

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПРОНИЦАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОВОЛОКИ

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Устройство многих современных стационарных установок и передвижных машин предполагает использование изделий из проницаемых материалов (ПМ) на дискретной основе: порошков, войлочных набивок, проволочных спиралей, металлических сеток и пр. [1]. Условия эксплуатации этих изделий связаны с прохождением через их стенку рабочей среды (жидкости или газа). Это

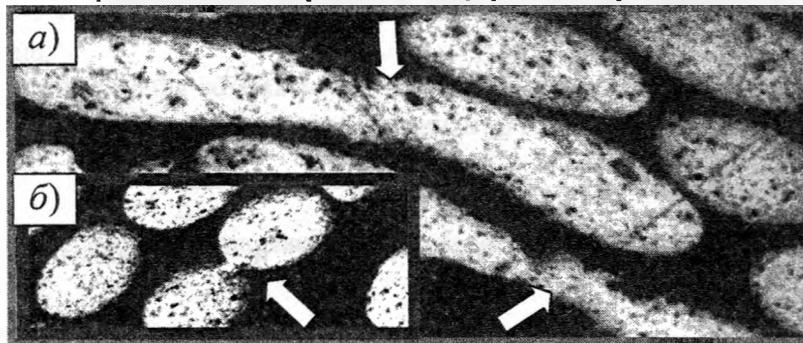


Рис. 1. Вид межвитковых контактов в поперечном сечении ПМП из проволоки X20H80 ( $\times 150$ ):

а) при угле намотки  $\beta=5^\circ$ ; б) при угле намотки  $\beta=40^\circ$ .

часто требует определения критических рабочих нагрузок, превышение которых может привести к нарушению структуры ПМ, надежности изделий и работоспособности оборудования в целом.

Среди всего многообразия ПМ заслуживающими внимания и наименее изученными являются ПМНП — проницаемые материалы на основе навиваемой проволоки (металлического непрерывного волокна), изготавливаемые, например, послойной крестовой намоткой проволоки на цилиндрическую оправку и последующим радиальным уплотнением тела намотки (ТН) и принимаемые форму пористой трубы [2, 3].



Рис. 2. Вид изгиба проволоки X20H80 диаметром  $d_{np}=0,15$  мм ( $\times 40$ ) — фрагмент поперечного сечения ПМП.

Механические свойства ПМНП обусловлены механической связностью витков проволоки в теле материала, т.е. тесно связаны с качеством сцепления витков и характером контактов между ними. И, кроме того, можно считать, что металлические связи между витками проволоки в местах их контакта отсутствуют, так как по условию изготовления подобных материалов термическая обработка может не использоваться [2, 3]. В качестве критической рабочей нагрузки для ПМНП целесообразно рассматривать такую нагрузку, которая приводит к нарушению структуры материала.

Форма и размер контактов витков проволоки при уплотнении ТН в значительной степени зависят от угла намотки  $\beta$ , находящегося в пределах  $5^\circ \dots 45^\circ$  при навивке металлического непрерывного волокна на металлическую оправку [3, 4]. На рис. 1 представлены изображения реальных контактов в ПМ из проволоки диаметром  $d_{np}=0,15$  мм при одинаковой степени относительной деформации ( $\epsilon=0,6$ ). Очевидно, что для увеличения контактной площадки целесообразно использовать угол намотки, находящийся в начале его возможного диапазона, а с увеличением площади контакта (а именно, с образованием контактных лунок) улучшается сцепление витков, что, в свою очередь, ведет к повышению механических свойств материала в целом.

Улучшению сцепления витков проволоки при уплотнении ТН способствует, кроме того, изгиб проволоки (рис. 2). Степень изгибной деформации также связана с углом намотки  $\beta$  — уменьшение угла и, следовательно, рост длины межвиткового пролета, ведут к увеличению прогиба витков, а значит к лучшему сцеплению витков в теле материала и повышению его механических свойств [5].

