

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальная механика: В 2-х кн: Кн.2/ Под ред. А.Кобаяси. – М.Мир, 1990. – 552 с. 2. А.Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел. Т.2.- М.: Мир, 1969.- 863с. 3. К.В.Абрамова, А.В.Пахомов, Б.П.Перегуд, И.П.Щербаков. Инфракрасное излучение, возникающее при деформации и разрушении металлов// Журнал технической физики.- 1988, т.58, в.4.-с.817-821. 4. В.Н.Кунин. Поглощение энергии металлом при пластическом растяжении // Физика металлов и металловедение.-1959.-т.VII, в.5.-с.790-793.

УДК 621.762.4

Якубовский А. Ч., Якубовский Ч.А., Галуза И.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО ТЕЛА НАМОТКИ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В современной технике для интенсификации процессов фильтрования, звукопоглощения, терморегулирования и прочих физико-химических процессов в конструкциях стационарных и передвижных установок часто невозможно обойтись без использования пористых проницаемых изделий (ППИ). В зависимости от условий эксплуатации установок и требований, предъявляемых к эффективности, надежности и безопасности их работы, применяют самые разнообразные ППИ. Заслуживающими внимания с точки зрения регулярности структуры, универсальности свойств и себестоимости являются изделия из проволоки. В частности, созданы новые изделия в форме пористой трубы, получаемые радиальным уплотнением проволочного тела намотки (ТН) цилиндрической формы — пористые изделия на основе навиваемой проволоки (ПИНП) [1, 2].

Не изученным вопросом в области изготовления ПИНП в связи с геометрическими ограничениями проволочного изделия, а также ввиду его структурных особенностей, является осевое уплотнение, когда цилиндрическое ТН испытывает сжимающую нагрузку в продольном направлении (рис. 1). В случае, если уплотнение осуществляется с использованием жесткой оправки диаметром D_0 (он же внутренний диаметр ТН и изделия), наружный диаметр ТН D принимает размер D_1 , а его высота (длина) H — H_1 .

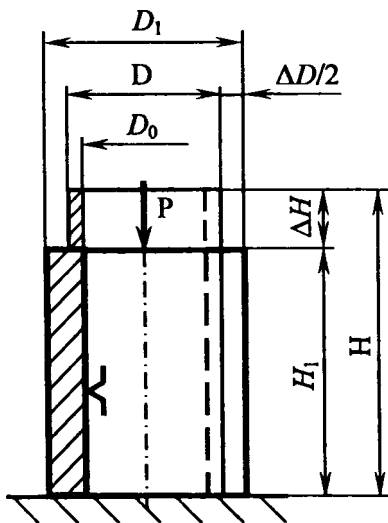


Рис. 1. Схема осевого уплотнения ТН

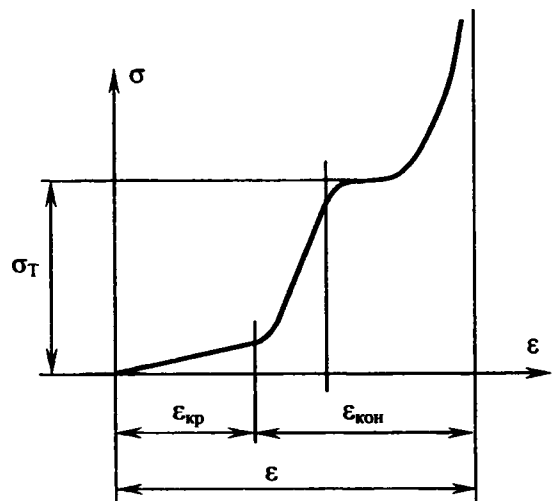


Рис. 2. Диаграмма осевого уплотнения ТН

Продольное (осевое) сжатие проволочного ТН можно представить как процесс, включающий в себя следующие стадии уплотнения (рис. 2). Вначале происходит упругая деформация ТН за счет свободного сближения (смыкания) витков проволоки (рис. 3), уложенных с зазором s в каждом слое при формировании ТН параллельной или крестовой намоткой [1–3].

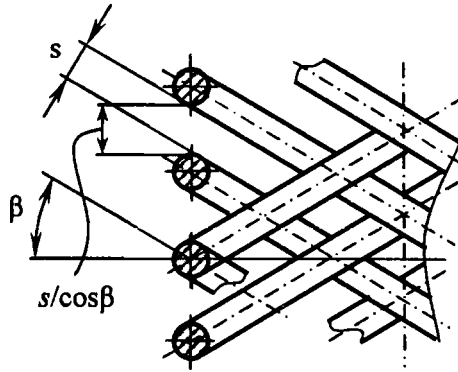


Рис. 3. Схема взаимного расположения витков в ТН

Сближение витков, сопровождающееся их упругим скручиванием относительно оси проволоки подобно работе спиральной пружины, осуществляется до полного смыкания витков. В результате, кроме точечных межвитковых контактов от слоя к слою, появляются линейные контакты в пределах каждого слоя. Однако эта стадия уплотнения не наблюдается, если намотку проволоки производить рядовым методом [3], плотно укладывая витки в слое один к одному.

