

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПРОВОЛОЧНОЙ ПОРИСТОЙ ТРУБЫ

*Институт повышения квалификации и переподготовки кадров
Минск, Беларусь*

Распространение пористых проницаемых материалов (ПМ) в различных областях техники в связи с их способностью пропускать через себя жидкости и газы требует постоянного совершенствования эксплуатационных свойств таких материалов. ПМ представляет систему составляющих его структурообразующих элементов (СОЭ), определенным образом взаимно ориентированных и консолидированных в твердое тело. Широкое применение находят изделия из ПМ на основе порошков и волокон различных металлов и их сплавов, керамики, полимеров. Перспективным представляется использование ПМ на основе непрерывного металлического волокна (в качестве СОЭ выступает проволока) (ПрПМ), получаемый намоткой проволоки на оправку и уплотнением тела намотки радиальным прессованием (рис. 1) без последующего спекания [1]. В процессе прессования ПрПМ имеет место структурная деформация всего тела (изменение объема), а СОЭ подвергаются изгибу с растяжением и пластической деформации в контактных областях. Эксплуатационные свойства ПМ определяются структурными (пористость, форма и размеры пор, удельная поверхность) и каркасными (плотность и связность пористого материала, механические свойства материала СОЭ) характеристиками.

Большинство известных исследований сконцентрировано на изучении струк-

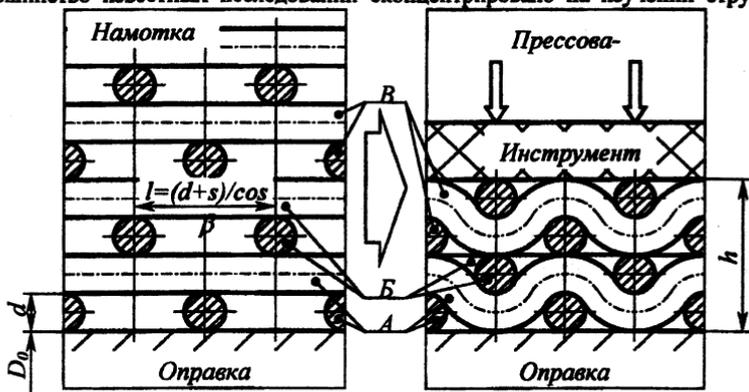


Рис. 1. Структура пористого проволочного материала, изменяющаяся в процессе его изготовления

турных характеристик ПМ. Вместе с тем, надежная и эффективная работа ПМ во многом зависит от каркасных характеристик, в частности, механических свойств, что вызывает необходимость изучения последних.

Настоящая работа является попыткой в первом приближении оценить условие нарушения работоспособности ПрПМ при их эксплуатации, связанной с пропусканием через них жидкостей или газов. По условиям изготовления ПрПМ металлические связи между СОЭ в местах их контакта отсутствуют. Механическая прочность всего тела обусловлена зацеплением СОЭ между собой в результате их укладки при намотке, а также пластической деформации в окрестностях контактов и пластической деформации изгиба с удлинением и заполнением пустот между витками нижележащих слоев, сопровождающейся упрочнением. Исходя из этого, можно считать, что наступление пластической деформации в любом из СОЭ при эксплуатационной нагрузке влечет нарушение структуры материала и потерю его работоспособности. Поэтому искомым является условие сохранения исходной структуры материала с возможными деформациями как всего тела в целом, так и отдельных СОЭ в пределах упругой зоны, что, в свою очередь, обусловлено прочностью и жесткостью его каркаса. Расчет производим для тонкостенной трубы ($D_0/h \geq 10$) круглого сечения из ПрПМ (далее – трубы), как наиболее технологичной в изготовлении и в эксплуатации. Считаем, что сечение исходной проволоки, из которой изготовлена труба – круг; диаметр проволоки во всем объеме ПрПМ постоянный; структура пористого материала регулярная и равноплотная. Рассматриваем две схемы приложения нагрузки (давления жидкости или газа): к внутренней и к наружной поверхности трубы.