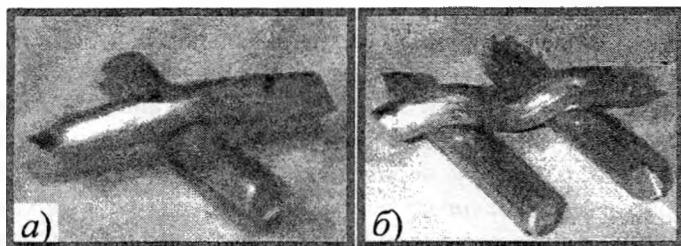


Рис. 3. Вид деформированных модельных проволок в контакте (а) и межконтактной зоне (б).

В реальных ПМНП контактное взаимодействие и изгиб витков имеет тот же характер, что и при моделировании на образцах проволоки большого диаметра (рис. 3).

Можно считать, что при создании рабочего давления наступление так называемой обратной пластической деформации в любом из витков влечет нарушение структуры материала и в дальнейшем потерю работоспособности изделия.

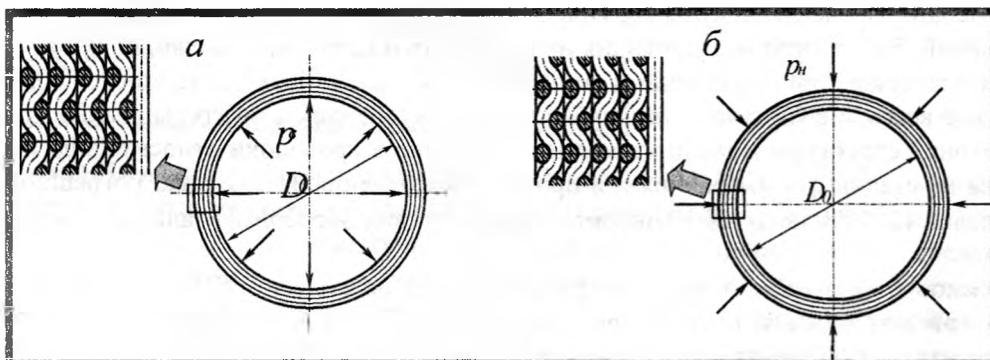


Рис. 4. Схема нагружения ПМНП:

а) внутренним рабочим давлением; б) наружным рабочим давлением.

В случае приложения рабочей нагрузки к внутренней поверхности ПМНП лимитирующим по прочности является внутренний слой витков проволоки, поскольку витки второго, третьего и последующих слоев, укладываясь в процессе уплотнения ТН на меньшем диаметре, обеспечивают виткам каждого следующего слоя большой запас длины на деформацию изгиба (рис. 4, а) [5, 6]. За счет этой “избыточной” длины изгиб проволоки способствует усложнению переплетения витков в направлении к периферии, повышая тем самым запас прочности материала.

В случае приложения рабочей нагрузки к наружной поверхности ПМНП (рис. 4, б) опасным состоянием является не потеря прочности материала, а потеря устойчивости, когда круглая форма равновесия поперечного сечения переходит в эллиптическую форму [6]. Здесь лимитирующим по устойчивости также является внутренний слой витков, и изменение его окружной формы приводит к нарушению структуры материала, но наружные слои обеспечивают некоторый запас устойчивости, сопротивляясь действию внешней нагрузки.

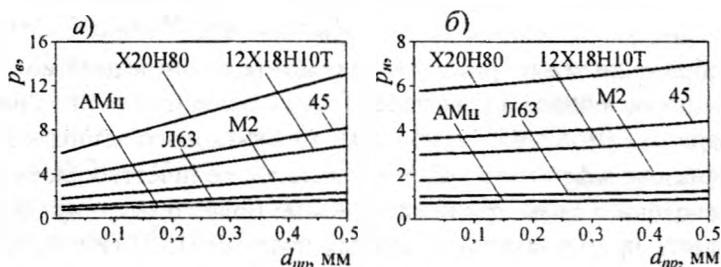


Рис. 5. Расчетные зависимости внутреннего (а) и наружного (б) радиального давления рабочей среды на стенку пористой трубы от диаметра проволоки с учетом ее материала.