При этом нельзя пренебрегать контактным трением между витками каждого слоя, а также между витками соседних слоев, несмотря на точечный характер первичных межвитковых контактов [4]. Ведь благодаря контактному трению обеспечивается устойчивость формы и структуры ТН [3]. При этом сила трения в каждом контакте непосредственно связана с силой натяжения проволоки при намотке.

По мере увеличения внешней нагрузки превалирует контактная деформация сомкнутых витков (упругая и пластическая). На этой стадии ввиду чрезмерно малой кривизны витков по сравнению с радиусом сечения проволоки их можно рассматривать как параллельно расположенные цилиндры [1], находящиеся под действием нагрузки q_k , равномерно распределенной по их длине вдоль образующей (рис. 4) [4].

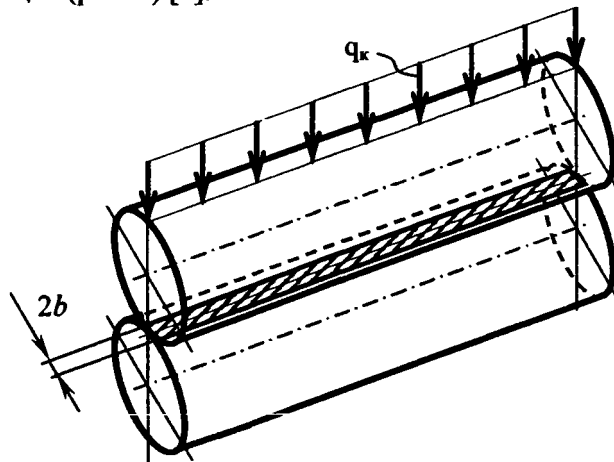


Рис. 4. Взаимодействие цилиндров с параллельными осями

Первоначальное соприкосновение цилиндров по линии переходит в площадку контакта, имеющую вид бесконечной полосы шириной $2 \cdot b$. Длина полосы a в данном случае численно равна длине проволоки l_{np} , необходимой для формирования ТН.

Таким образом, общая работа осевого уплотнения ТН складывается из работы, затрачиваемой на скручивание проволоки при сближении витков, на сопротивление проволоки при контактном взаимодействии витков, а также работы, затрачиваемой на преодоление трения между витками:

$$A = A_{кр} + A_{кон} + A_{тр} . \quad (1)$$

Общая работа уплотнения равна:

$$A = P \cdot \frac{\Delta H}{2} , \quad (2)$$

где P — внешняя сила сжатия; $\Delta H = |H_1 - H|$ — продольная абсолютная деформация ТН. Работа кручения витков определяется выражением [5]:

$$A_{кр} = \frac{M_{кр}^2 \cdot l_{np}}{2 \cdot G \cdot J_p} , \quad (3)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент; l_{np} — длина проволоки, использованная для формирования ТН; G — модуль сдвига материала проволоки; J_p — полярный момент инерции сечения проволоки.

Здесь крутящий момент, длина проволоки, полярный момент инерции сечения проволоки соответственно равны [1, 5]:

$$M_{кр} = P \cdot \frac{n \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np})}{2 \cdot \cos \beta} ; \quad l_{np} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np})}{d_{np} + s} \cdot H ; \quad J_p = \frac{\pi \cdot d_{np}^4}{32} , \quad (4)$$

где n — количество слоев проволоки в ТН; d_{np} — диаметр используемой проволоки; s — межвитковый зазор, выдерживаемый при формировании ТН; β — угол намотки проволоки.

Тогда выражение (3) с учетом соотношений (4) принимает вид:

$$A_{кр} = P^2 \cdot \frac{[2 \cdot n \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np})]^3}{G \cdot d_{np}^4 \cdot (d_{np} + s) \cdot \cos^2 \beta} \cdot H . \quad (5)$$

Работу контактного взаимодействия витков запишем в следующем виде [1, 4]:

$$A_{кон} = \left(\frac{4}{3} \cdot q_k \cdot l_{np} \right) \cdot \delta_k \cdot n_b , \quad (6)$$

где δ_k — контактная деформация витков проволоки; n_b — количество витков в ТН.

Здесь в качестве внешней нагрузки на пару витков следует принимать распределенную нагрузку q_k (см. рис. 4). Количество витков в ТН находится по формуле [1]:

$$n_b = \frac{2 \cdot H \cdot \cos \beta}{d_{np} + s} . \quad (7)$$

Формула для определения контактной деформации цилиндров, полученная Б.С. Ковальским [6], имеет вид:

$$\delta_k = 0,636 \cdot \frac{q_k}{E} \cdot \left(\ln \frac{d_{np}^2}{b^2} + 0,814 \right). \quad (8)$$

Половина ширины площадки контакта определяется следующим выражением [4]:

$$b = 0,8 \cdot \sqrt{q_k \cdot d_{np} \cdot \frac{1 - \mu^2}{E}}. \quad (9)$$

Наибольшее давление на площадке контакта (рис. 5) находится по формуле [4]:

$$p_{max} = \frac{2 \cdot q_k}{\pi \cdot b} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{q_k}{d_{np}} \cdot \frac{E}{1 - \mu^2}}. \quad (10)$$

