

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
ПОРИСТОГО ПРОНИЦАЕМОГО ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

**THE STRUCTURE ANALYTICAL RESEARCH  
OF POROUS PERMEABLE WIRE MATERIAL**

*Andrzej JAKUBOWSKI, Renata CRASTO  
Maritime University of Szczecin*

**Резюме:**

Особенности технологии изготовления пористого проницаемого материала на основе проволоки позволили провести аналитическое исследование структуры и структурных характеристик проволочного тела намотки с целью прогнозирования свойств материала, получаемого последующей деформационной обработкой (радиальным обжатием). Благодаря организованной регулируемой укладке проволоки витков в теле намотки рассмотрен как многопролетная неразрезная балка, а соприкосновение витков – как контактное взаимодействие двух цилиндров. Достаточно точный расчет количества межвитковых контактов позволил перейти от перемещений в единичном фрагменте к деформации тела намотки в целом. На основании исследования деформационных процессов с учетом геометрии тела намотки и механических свойств используемой проволоки рассчитаны структурные характеристики пористого проницаемого проволочного материала. Установлено оптимальное количество слоев намотки, исключающее искажение организованности окончательной структуры. Получена взаимосвязь между давлением обжатия тела намотки и относительной плотностью изготавливаемого материала, позволяющая управлять технологическими режимами намотки и уплотнения для обеспечения требуемых свойств изделия.

**Abstract:**

The details of making technology of porous permeable material with use of wire are allowed to carry out the analytical research of structure and structural characteristics of wire winding body. Its permit for prognostication the final properties of material, that is produced by the following deformation treatment (diameter reduction). Due to the regular organized arrangement of wire, the coil of winding body is considered as a multispan continuous beam, but a contact of coils – as interaction of two cylinders. Possibility of exactly calculation of the contacts between coils is allowed to go over the single fragment displacements into deformation of whole winding body. During research of deformation processes in regards of winding body geometry and used wire mechanical properties, the structural characteristics of porous permeable wire material are expected. The optimal number of winding layers, eliminating the distortion of organized final structure, is established. The material pressure–compactness relation is obtained in order to control the technological conditions of winding and drafting for guarantee the product required properties.

**Ключевые слова:** проволока, тело намотки, обжатие, контакт и изгиб витков, структурные характеристики.

**Key words:** wire, winding body, diameter reduction, contacting and bending coils, structural characteristics.

**ВВЕДЕНИЕ**

Особое место в современной технике занимают изделия из пористых проницаемых материалов (ППМ) благодаря их способности пропускать через себя жидкости и газы. Традиционно такие изделия представлены материалами на основе металлических или керамических порошков (ППМП), металлических сеток (ППМС) [1, 2]. Одним из условий обеспечения надежной и эффективной работы оборудования, конструкция которого предусматривает использование подобных материалов, является создание ППМ с организованной регулируемой структурой пор.

Сетчатые материалы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с материалами порошковыми – точную повторяемость структуры, возможность варьирования в широком диапазоне пористости и регулирования размеров пор, а также пластичность и высокую динамическую прочность [2]. Однако технология изготовления ППМС весьма трудоемка и дорогостояща. В связи с этим перспективным направлением в области создания новых ППМ является разработка материалов, обладающих регулируемой организованной структурой и высокими показателями эксплуатационных свойств подобно ППМС, но более технологичных и меньшей себестоимостью.

Представляется возможным изготовление ППМ из непрерывного металлического волокна (ППМВ) с использованием в качестве основы проволоки без предварительного плетения сеток. Процесс изготовления такого материала включает в себя формирование проволоочной заготовки в виде тела намотки (ТН) путем послойной крестовой намотки проволоки на формообразующую оправку и последующего деформирования ТН в условиях радиального обжатия без дальнейшего спекания, необходимого для получения ППМП [3].

Создание ППМВ как нового материала требует изучения его структурных характеристик, управление которыми осуществляется уже на стадии формирования заготовки в процессе намотки проволоки; окончательная структура формируется при деформационной обработке ТН.

### СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОЛОЧНОГО ТЕЛА НАМОТКИ

Намотка проволоки (Рис. 1) диаметром  $d$  на формообразующую цилиндрическую оправку диаметром  $D_{opr}$  и рабочей длиной  $L$  осуществляется под углом  $\beta$  к поперечной плоскости оправки в  $n$  слоев. Для намотки каждого слоя производится укладка витков проволоки вдоль ТН за требуемое количество проходов в обоих направлениях, обеспечивая необходимый постоянный зазор  $s$  между двумя соседними однонаправленными витками данного слоя по всей длине укладки  $L$ .

Структурные характеристики, такие как пористость, удельная поверхность пор, размер пор, относятся к классу геометрических и могут быть определены аналитически.