Критическое внутреннее и наружное радиальное давление рабочей среды на стенку пористой трубы, рассчитанные аналитически, определяются по формулам [3, 6]:

$$p_{\beta} = 0,4 \cdot \sigma_T \cdot \left[ \frac{4 \cdot d_{ox}}{D_0} + \frac{n}{(1-\varepsilon)} \cdot \left( 1 + \frac{h_{\beta N}}{D_0} \right) \cdot \left( \frac{\sin 2\beta}{1+n_s} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$p_v = 0,4 \cdot \sigma_{\sigma} \cdot \left[ \left( \frac{11,4 \cdot d_{ox} \cdot \cos \beta}{D_0} \right)^3 + \frac{n}{(1-\varepsilon)} \cdot \left( 1 + \frac{h_{\beta N}}{D_0} \right) \cdot \left( \frac{\sin 2\beta}{1+n_s} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Для экспериментального определения прочности ПМНП прикладывали нагрузку, равномерно распределенную по внутренней поверхности трубного изделия, и при нарушении целостности образца (разрыве проволоки на отдельных участках) или его разрушении устанавливали максимальную радиальную деформацию, соответствующую критическому давлению, при котором происходит потеря прочности материала (рис. 5, а). Для экспериментальной оценки устойчивости формы ПМНП прикладывали нагрузку, равномерно распределенную по наружной поверхности изделия, и в момент, когда поперечное сечение теряло свою устойчивую круглую форму, устанавливали то максимальное давление, при котором происходит прогиб стенки (рис. 5, б). При этом было принято, что внутренний диаметр проволоочного изделия  $D_0=50$  мм, количество слоев  $n=10$ , угол намотки  $\beta=5^\circ$ , отношение межвиткового зазора к диаметру проволоки  $n_s=3$ .

Очевидно, что максимальное внутреннее давление, вызывающее нарушение структуры проволоочного ПМ, и максимальное наружное давление, вызывающее потерю его устойчивости, достигают большего значения при увеличении диаметра проволоки и при использовании материала с более высоким пределом текучести. При этом, чем больше диаметр проволоки, тем больше разница давлений. Результаты исследования на прочность и устойчивость свидетельствуют о том, что значения экспериментальных данных находятся ниже расчетных зависимостей (рис. 6). Это связано, прежде всего, с возможным незначительным отклонением структуры реального материала от равномерной структуры модели из-за смещения витков проволоки относительно идеального расположения на стадии формирования и в процессе уплотнения ТН. Однако погрешность испытаний в пределах 12–20% позволяет говорить о соответствии экспериментальных данных расчетным зависимостям.

Зависимости внутреннего давления рабочей среды на стенку ПМНП, вызывающего нарушение структуры материала и потерю прочности, от технологических параметров изготовления пронизаемого изделия (а именно, отношения межвиткового зазора к диаметру проволоки  $n_s$ , угла намотки  $\beta$ , толщины стенки  $h_{ТН}$  и внутреннего диаметра  $D_0$  изделия) ограничены поверхностями,

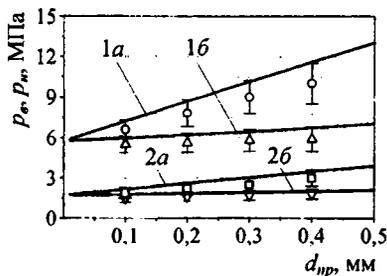


Рис. 6. Зависимости внутреннего (а) и наружного (б) радиальных давлений рабочей среды от диаметра используемой проволоки:

1 — X20H80 (○, △, — эксперимент);  
2 — М2 (□, ▽ — эксперимент).

изображенными на рис. 7. В результате анализа режимов формирования и радиального уплотнения проволоочного ТН выявлено следующее [3, 6]. Угол намотки проволоки должен находиться в диапазоне  $\beta=5...45^\circ$ , отношение межвиткового зазора к диаметру используемой проволоки — в диапазоне  $s/d_{пр} = n_s = 1...3$ , минимальное количество слоев намотки —  $n=10$ , отношение диаметра проволоки к диаметру оправки — не более  $d_{пр}/D_0 = n_d = 0,02$ . Исходя из этого, а также, учитывая область применимости подобных изделий [1, 3] (т.е. установив  $h_{ТН}=1...10$  мм,  $D_0=10...50$  мм), зависимости построены в пределах принятых диапазонов. Характер изменения наружного давления рабочей среды, вызывающего потерю устойчивости ПМНП, в зависимости от параметров  $n_s$ ,  $\beta$ ,  $h_{ТН}$ ,  $D_0$  в пределах принятых диапазонов (рис. 8) практически не отличаются от характера изменения внутреннего давления.

