геометрии и механических свойств исходной проволоки, геометрии проволочной заготовки.*

Особое место в современной технике благодаря способности пропускать через себя жидкости и газы занимают пористые материалы (ПМ). При разработке нового и совершенствовании существующего оборудования, конструкция которого предусматривает использование подобных материалов, одним из условий обеспечения надежной и эффективной его работы является создание ПМ с регулярной структурой. Среди широкого многообразия ПМ, в частности на волоконной основе, наибольший интерес представляют пористые сетчатые материалы, однако необходимость использования в качестве основы дорогостоящих сеток существенно увеличивает их себестоимость, усложняет технологию изготовления. В связи с этим, особого внимания заслуживает материал на основе металлического непрерывного волокна (проволоки). Процесс его изготовления включает в себя формирование проволочной заготовки в виде тела намотки (ТН) путем послойной крестовой намотки проволоки на формообразующую оправку и последующую деформационную обработку ТН в условиях радиального изостатического прессования [1].

Деформационная обработка является окончательной структурирующей технологической операцией, в наибольшей степени определяющей эксплуатационные свойства пористого изделия, основной качественной оценкой которых является относительная плотность прессовки. Поэтому для обеспечения управления свойствами ПМ установим связь относительной плотности  $\nu$  с давлением прессования  $p$ :

$$p = f(\nu). \tag{1}$$

Намотка проволоки (рис. 1) диаметром  $d_{np}$  на формообразующую цилиндрическую оправку диаметром  $D_0$  осуществляется под некоторым углом  $\beta$  к плоскости, перпендикулярной оси оправки, в требуемое количество слоев  $n$ . При формировании каждого слоя намотки, сопровождающемся раскладкой витков проволоки в обоих направлениях вдоль ТН на длину раскладки  $L_p$ , обеспечивается необходимый постоянный зазор  $s$  между двумя соседними однонаправленными витками слоя.

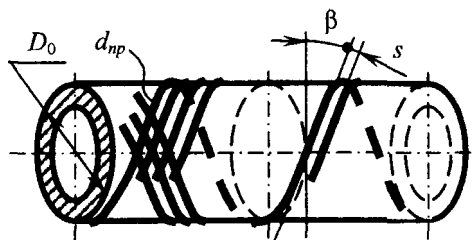


Рис. 1. Схема формирования тела намотки

При прессовании проволочного ТН происходит его радиальное уплотнение на величину  $\Delta$  за счет контактной деформации  $\delta_k$  витков проволоки в местах их взаимодействия и изгибной деформации  $\delta_n$  витков в межконтактных зонах (пролетах), т.е. происходит перемещение крайнего слоя ТН в радиальном направлении, определяемое с учетом количества слоев намотки выражением:

$$\Delta = n \cdot (\delta_k + \delta_n). \tag{2}$$

Достаточно высокая регулярность контактов в ТН позволяет перейти к описанию взаимодействия витков проволоки в единичном контакте, а именно, к взаимодействию двух соприкасающихся цилиндров (рис. 2) диаметром  $d_{np}$ , оси которых в общем случае образуют между собой угол  $0^\circ < 2 \cdot \beta < 90^\circ$ , нагруженных сосредоточенной сжимающей силой  $P_k$ . Цилиндры деформируются в зоне контакта, и происходит их сближение на некоторую величину  $\delta_k$ .

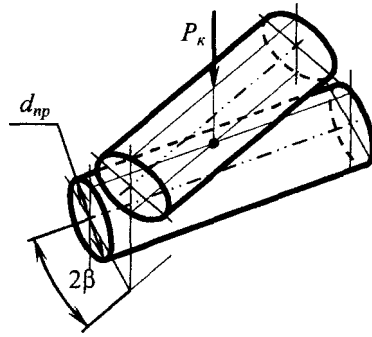


Рис. 2. Схема нагружения соприкасающихся цилиндров

Анализ происходящей деформации поверхности цилиндров в контактной зоне позволил установить зависимость величины сближения от усилия сжатия с учетом взаимного расположения цилиндров ( $n_\delta$  – коэффициент сближения, зависящий от угла намотки проволоки), их диаметра и механических свойств ( $\mu$  и  $E$  – соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости компактного материала проволоки) [2]:

$$\delta_\kappa = 0,63 \frac{P_\kappa}{d_{np}} \cdot \frac{n_\delta \cdot n_p}{\sigma_T}. \quad (3)$$