Пористость характеризует величину пустого внутреннего пространства в пористом теле и определяется объемом пустот в единице объема всего тела [1]. Общая для всех материалов формула пористости имеет вид:

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V} = \frac{V - V_{np}}{V} = 1 - \frac{V_{np}}{V} \quad (1)$$

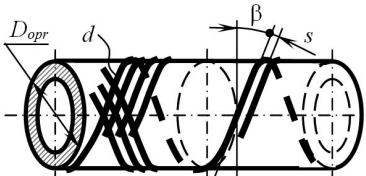


Рис. 1 Принципиальная схема укладки витков проволоки при формировании ТН

Для ТН наружным диаметром  $D_0$  и толщиной намотки  $H$  (рис. 2) общий объем равен:

$$V = V_0 = \frac{\pi \cdot (D_0^2 - D_{opr}^2)}{4} \cdot L = \pi \cdot H \cdot (D_{opr} + H) \cdot L \quad (2)$$

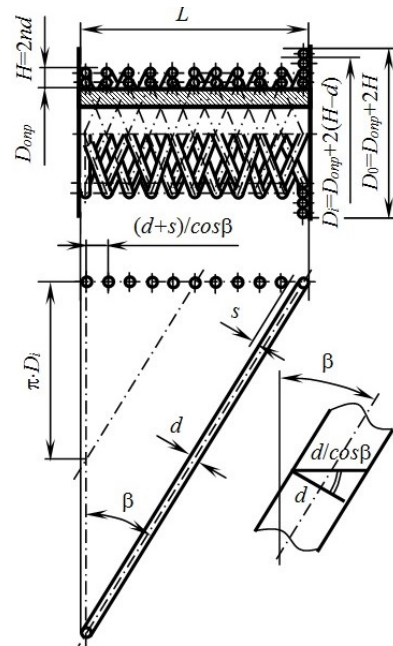


Рис. 2 Расчетная схема формирования ТН

Занимаемый проволокой объем ТН равен:

$$V_{np} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_{np} \quad (3)$$

Здесь используемая длина проволоки  $l_{np}$  является суммой длин проволоки на всех слоях намотки  $l_{np} = \sum l_i$ . Требуемая для формирования одного  $i$ -ого слоя длина  $l_i$  при двусторонней раскладке определяется как (см. рис. 2): 1) произведение длины витка в  $i$ -ом слое диаметром  $D_i$  на общее количество витков в этом слое; 2) произведение длины проволоки для одного прохода в  $i$ -ом слое на число проходов в слое. Тогда:

$$\begin{aligned} l_{np} &= \sum_{i=1}^n l_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\pi \cdot D_i}{\cos \beta} \cdot \frac{L \cdot \cos \beta}{d + s} \cdot 2 \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{L}{\sin \beta} \cdot \frac{\pi \cdot D_i \cdot \sin \beta}{d + s} \cdot 2 \right) = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{d + s} \cdot \sum_{i=1}^n D_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot (D_{opr} + H)}{d + s} \cdot L \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, для ТН формула (1) с учетом выражений (2-4) окончательно принимает вид:

$$\Pi_0 = 1 - \frac{V_{np}}{V_0} = 1 - \frac{d^2}{D_0^2 - D_{opr}^2} \cdot \frac{l_{np}}{L} = \quad (5)$$

$$= 1 - \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot d^2}{4 \cdot H \cdot (d + s)} = 1 - \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot (d + s)} \approx 1 - \frac{0,8d}{d + s}$$

Удельная поверхность пор характеризует степень развитости внутренней поверхности пористого тела и определяется площадью поверхностей пор в единице

объема всего тела [1]. Общая для всех материалов формула удельной поверхности пор имеет вид:

$$S_V = \frac{S_{II}}{V} = \frac{S_{np} - n_k \cdot S_k}{V} \quad (6)$$

Для проволочного ТН площадью поверхностей пор  $S_{II}$  является площадь боковой поверхности используемой проволоки  $S_{np}$ , так как слагаемое, учитывающее количество  $n_k$  и площадь  $S_k$  межвитковых контактов в ТН, равно нулю. Тогда:

$$S_{II} = S_{np} = \pi \cdot d \cdot l_{np} = \frac{\pi^2 \cdot H \cdot (D_{onp} + H)}{d + s} \cdot L \quad (7)$$

Таким образом, для ТН формула (6) с учетом выражений (2) и (7) окончательно принимает вид:

$$S_{V0} = \frac{S_{np}}{V_0} = \frac{\pi}{d + s} \quad (8)$$

Тот же результат получим, если с учетом выражения (5) используем формулу, применяемую непосредственно к материалам из металлических сеток [2]:

$$S_{V0} = 4 \cdot \frac{1 - \Pi_0}{d} = \frac{\pi}{d + s} \quad (9)$$

Средний размер пор проволочного ТН также можно определить с учетом выражения (5), используя формулу для материалов из металлических сеток [1, 2]:

$$d_{II0} = d \cdot \frac{\Pi_0}{1 - \Pi_0} = \frac{4}{\pi} \cdot (d + s) - d \approx 1,3 \cdot s + 0,3 \cdot d \quad (10)$$