С учетом проведенных исследований технологических режимов выражения (1) и (2) могут быть преобразованы и записаны в интервальном виде. Таким образом, критическое внутреннее и наружное рабочее давление для изделия в форме пористой трубы из ПМНП в зависимости от количества слоев (толщины стенки) и относительной деформации при радиальном уплотнении проволоочного ТН:

$$p_{\beta} = \sigma_T \cdot \left[ 0,08 + (0,0005 \dots 0,1) \cdot \frac{(1 + 0,04 \cdot n) \cdot n}{(1 - \varepsilon)} \right]; \quad (3)$$

$$p_v = \sigma_{\square} \cdot \left[ (0,005 \dots 0,002) + (0,0005 \dots 0,1) \cdot \frac{(1 + 0,04 \cdot n) \cdot n}{(1 - \varepsilon)} \right]. \quad (4)$$

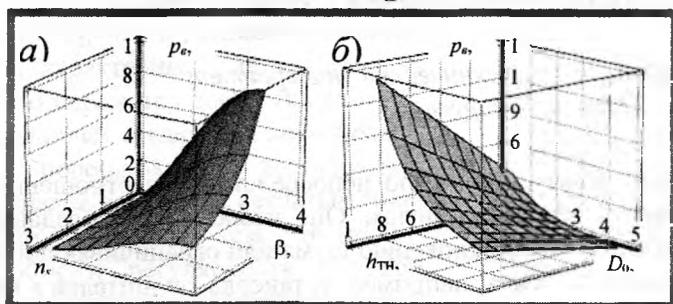


Рис. 7. Характер изменения внутреннего давления рабочей среды на стенку пористой трубы в зависимости от отношения межвиткового зазора к диаметру проволоки и угла намотки (а) и от толщины стенки и внутреннего диаметра трубы (б).

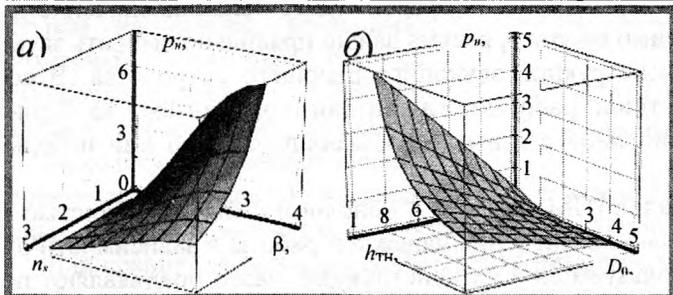


Рис. 8. Характер изменения наружного давления рабочей среды на стенку пористой трубы в зависимости от отношения межвиткового зазора к диаметру проволоки и угла намотки (а) и от толщины стенки и внутреннего диаметра трубы (б).

**Вывод.** С целью повышения механических свойств ПМНП следует: использовать проволоку с более высокими механическими свойствами (пределом текучести компактного материала), увеличить количество слоев, уменьшить внутренний диаметр проницаемого изделия, уменьшить пористость (уменьшить межвитковый зазор, увеличить степень уплотнения). Уменьшение диаметра проволоки, с одной стороны, может привести к снижению прочности и устойчивости изделия, но, с другой стороны, это обеспечивает увеличение количества межвитковых контактов, что сопровождается увеличением количества формирующихся при уплотнении проволочного ТН так называемых узлов сцепления витков и, следовательно, упрочнением структуры ПМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пористые проницаемые материалы: Справочник / Под ред. С.В. Белова.— М.: Металлургия, 1987. — 335 с.
2. Якубовский А., Петюшик Е. 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. Петюшик Е.Е., Реут О.П., Якубовский А.Ч. Основы деформирования проволочных тел намотки. — Мн.: УП «Технопринт», 2003. — 218 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. Расчет усилий и перемещений при упруго-пластическом 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. Серыя фіз.-тэхнічных навук. — 2003. — № 1. — С. 49 – 53.
6. Петюшик Е.Е., Якубовский А.Ч. Оценка прочности проволочной пористой трубы // Машиностроение. — Мн., 2002. — Вып. 18. — С. 456 – 460.