При нагружении внутренним давлением p_0 (рис. 2) лимитирующим по прочности является внутренний слой А витков проволоки, поскольку в процессе прессования ПрПМ при деформировании тела намотки витки второго Б, третьего В и последующих слоев, укладываются на меньшем диаметре, обеспечивая тем самым виткам каждого следующего слоя больший запас длины на деформацию изгиба. Изгиб проволоки между опорами за счет этой “избыточной длины”, с одной стороны, снижает силовые параметры процесса прессования, а, с другой, способствует усложнению переплетения проволок в направлении к периферии трубы, обеспечивая повышение прочности прессовки [2]. Таким образом, модель нагружения структуры материала представим в виде тонкостенной

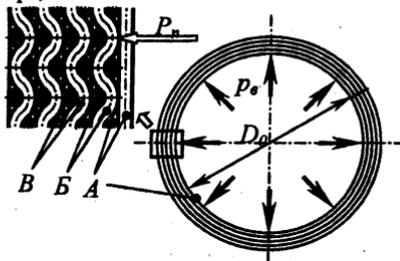


Рис. 2. Схема нагружения трубы внутренним давлением

оболочки (слой А, рис.2) под внутренним давлением с предварительным напряжением, величина которого определяется суммой изгибающих сил при чистом изгибе межконтактных пролетов СОЭ во всех последующих слоях.

Действительное давление на внутреннюю поверхность каркаса трубы лишь косвенно зависит от некоторого номинального входного давления проходящей через стенку рабочей среды (жидкости или газа) p_n , так как при равенстве давления на выходе входному труба находится в условиях гидростатического сжатия. Разрушающее усилие возникает в результате градиента давлений на внутренней и внешней поверхности трубы и определяется вязкостью и скоростью потока, температурными условиями, толщиной стенки трубы, а также структурными характеристиками ПрПМ, главным образом, средним размером пор и коэффициентом их извилистости. Интегральной характеристикой ПрПМ является коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый экспериментально [3]. Поэтому в качестве расчетной примем величину разности давлений на внутренней и наружной стенке трубы:

$$p_a = f(p_n, \xi), \quad (1)$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления ПрПМ.

Воспользуемся далее уравнением Лапласа для определения напряжений в симметричных оболочках, находящихся под внутренним давлением [4]. В нашем случае оболочка представлена набором витков проволоки круглого сечения, в стенках которой возникают только окружные напряжения. Для одного витка проволоки внутреннего слоя трубы справедливым будет равенство:

$$\sigma_\theta = p_a \cdot \frac{D_0}{2 \cdot d} \cdot \frac{4}{\pi}, \quad (2)$$

где σ_θ — окружные напряжения в сечении проволоки, Па; D_0 — внутренний диаметр трубы, мм; d — диаметр проволоки, мм.

Имея в виду, что пластическое течение материала проволоки наступит при достижении окружными напряжениями предела текучести материала проволоки σ_T , из уравнения (2) запишем выражение для предельного давления, прикладываемого к внутренней поверхности витка:

$$p_a^{np} = \frac{\pi d}{2D_0} \cdot \sigma_T. \quad (3)$$

Предварительное напряжение внутреннего витка p_n^{max} обусловлено наличием последующих слоев пластически деформированных проволок.

Рассмотрим участок тела трубы длиной l в некотором n -ом слое (кроме внутреннего), нагруженный сосредоточенной силой P_n , приложенной к середине изогнутой части витка проволоки (рис. 3). Действие этой силы вызывает чистый изгиб (поскольку имеется "избыточная длина" проволоки между опорами [2]) проволоки на пролете l . Достижение силой P_n некоторой критической величины, вызывающей на-

пряжения, равные пределу текучести материала проволоки (с учетом упрочнения при технологическом уплотнении тела намотки), приводит к выходу витков из зацепления. Таким образом, нарушение исходной структуры материала трубы обуславливает возникновение на этих участках напряжений [4]:

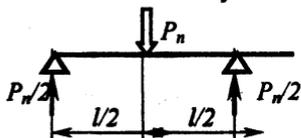


Рис. 3. Схема нагружения элементарного участка сосредоточенной силой

где $M_{изг}^{max} = P_n \cdot l/4$ — максимальный изгибающий момент нагруженного участка витка, Н·мм; $W_x = \pi \cdot d^3/32$ — момент сопротивления круглого сечения проволоки, мм³; $l = (d + s)/\cos \beta$ — длина элементарного участка, мм; s — межвитковый зазор в одном слое, мм; (рис. 1) β — половина угла относительного расположения витков проволоки одного слоя.