Размер поры условно соответствует максимальному размеру шарообразной частицы, проходящей сквозь пору, и в ТН примерно равен зазору  $s$  (Рис. 3). Величина зазора связана с особенностями укладки проволоки – с неизбежным смещением соседних однонаправленных витков в местах их пересечения со встречными витками. Минимальное значение  $s$  может быть определено из ДАВС на Рис. 3:

$$AB = \sqrt{BC^2 - AC^2} = \frac{d + s_{\min}}{\sin 2\beta} = \sqrt{\left(\frac{2d}{\sin 2\beta}\right)^2 - d^2} \Rightarrow \Rightarrow s_{\min} = d \cdot \left(\sqrt{4 - \sin^2 2\beta} - 1\right) \quad (11)$$

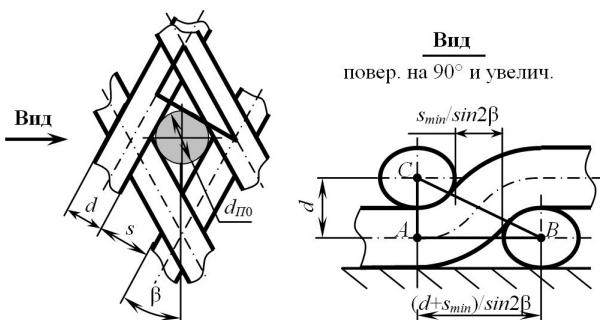


Рис. 3 Схема образования ячейки (поры) при пересечении витков

Выражения (5-8) и (10) описывают основные характеристики структуры проволочного ТН и позволяют с высокой степенью точности прогнозировать окончательные свойства материала, получаемого последующей деформационной обработкой.

### СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИТКОВ ПРОВОЛОКИ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ТЕЛА НАМОТКИ

На этапе радиального уплотнения проволочного ТН происходит уменьшение толщины намотки до величины  $h = H - \Delta$  (Рис. 4) за счет прогиба  $\delta_u$  витков проволоки в межконтактных зонах, вызванного изгибающей силой, и за счет сближения  $\delta_k$  витков в зонах их контактного взаимодействия, вызванного сжимающей силой. Абсолютную деформацию ТН можно выразить следующим образом:

$$\Delta = n \cdot \delta_u + (2 \cdot n - 1) \cdot \delta_k \quad (6)$$

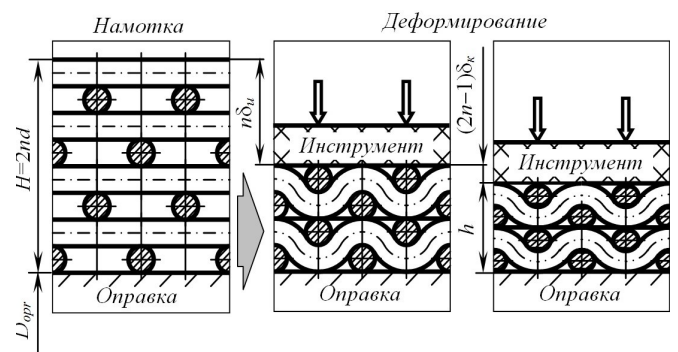


Рис. 4 Структура, изменяющаяся в процессе уплотнения ТН

Достаточно высокая регулярность контактов в ТН позволяет перейти к описанию взаимодействия витков проволоки в единичном контакте, а именно, к взаимодействию двух соприкасающихся цилиндров диаметром  $d$  под углом  $2\beta$  между осями, нагруженных сосредоточенной сжимающей силой  $F_k$  (Рис. 5).

В стадии пластического нагружения сила сжатия цилиндров и их сближение равны [4]:

$$F_k = \frac{2,6}{n_p^3} \cdot \delta_k^2 \cdot \sigma_T = \frac{n_p}{n_\delta^2} \cdot d^2 \cdot \sigma_T \quad (13)$$

$$\delta_k = \frac{0,6 \cdot n_p}{n_a \cdot n_b \cdot n_\delta} \cdot d = 0,6 \cdot n_p \cdot n_\delta \cdot \frac{F_k}{d \cdot \sigma_T}$$

где:

$n_a, n_b, n_p, n_\delta$  – коэффициенты взаимного расположения цилиндров, зависящие от угла намотки проволоки  $\beta$  (см. Таблицу 1),

$\sigma_T$  – предел текучести материала проволоки.