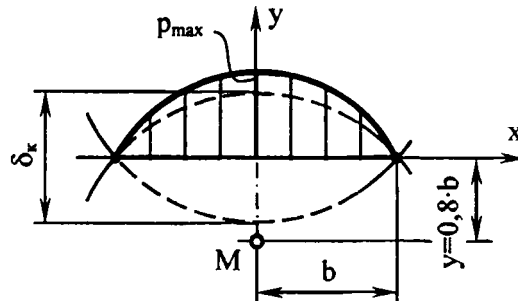


Рис. 5. Распределение давления по ширине площадки контакта

Для площадки контакта в виде полосы наиболее опасной точкой является точка M , лежащая на оси y и имеющая координату $y = 0,8 \cdot b$ (см. рис. 5) [6]. Эквивалентное напряжение в этой точке, вычисленное по гипотезе Сен-Венана, равно:

$$\sigma_{эkv} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T = 0,6 \cdot p_{max}, \quad (11)$$

где σ_T — предел текучести материала проволоки.

Тогда выражение (6) с учетом указанных пояснений принимает следующий вид:

$$A_{кон} = 64 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{(D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{np}) \cdot (d_{np})^2}{(d_{np} + s)^2} \cdot H^2 \cdot \cos \beta \cdot \frac{[(1 - \mu^2) \cdot (\sigma_T)^2]^2}{E^3} \cdot \left(\ln \frac{d_{np}^2}{b^2} + 0,814 \right). \quad (12)$$

Работа, затраченная на преодоление трения между витками, может быть представлена следующим выражением:

$$A_{тр} = F \cdot \frac{s}{2 \cdot \cos \beta} \cdot n_k \quad (13)$$

где F - сила натяжения проволоки - сила, с которой прижимаются витки при намотке, обеспечивая устойчивость формы и структуры ТН; n_k - количество контактов в ТН.

Здесь количество контактов определяется по формуле [1]:

$$n_{k(ТН)} = \pi \cdot n \cdot \frac{(D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{mp}) \cdot H}{(d_{mp} + s)^2} \cdot \sin 2\beta. \quad (14)$$

Тогда выражение (13) с учетом формулы (14) принимает вид:

$$A_{mp} = F \cdot \frac{\pi \cdot n \cdot s \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{mp}) \cdot H}{(d_{mp} + s)^2} \cdot \sin \beta. \quad (15)$$

Таким образом, решая совместно выражения (1), (2), (5), (12) и (15), окончательно получим:

$$p = \left[\varepsilon \cdot (1 + n_s) \cdot \cos \beta - 35 \cdot \left(\frac{(1 - \mu^2) \cdot \sigma_T}{E} \right)^2 - \frac{n \cdot D_{cp} \cdot f \cdot \frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \beta}{2}}{d_{mp} \cdot \left(\frac{1}{n_s} + 1 \right)} \right] \cdot \left(\frac{d_{mp}}{n \cdot D_{cp}} \right)^4 \cdot \frac{G \cdot \cos^3 \beta}{8 \cdot \pi}. \quad (16)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $p = P/S$ - давление осевого уплотнения ТН; $S = \pi \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{mp}) \cdot h$ - площадь нагружения ТН (площадь поперечного сечения ТН - кольцо); $h = 2 \cdot n \cdot d_{mp}$ - толщина стенки ТН; $\varepsilon = \Delta H/H$ - относительная осевая деформация ТН; $D_{cp} = (D_0 + 2 \cdot n \cdot d_{mp})$ - срединный диаметр ТН как для тонкостенной оболочки; $n_s = s/d_{mp}$ - отношение межвиткового зазора к диаметру проволоки; $f = F/P < 1$ - коэффициент трения витков проволоки.

Выражение (16) отражает связь структурных и механических характеристик ПИНП с давлением осевого уплотнения ТН и может быть использовано с целью оптимизации процесса получения изделий с заданными эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петюшик, Е.Е., Реут, О.П. Якубовский, А.Ч. Основы деформирования проволочных тел намотки. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 218 с.
2. А. Якубовский, Е. Петюшик, Технология получения пористых проволочных изделий // Материалы 22-го междунар. научного симпозиума молодых научных работников и студентов / ВТШ. – Зелена Гура (Республика Польша), 2001. – Т. Механика. – С. 247 – 252.
3. В.А. Сухарев, И.И. Матюшев, Расчет тел намотки. – М.: Машиностроение, 1982. – 136 с.
4. 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.
5. В.И. Феодосьев, Сопротивление материалов: Учебник для вузов. – М.: Наука, 1967. – 552 с.
6. Б.С. Ковальский, К вопросу о напряжениях при местном сжатии // Научные записки Харьковского авиационного института. – 1940. – Т. 2. – Вып. 2 (5). – С. 15 - 21.
7. Е.Е. Петюшик, А.Ч. Якубовский, Ч.А. Якубовский Пластическое деформирование проволочного тела намотки // Вестник БГПА. – 2002. – № 1. – С. 31 - 34.