Благодаря регулярной структуре укладки проволока в слое ТН может рассматриваться также в виде многопролетной балки (рис. 3) диаметром  $d_{np}$  с расстоянием между опорами  $l$ , нагруженной посередине пролетов сосредоточенными изгибающими силами  $P_u$ . При этом считаем, что  $l = (d_{np} + s) / \sin 2\beta$ . Нагружение балки сопровождается ее прогибом в пролетах на некоторую величину  $\delta_u$ .

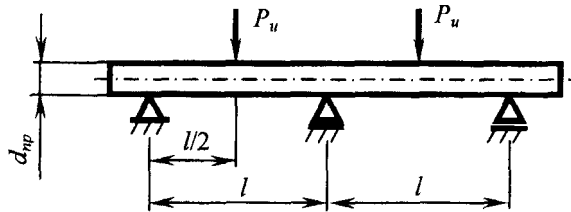


Рис. 3. Схема нагружения многопролетной неразрезной балки

Аналитической оценкой деформации балки установлена зависимость величины прогиба от изгибающего усилия с учетом длины пролета балки, ее диаметра и механических свойств компактного материала [3]:

$$\delta_u = \frac{P_u l^3}{9,4 d_{np}^4 E}. \quad (4)$$

Возможность точного расчета количества контактов, исходя из режимов намотки и геометрии исходной проволоки и всего ТН с учетом регулярности структуры проволоочной заготовки, выражаемого уравнением

$$n_\kappa = n \cdot \frac{\pi (D_0 + 2nd_{np}) L_p}{2 (d_{np} + s)^2} \cdot \sin 2\beta, \quad (5)$$

позволяет перейти от усилий и перемещений в единичном контакте и пролете к определению силовых и деформационных характеристик процесса прессования ТН в целом.

Для установления связи относительной плотности прессовки с давлением прессования ТН воспользуемся законом сохранения энергии, согласно которому общая работа прессования проволоочной заготовки  $A$  равна сумме работ, затрачиваемых на деформирование витков проволоки в зонах взаимного контакта  $A_\kappa$  и в межконтактных зонах  $A_u$  с учетом их количества:

$$A = A_\kappa + A_u. \quad (6)$$

Здесь имеем

$$A = \int (p \cdot S) d\Delta, \quad A_r = n_k \cdot \int P_k d\delta_k; \quad A_u = n_k \cdot \int P_u d\delta_u,$$

где  $S = \pi \cdot (D_0 + 4 \cdot n \cdot d_{np} - 2 \cdot \Delta) \cdot L_p$  — площадь наружной поверхности ТН, изменяющаяся в процессе его прессования за счет радиального перемещения  $\Delta$  наружного слоя.

Усилие сжатия в единичном контакте и изгибающая нагрузка в пролете из равенств (3) и (4) соответственно равны:

$$P_k = 1,6\delta_k \cdot \frac{d_{np}}{n_\delta n_p} \cdot \sigma_T; \quad P_u = 9,4\delta_u \cdot \frac{d_{np}^4 \sin^3 2\beta}{(d_{np} + s)^3} \cdot E. \quad (7)$$

Тогда уравнение (6) запишем в следующем виде:

$$p = \frac{n \cdot (D_0 + 2nd_{np}) \sin 2\beta}{2(d_{np} + s)^2} \cdot \frac{\int_0^{\delta_k} \left[ 1,6\delta_k \cdot \frac{d_{np}}{n_\delta \cdot n_p} \cdot \sigma_T \right] d\delta_k + \int_0^{\delta_u} \left[ 9,4\delta_u \cdot \frac{d_{np}^4 \sin^3 2\beta}{(d_{np} + s)^3} \cdot E \right] d\delta_u}{\int_0^\Delta (D_0 + 4nd_{np} - 2\Delta) d\Delta}. \quad (8)$$