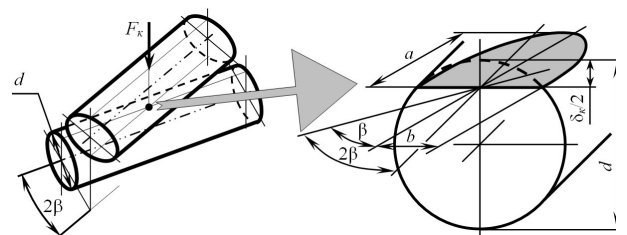


Рис. 5 Модель нагружения соприкасающихся цилиндров со схемой их контакта

Таблица 1  
Коэффициенты взаимного расположения цилиндров

| $\beta$ | $n_a$ | $n_b$ | $n_\delta$ | $n_p$ | $\beta$ | $n_a$ | $n_b$ | $n_\delta$ | $n_p$ | $\beta$ | $n_a$ | $n_b$ | $n_\delta$ | $n_p$ |
|---------|-------|-------|------------|-------|---------|-------|-------|------------|-------|---------|-------|-------|------------|-------|
| 3°      | 9,01  | 0,28  | 0,34       | 0,40  | 10°     | 3,82  | 0,41  | 0,60       | 0,64  | 30°     | 1,49  | 0,72  | 0,94       | 0,94  |
| 4°      | 7,97  | 0,28  | 0,38       | 0,45  | 15°     | 2,73  | 0,49  | 0,73       | 0,74  | 40°     | 1,13  | 0,89  | 0,99       | 0,99  |
| 5°      | 6,63  | 0,31  | 0,43       | 0,49  | 20°     | 2,14  | 0,57  | 0,82       | 0,83  | 45°     | 1,0   | 1,0   | 1,0        | 1,0   |

Анализ пластической деформации цилиндров позволил установить, что их первоначально точечный контакт приобретает форму эллиптической площадки с размерами большой и малой полуосей (см. Рис. 5) [4]:

$$a = \frac{0,6 \cdot n_a \cdot n_\delta \cdot F_K}{d \cdot \sigma_T} = 0,9 \cdot \frac{n_a}{n_p} \cdot \delta_K \quad (14)$$

$$b = \frac{0,6 \cdot n_b \cdot n_\delta \cdot F_K}{d \cdot \sigma_T} = 0,9 \cdot \frac{n_b}{n_p} \cdot \delta_K$$

Тогда площадь контакта равна:

$$S_K = \pi \cdot a \cdot b = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n_a \cdot n_b}{n_\delta} \cdot \delta_K \cdot d = \frac{n_p}{n_\delta^2} \cdot d^2 \quad (15)$$

Благодаря организованной укладке проволоки можно также рассматривать виток в любом слое ТН как многопролетную неразрезную балку круглого поперечного сечения диаметром  $d$ , нагруженную посередине каждого пролета сосредоточенной изгибающей силой  $F_u$  (Рис. 6).

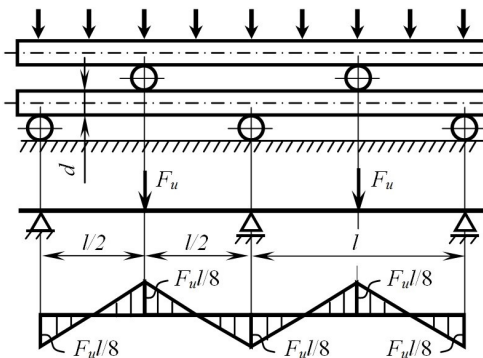


Рис. 6 Модель и расчетная схема нагружения многопролетной неразрезной балки

Расстояние между опорами балки с учетом выражения (11) равно:

$$l = (d + s) / \sin 2\beta \approx 2 \cdot d / \sin 2\beta \quad (16)$$

В силу симметрии нагружения и большого числа опор абсолютная величина максимального изгибающего момента имеет место над опорами и посередине пролетов (см. рис. 6) [5]:

$$|M_{\max}| = \frac{F_u \cdot l}{8} \quad (17)$$

В стадии упругого нагружения, когда максимальные напряжения при изгибе достигают величины предела текучести материала проволоки  $\sigma_{\max} = \sigma_T$  лишь

в периферийных слоях сечения (рис. 7), наибольший изгибающий момент с учетом момента сопротивления  $W_x$  круглого сечения определяется по формуле [6]:

$$M_{\max} = W_x \cdot \sigma_{\max} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot \sigma_T \quad (18)$$

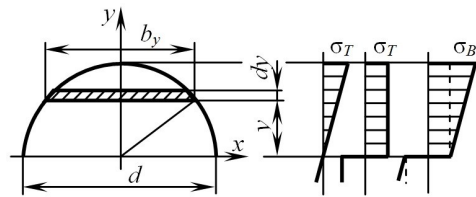


Рис. 7 Расчетная схема распределения напряжений по сечению проволоки

Рассматривая совместно выражения (17) и (18), находим:

$$F_u = \frac{\pi \cdot d^3}{4 \cdot l} \cdot \sigma_T \quad (19)$$

В стадии пластического нагружения, когда пластическая деформация охватывает все сечение, и нормальные напряжения  $\sigma = \sigma_T = \text{const}$  (см. рис. 7), величина наибольшего изгибающего момента определяется следующим образом [6]:

$$M_{\max} = \sigma_T \cdot \int y \cdot dA = \sigma_T \cdot \int y \cdot b_y \cdot dy = \sigma_T \cdot \int y \cdot \sqrt{d^2 - 4 \cdot y^2} \cdot dy = \sigma_T \cdot \left( \int_0^{d/2} y \cdot \sqrt{d^2 - 4 \cdot y^2} \cdot dy \right) \cdot 2 = \frac{d^3}{6} \cdot \sigma_T \quad (20)$$

При совместном решении выражений (17) и (20) находим:

$$F_u = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sigma_T \quad (21)$$

Таким образом, в стадии пластического нагружения изгибающая сила в 1,7 раза больше, чем сила упругого нагружения.