Выразив из уравнения (4) максимальную изгибающую силу в некотором n -ом слое, имеем:

$$P_n = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \cos \beta}{8 \cdot (d + s)} \cdot \sigma_T \quad (5)$$

Предварительное напряжение одного витка внутреннего слоя трубы p_u^{max} определим, исходя из следующих положений: сосредоточенная сила P_n одинакова во всех пролетах во всем объеме тела трубы; величина межвиткового зазора s в любом слое соизмерима с величиной диаметра проволоки d [1], а количество межвитковых контактов (число пролетов l) в теле трубы, отнесенное к одному витку внутреннего слоя, определяется из выражения:

$$n_k = \frac{\pi \cdot \sin 2\beta}{2 \cdot (d + s)} \cdot (2 \cdot n - 1) \cdot n \cdot (D_0 + 2 \cdot n \cdot d), \quad (6)$$

что позволяет рассматривать сумму сил P_n на количестве пролетов n_k как распределенную нагрузку на наружную поверхность витка внутреннего слоя.

Тогда предварительное напряжение одного витка внутреннего слоя трубы выразится следующим образом:

$$p_u^{max} = \sum_1^n \frac{P_n \cdot n_k}{S} = \pi d^2 n(n+1) \frac{6n^2 d + 2nd + 4D_0 n - D_0 - 2d}{48(d+s)^2(D_0+d)} \sin(\beta) \cos^2(\beta) \sigma_T, \quad (7)$$

где $S = \pi \cdot (D_0 + d) d$ — площадь нейтрального слоя витка внутреннего слоя трубы, мм².

Минимальное давление, вызывающее нарушение структуры ПрПМ и, следовательно, дальнейшую неработоспособность трубы, выразится так:

$$p_s^{min} = p_s^{np} + p_u^{max} = \left(\frac{1}{2D_0} + dn(n+1) \frac{6n^2 d + 2nd + 4D_0 n - D_0 - 2d}{48(d+s)^2(D_0+d)} \sin(\beta) \cos^2(\beta) \right) \pi d \sigma_T \cdot (8)$$

В случае приложения нагрузки к наружной поверхности трубы, нарушение структуры ПрПМ наступает при потере устойчивости формы внутренним слоем трубы. Наличие наружных слоев частично компенсирует эту нагрузку. В предположении, что все, за исключением внутреннего, слои деформируются по схеме рассмотренной выше, а первоначальная потеря жесткости внутренним слоем приводит к изменению его формы от круговой к эллиптической, определим минимальное наружное давление p_n^{min} , вызывающее нарушение структуры ПрПМ при нагружении трубы снаружи.

Рассмотрим задачу об устойчивости кольца, соответствующего одному витку внутреннего слоя трубы, сжатого радиальной равномерно распределенной наружной нагрузкой интенсивности q :

$$q = \frac{24 \cdot E \cdot J_x}{D_0^3}, \quad (9)$$

где E — модуль упругости материала проволоки, МПа; $J_x = \pi \cdot d^4 / 64$ — момент инерции круглого сечения проволоки, мм⁴.

Тогда выражение для давления, вызывающего потерю жесткости одного витка внутреннего слоя трубы, запишется так:

$$p_{ж}^{np} = \frac{q}{d} = \frac{3 \cdot \pi \cdot d^3 \cdot E}{8 \cdot D_0^3}. \quad (10)$$

Окончательно выражение для давления, приводящего к нарушению работоспособности трубы из ПрПМ при наружном нагружении, определится суммой

$$p_n^{min} = p_{ж}^{np} + p_n^{max}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Main Aspects of the Theory and Technology of Producing Permeable Materials with the Organized Porous Structure Through Deformation Processing / Y. Piatsiushyk, O. Reut, A. Yakubousky, L. Boginsky // 15 International Plansee Seminar. — Austria, Reutte, 2001. — V. 3. — P. 285 – 299.
2. Удлинение проволоки в слое тела намотки при его радиальном прессовании / Е.Е. Петюшик, О.П. Реут, А.Ч. Якубовский, Ч.А. Якубовский // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сборник научных трудов / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. — Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. — С. 204–208.
3. Пористые проницаемые материалы: Справочник / Под ред. С.В. Белова. — М.: Металлургия, 1987. — 335 с.
4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для втузов. — М.: Наука, 1986. — 512 с.