Определим пределы интегрирования, т.е. выразим сближение  $\delta_k$  и прогиб  $\delta_u$  витков проволоки в слое ТН и радиальное перемещение крайнего слоя  $\Delta$  через соответствующую им относительную плотность прессовки. Исходя из режимов намотки и геометрии исходной проволоки и всего ТН с учетом происходящих при прессовании деформационных процессов определяем относительную плотность прессовки:

$$v = \frac{\pi d_{np}}{4(d_{np} + s)} \cdot \frac{1}{1 - \Delta / (2nd_{np})},$$

откуда радиальное перемещение крайнего слоя проволочной заготовки равно

$$\Delta = 2nd_{np} \left( 1 - \frac{\pi d_{np}}{4v(d_{np} + s)} \right). \quad (9)$$

Исходя из регулярности структуры ТН, для любой контактной пары примем условие:

$$P_k = P_u.$$

Тогда с учетом выражений (7) имеем

$$\delta_u = \delta_k \frac{0,17}{n_\delta n_p} \left( \frac{d_{np} + s}{d_{np} \sin 2\beta} \right)^3 \cdot \frac{\sigma_T}{E}. \quad (10)$$

Отсюда, решив уравнение (10) совместно с равенством (2) относительно сближения, с учетом (9), получим

$$\delta_k = \frac{11,76d_{np} \left( 1 - \frac{\pi d_{np}}{4v(d_{np} + s)} \right)}{1 + \frac{1}{n_\delta n_p} \cdot \frac{\sigma_T}{E} \left( \frac{d_{np} + s}{d_{np} \sin 2\beta} \right)^3}, \quad (11)$$

а подставив выражение (11) в уравнение (10), находим

$$\delta_u = \frac{0,34d_{np} \left( 1 - \frac{\pi d_{np}}{4v(d_{np} + s)} \right)}{0,17 + n_\delta n_p \frac{E}{\sigma_T} \left( \frac{d_{np} \sin 2\beta}{d_{np} + s} \right)^3}. \quad (12)$$

Таким образом, с учетом пределов интегрирования (9), (11) и (12) выражение (8) окончательно примет вид:

$$p = \frac{0,8 \left( \frac{d_{np}}{d_{np} + s} \right)^2 \cdot (D_0 + 2nd_{np}) \sin 2\beta \cdot \left( 1 - \frac{\pi d_{np}}{4v(d_{np} + s)} \right)}{D_0 + 2nd_{np} \left( 1 + \frac{\pi \cdot d_{np}}{4v(d_{np} + s)} \right) + \frac{0,17}{E} \left( \frac{d_{np} + s}{d_{np} \sin 2\beta} \right)^3 + \frac{n_8 n_p}{\sigma_T}} \quad (13)$$

Уравнение (13) выражает зависимость давления прессования проволоочной заготовки от требуемой относительной плотности получаемого на основе металлического непрерывного волокна ПМ с учетом геометрии и механических свойств исходной проволоки, а также геометрии и структуры ТН. Оно позволяет выбирать требуемые технологические режимы деформирования ПМ для обеспечения заданных структурных характеристик проволоочного изделия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Якубовский А.Ч., Петюшик Е.Е. Технология получения пористых проволоочных изделий // Материалы 22-го Междунар. науч. симпозиума молодых научных работников и студентов. – Зелена Гура, Польша. – 2001. – Т. Механика. – С. 247 – 252.
2. Напряженно-деформированное состояние в единичном контакте при упругом деформировании проницаемых материалов на основе проволоки в виде тел намотки / Е.Е. Петюшик, А.Ч. Якубовский, Ч.А. Якубовский, О.П. Реут // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 2. – С. 10 – 15.
3. Расчет усилий и перемещений при упругопластическом изгибе и удлинении проволоки в слое проницаемого материала при радиальном прессовании тела намотки / Е.Е. Петюшик, А.Ч. Якубовский, Ч.А. Якубовский, Л.Ф. Павловская // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2003. – № 1. – С. 49 – 53.