В стадии пластического нагружения с учетом упрочнения материала проволоки, когда в сечении, охваченном пластической деформацией, максимальные напряжения в периферийных слоях достигают предела прочности материала  $\sigma_{\max} = \sigma_B$  (см. Рис. 7), наибольший изгибающий момент выражается следующим образом [7, 8]:

$$M_{\max} = \frac{d^3}{6} \cdot \sigma_T + \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot (\sigma_B - \sigma_T) \approx \frac{d^3}{6} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_T + 3 \cdot \sigma_B}{5} \quad (22)$$

Тогда при совместном решении выражений (17) и (22), принимая для пластичных материалов  $\sigma_T/\sigma_B \approx 0,6$ , находим:

$$F_u = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_T + 3 \cdot \sigma_B}{5} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3}{l} \cdot 1,4\sigma_T \quad (23)$$

Таким образом, в стадии пластического нагружения с учетом упрочнения материала проволоки изгибающая сила в 1,4 раза больше, чем сила пластического нагружения без упрочнения материала, и в 2,4 раза больше силы упругого нагружения.

Зависимость прогиба многопролетной балки круглого сечения от действующей изгибающей силы определяется по следующей формуле [7]:

$$\delta_u = \frac{F_u \cdot l^3}{3 \cdot \pi \cdot d^4 \cdot E} = \frac{F_u \cdot l^3}{12 \cdot d^2 \cdot EA} \quad (24)$$

где:

$E$  – модуль продольной упругости материала проволоки,

$A = \pi d^2/4$  – площадь поперечного сечения проволоки.

Исходя из регулярности организованной структуры проволочного ТН, представляется возможным произвести достаточно точный расчет количества контактов между витками. При этом, количество контактов равно количеству пролетов. Расчет усилий и перемещений в единичном контакте и пролете позволяет перейти к определению силовых и деформационных характеристик радиального уплотнения ТН в целом. Так, количество контактов включает в себя количество слоев, количество витков в проходе и проходов в одном слое, то есть с учетом (4):

$$\begin{aligned} n_k &= 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot D_i \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_i \cdot \sin \beta}{d + s} \right)^2 = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \sin 2\beta}{(d + s)^2} \cdot \sum_{i=1}^n D_i = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot (D_{\text{онп}} + H) \cdot L \cdot \sin 2\beta}{(d + s)^2} = \frac{l_{\text{нп}}}{l} \end{aligned} \quad (25)$$

#### УДЛИНЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ТЕЛА НАМОТКИ

Пластическая деформация, распространяющаяся в глубину сечения проволоки с увеличением нагрузки, охватывая всю высоту сечения, приводит к образованию так называемого пластического шарнира. В нашем случае пластические шарниры образуются одновременно в сечениях над опорами и посередине пролетов (Рис. 8).

При этом каждый пролет балки обращается в механизм. Чтобы определить силу  $F_u$ , при которой возникает пластический шарнир, для каждого

балочного механизма составим уравнение предельного равновесия в форме уравнения работ (см. Рис. 8):

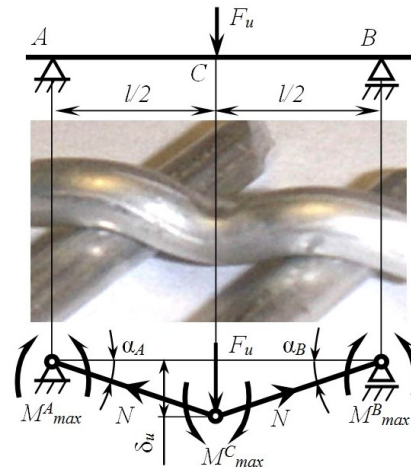


Рис. 8 Модель образования пластического шарнира

$$\begin{aligned} F_u \cdot \delta_u &= M_{\max}^A \cdot \alpha_A + M_{\max}^B \cdot \alpha_B + \\ &+ M_{\max}^C \cdot (\alpha_A + \alpha_B) = 4 \cdot M_{\max} \cdot \alpha \end{aligned} \quad (26)$$

где ввиду симметрии нагружения  $\alpha_A = \alpha_B = \alpha$  – углы поворота стержней AC и BC в пластических шарнирах A и B соответственно,  $M_{\max}^A = M_{\max}^B = M_{\max}^C = M_{\max} = \sigma_T \cdot d^3/6$  – предельные изгибающие моменты, соответствующие состоянию пластического шарнира, в опорах и в точке приложения нагрузки.

Так как на момент образования пластического шарнира перемещения малы в сравнении с величиной пролета, то можно предположить, что  $\alpha \approx 2 \cdot \delta_u/l$ . Тогда уравнение (26) принимает вид:

$$F_u = \frac{4 \cdot M_{\max} \cdot \alpha}{\delta_u} = \frac{8 \cdot M_{\max}}{l} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sigma_T \quad (27)$$

Это выражение позволяет определять нагрузку, при которой во всех пролетах многопролетной балки одновременно образуются пластические шарниры. Оно полностью соответствует выражению (22).

Очевидно, что ось пластически изогнутой балки длиннее оси балки в недеформированном состоянии (см. рис. 8). Пренебрежение удлинением возможно в случае, когда прогиб чрезмерно мал ( $\delta_u \ll d$ ) или длина пролета чрезмерно велика ( $l \gg d$ ) в сравнении с размерами сечения [5]. В нашем случае прогиб балки, расстояние между опорами и диаметр сечения – величины одного порядка. Поэтому удлинением изогнутой балки пренебречь нельзя.

Для определения удлинения проволоки при радиальном уплотнении ТН представим отдельно балочный механизм в виде стержневой системы, нагруженной силой  $F_u$  в узле C, и составим уравнение равновесия в проекции на вертикальную ось y (см. Рис. 8):

$$\sum y = 0 \quad 2 \cdot N \cdot \sin \alpha - F_u = 0 \quad (28)$$

где:

$N$  – внутренняя продольная сила в стержнях AC и BC.



Тогда относительное удлинение стержней согласно закону Гука и с учетом выражений (27) и (28) равно:

$$\varepsilon_F = \frac{N}{EA} = \frac{2 \cdot d^3 \cdot \sigma_T}{3 \cdot l \cdot EA \cdot \sin \alpha} \quad (29)$$

С другой стороны, из рис. 8 следует:

$$\varepsilon_F = \frac{1}{\cos \alpha} - 1 = \frac{2 \cdot (\delta_u - \delta_k)}{l \cdot \sin \alpha} - 1 \Rightarrow \Rightarrow \sin \alpha = \frac{2 \cdot (\delta_u - \delta_k)}{l \cdot (1 + \varepsilon_F)} \quad (30)$$

Рассматривая совместно выражения (29) и (30), получим:

$$\varepsilon_F = \frac{2,4 \cdot (\delta_u - \delta_k)}{d} - 1 \quad (31)$$

Радиальное обжатие цилиндрического ТН сопровождается уменьшением его диаметра – и над двумя соседними витками в каждом слое образуется «избыточная длина», компенсирующая локальное пластическое удлинение проволоки. В результате этого в направлении от внутреннего слоя к наружному пластическое удлинение будет уменьшаться и может отсутствовать вовсе. Кроме того, за счет «избыточной длины» неизбежен самопроизвольный изгиб проволоки. С одной стороны, это позволяет снизить силовые затраты на обжатие ТН, а также способствует переплетению витков, обеспечивая тем самым повышение прочности изготавливаемого материала. С другой стороны, этот же эффект приводит к искажению организованности структуры ППМВ (Рис. 9). Поэтому целесообразно установить, на каком i-ом слое пластическое удлинение и «избыточная длина» компенсируют друг друга.

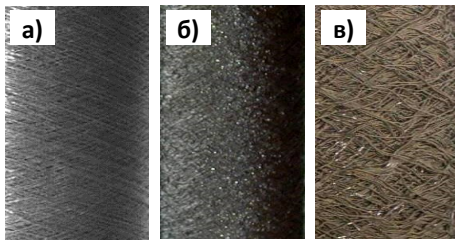


Рис. 9 ТН до обжатия (а), а также после обжатия с сохраненной организованной (б) и искаженной (в) структурой

Относительное удлинение витка проволоки в любом i-ом слое диаметром  $D_i$  (см. рис. 2) за счет образования «избыточной длины» при уменьшении текущего диаметра в процессе уплотнения ТН, учитывая выражение (12), равно:

$$\varepsilon_D = \frac{\pi \cdot D_i / \cos \beta - \pi \cdot (D_i - 2 \cdot \Delta) / \cos \beta}{\pi \cdot D_i / \cos \beta} = \frac{2 \cdot \Delta}{D_i} =$$

$$= 2 \cdot \frac{n \cdot \delta_u + (2 \cdot n - 1) \cdot \delta_k}{D_{onp} + 2 \cdot (2 \cdot n - 1) \cdot d} \approx \frac{\delta_u + 2 \cdot \delta_k}{\frac{D_{onp}}{2 \cdot n} + 2 \cdot d}$$

Тогда, приравняв пластическое удлинение витка проволоки от непосредственного действия нагрузки (31) к удлинению витка за счет образования «избыточной длины» (32), определяем, на каком слое эти удлинения компенсируют друг друга:

$$\varepsilon_D \leq \varepsilon_F \Rightarrow n \leq \frac{1}{2 \cdot d} \cdot \frac{D_{onp}}{\frac{\delta_u + 2 \cdot \delta_k}{2,4 \cdot (\delta_u - \delta_k) - d} - 2} = \left| \frac{\delta_u \rightarrow d}{\delta_k \rightarrow d/2} \right| = \frac{D_{onp}}{16 \cdot d} \quad (33)$$

Выражение (33) позволяет установить максимальное количество слоев намотки при формировании проволочной заготовки с тем, чтобы избежать искажения организованности окончательной структуры ППМВ.

### СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПЛОТНЕННОГО ТЕЛА НАМОТКИ

На основании изученных деформационных процессов, происходящих при радиальном уплотнении ТН, благодаря организованной структуре представляется возможным рассчитать структурные характеристики проволочной прессовки.

Пористость ППМВ определяется согласно формуле (1). При этом общий объем прессовки составляет:

$$V = \pi \cdot \frac{(D^2 - D_{onp}^2)}{4} \cdot L = \pi \cdot h \cdot (D_{onp} + h) \cdot L = \pi \cdot (H - \Delta) \cdot (D_{onp} + H - \Delta) \cdot L \quad (34)$$

где наружный диаметр прессовки (см. рис. 4)

$$D = D_{opr} + 2 \cdot h = D_{onp} + 2 \cdot (H - \Delta)$$

Занимаемый проволокой объем согласно выражениям (3) и (4) равен:

$$V_{np} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_{np} = \frac{\pi^2 \cdot n \cdot d^2 \cdot (D_{onp} + H) \cdot L}{2 \cdot (d + s)} = \frac{\pi^2 \cdot d \cdot H \cdot (D_{onp} + H) \cdot L}{4 \cdot (d + s)} \quad (35)$$

Тогда с учетом выражений (34) и (35) получим:

$$\Pi = 1 - \frac{V_{np}}{V} = 1 - \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot (d + s)} \cdot \frac{H \cdot (D_{onp} + H)}{(H - \Delta) \cdot (D_{onp} + H - \Delta)} \approx 1 - \frac{0,8 \cdot d}{d + s} \cdot \Omega \quad (36)$$

где коэффициент изменения поперечных размеров ТН

$$\Omega = \frac{H \cdot (D_{onp} + H)}{(H - \Delta) \cdot (D_{onp} + H - \Delta)} = \frac{H \cdot (D_{onp} + H)}{h \cdot (D_{onp} + h)} = \frac{D_0^2 - D_{onp}^2}{D^2 - D_{onp}^2} \geq 1$$

Удельная поверхность пор ППМВ определяется согласно формуле (6). В данном случае площадь поверхности пор зависит не только от площади боковой поверхности используемой проволоки (7), но и от площади (15) и количества (25) межвитковых контактов. Тогда с учетом выражения (34) находим:

$$S_V = \frac{S_{np} - n_K \cdot S_K}{V} = \frac{\pi \cdot H \cdot (D_{onp} + H)}{d + s} - \frac{2 \cdot n \cdot (D_{onp} + H) \cdot \sin 2\beta}{(d + s)^2} \cdot \frac{n_p}{n_\delta^2} \cdot d^2 = \frac{\pi \cdot H \cdot (D_{onp} + H)}{(H - \Delta) \cdot (D_{onp} + H - \Delta)} \cdot \left( 1 - \frac{\sin 2\beta}{2\pi} \cdot \frac{n_p}{n_\delta^2} \right) \approx \frac{\pi}{d + s} \cdot \Omega \quad (37)$$

Удельную поверхность пор ППМВ также можно определить по формуле (9) с учетом (36):

$$S_V = 4 \cdot \frac{1 - \Pi}{d} = \frac{\pi}{d + s} \cdot \Omega \quad (38)$$

Средний размер пор ППМВ согласно формуле (10) с учетом (36) равен:

$$d_{\Pi} = d \cdot \frac{\Pi}{1 - \Pi} = d \cdot \left( \frac{4 \cdot (d + s)}{\pi \cdot d \cdot \Omega} - 1 \right) = \frac{4 \cdot (d + s)}{\pi \cdot \Omega} - d \approx 1,3 \cdot (d + s) \cdot \Omega^{-1} - d \quad (39)$$

Таким образом, получены зависимости (36-39) структурных характеристик ППМВ от размера и материала исходной проволоки, режимов намотки (геометрии ТН), режимов деформационной обработки.

### ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ ПРЕССОВАНИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МАТЕРИАЛА

Одной из качественных оценок эксплуатационных свойств является относительная плотность. Для обеспечения возможности управления свойствами ППМВ установим связь между относительной плотностью материала  $n = 1 - \Pi$  и давлением обжатия  $p = f(v)$ . С этой целью воспользуемся законом сохранения энергии, согласно которому общая работа прессования ТН равна сумме работ, затрачиваемых на деформирование витков проволоки в зонах взаимного контакта и в межконтактных зонах:

$$p \cdot \int_{\Delta} S d\Delta = n_K \cdot \left( \int_{\delta_K} F_K d\delta_K + \int_{\delta_U} F_U d\delta_U \right) \quad (40)$$

где: изменяющаяся при обжатии площадь наружной поверхности ТН (площадь нагружения)

$$S = \pi \cdot (D_{onp} + 4 \cdot n \cdot d - 2 \cdot \Delta) \cdot L = \pi \cdot (D_{onp} + 2 \cdot (H - \Delta)) \cdot L$$

Интегрируя равенство (40) в указанных пределах, с учетом выражений (13), (23) и (25) получим:

$$p = \frac{2 \cdot n \cdot (D_{onp} + H) \cdot \sin 2\beta}{(d + s)^2} \cdot \frac{\frac{n_p}{n_\delta^2} \cdot d^2 \cdot \delta_K \Big|_0^{d/2} + \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3}{l} \cdot 1,4 \cdot \delta_U \Big|_0^d}{(D_{onp} + 4 \cdot n \cdot d - \Delta) \cdot \Delta \Big|_0^{2nd}} \cdot \sigma_T = \left( \frac{4 \cdot v \cdot \sin 2\beta}{\pi \cdot \Omega} \right)^2 \cdot \left( \frac{n_p}{2 \cdot n_\delta^2 \cdot \sin 2\beta} + 1 \right) \cdot \sigma_T \quad (41)$$

Зависимость (41) давления обжатия от относительной плотности ППМВ позволяет, управляя технологическими режимами намотки проволоки и обжатия ТН, обеспечить требуемые свойства изделия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа структуры, формирующейся при намотке проволоки за счет организованной и регулируемой укладки витков, проведено исследование изменения структуры в процессе деформационной обработки ТН – рассмотрены модели взаимодействия витков и определено количество межвитковых контактов.

В результате исследования деформационных процессов рассчитаны структурные характеристики изготавливаемого ППМВ и установлено, что при уменьшении диаметра проволоки и/или межвиткового зазора и при увеличении деформации пористость материала и средний размер пор уменьшаются, а удельная поверхность пор растет.

Количества слоев намотки, при котором можно избежать искажения организованности окончательной структуры, зависит в основном от отношения диаметра оправки к диаметру проволоки.

Зависимость давления обжатия от относительной плотности материала является квадратичной функцией и учитывает технологические режимы изготовления ППМВ и механические свойства используемой проволоки.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.V. Belov. *Poristyye pronitsayemyye materialy*. М.: Metallurgiya, 1987, s. 335.
- [2] Yu.I. Sinel'nikov et al. *Poristyye setchatyye materialy*. М.: Metallurgiya, 1983, s. 64.
- [3] A.Ye. Yakubovskiy, Ye. Petyushik. „Tekhnologiya polucheniya poristyykh provolochnykh izdeliy”, *Materialy 22-go Mezhdunarodnogo Nauchnogo, Simpoziuma Molodykh Nauchnykh Rabotnikov i Studentov, Zelena Gura, Polsha, 2001, s. 247.*
- [4] Ye.Ye. Petyushik, A.Ch. Yakubovskiy, Ch.A. Yakubovskiy. „Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye v yedinichnom kontakte pri uprugom deformirovanii pronitsayemykh materialov na osnove provoloki v vide tel namotki”, *Vestsi Akad. navuk*

- Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. 2002. № 2, s. 10-15.
- [5] A.Ch. Yakubovskiy, Ch.A. Yakubovskiy. „O metode rascheta nerazreznykh balok”, Vestnik BNTU, № 2, 2006, s. 43-48.
- [6] V.I. Feodos'yev. *Soprotivleniye materialov*, M.: Nauka, 1967, s. 552.
- [7] Ye.Ye. Petyushik, A.Ch. Yakubovskiy, Ch.A. Yakubovskiy. „Raschet usiliy i peremeshcheniy pri uprugoplasticheskom izgibe i udlinenii provoloki v sloye pronitsayemogo materiala pri radial'nom pressovanii tela namotki”, Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fiz.-tekhnichnykh navuk, 2003. № 1, s. 49-53.
- [8] Ye.Ye. Petyushik, A.Ch. Yakubovskiy, Ch.A. Yakubovskiy. „Plasticheskoye deformirovaniye provolochnogo tela namotki”, Vestnik BGPA, 2002. № 1, s. 31-34.

---

dr inż. Andrzej Jakubowski, mgr inż. Renata Crasto  
Maritime University of Szczecin, Department of Technical  
Mechanics IPNT WM  
Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, POLAND  
e-mail: a.jakubowski@am.szczecin.pl