

Безручко Галина Сергеевна, старший научный сотрудник.

E-mail: bezgs@fcr.ac.ru

Острик Афанасий Викторович, профессор, ведущий научный сотрудник.

E-mail: ostrik@fcr.ac.ru

Разренов Сергей Владимирович, профессор, заведующий лабораторией.

E-mail: razsv@fcr.ac.ru

УДК 678.5.046

Исследование рабочих характеристик мембран из армированных фторопластов

К. Ю. ЗЕРЩИКОВ, канд. техн. наук

ООО "Константа-2", г. Волгоград, Россия

Исследована зависимость статической и циклической прочности мембран из армированных фторопластов от их геометрических параметров и физико-механических свойств. Приведены рекомендации по повышению характеристик мембран.

Ключевые слова: мембрана, армированный фторопласт, статическая и усталостная прочность.

Мембраны (диафрагмы) являются одним из классов уплотнений, используемых для разделения сред в химической, энергетической и других отраслях промышленности. В запорной арматуре и насосах они применяются как исполнительные элементы. Силовое воздействие в виде давления или принудительного деформирования, оказываемое внешней средой на мембраны, носит как правило циклический, знакопеременный характер и сопровождается агрессивным действием жидкостей или газов.

Мембраны изготавливают из эластомеров и пластмасс, каждый из материалов имеет свои преимущества и недостатки в виде низкой теплостойкости, недостаточной сопротивляемости химическому и физическому воздействию сред, малой долговечности. Универсальным решением проблем теплостойкости и стойкости к агрессивному действию жидкостей и газов является применение фторопластовых мембран. Однако фторопласт, обладающий уникальной химической стойкостью, имеет высокую жесткость, низкую прочность и

подвержен ползучести под нагрузкой, особенно при повышенных температурах, что обуславливает низкую долговечность и сужает диапазон применения мембран, изготовленных из него. Для решения этой проблемы создаются комбинированные двухслойные резино-фторопластовые мембраны, в которых резиновый слой адгезионно соединен с фторопластовым. За счет снижения жесткости и ползучести достигается большая долговечность, однако этот способ не технологичен и экологически не безопасен.

Создание композиционных материалов на основе полимеров, армированных непрерывными волокнами или тканями, позволяет целенаправленно изменять исходные физико-механические свойства полимеров. Для получения оптимального результата по ресурсу и эксплуатационным характеристикам необходимо определить, в каких направлениях необходимо проводить модификацию.

Рассмотрим схему мембраны (рис. 1). При нагружении полусферического купола в вершине силой P , равной усилию, необходимому для перестановки купола из положения 1 в положение 2, в нем возникает плоское напряженное состояние. Напряжения, действующие в каждом сечении, определяются усилием P и физико-механическими характеристиками материала. В начальный момент купол деформируется упруго (линия ABC), а затем, теряя устойчивость, образует складки-волны (линия ADC), радиус которых можно определить экспериментально.

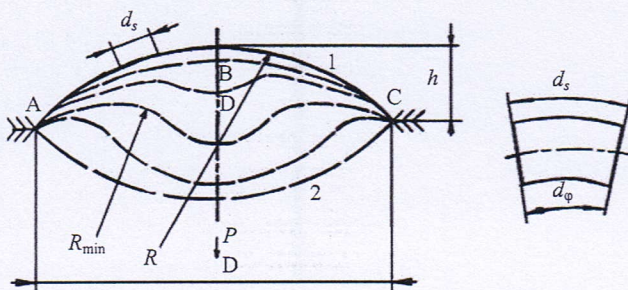


Рис. 1. Схема мембраны

В результате потери устойчивости усилие P падает. Рассмотрим элемент купола d_s , претерпевающий в процессе циклического нагружения многократные изгибные деформации. Неметаллические мембраны не способны воспринимать изгибающие моменты, поэтому напряжения от изгибающих моментов много меньше растягивающих напряжений [1].

Из уравнений механики деформируемых сред следует, что элементарная площадка d_s имеет следующее значение амплитудных деформаций [2]

$$\varepsilon = \delta/2R, \quad (1)$$

где δ и R — толщина и радиус мембраны.

Работоспособность мембран, согласно [1], оценивают по статической и усталостной прочности. Условие статической прочности удовлетворяется в случае, если в процессе нагружения деформации находятся в упругой области, т. е. напряжения не достигают предела текучести. На рис. 2 даны сравнительные диаграммы растяжения неармированного и армированного фторопластов. Из рис. 2 видно, что выполнению условия статической прочности наилучшим образом отвечают мембраны, изготовленные из армированного фторопласта, так как они обладают на порядок более высоким пределом текучести. Это позволяет эксплуатировать мембраны из армированных фторопластов при более высоких параметрах среды (давлениях, температурах).

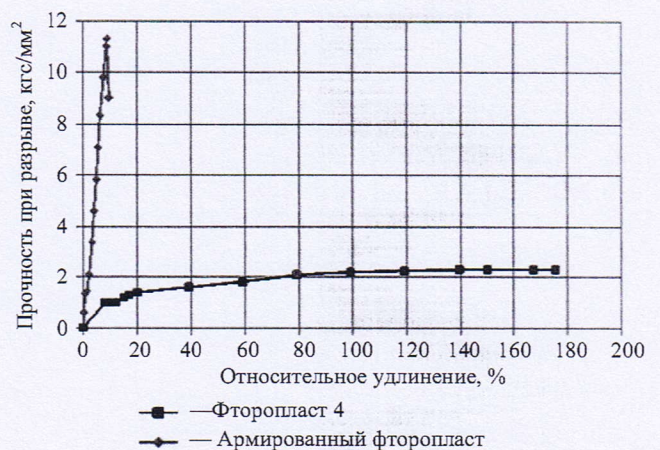


Рис. 2. Диаграммы растяжения неармированного и армированного фторопластов

Зависимость усилия или давления при перестановке купола из положения 1 в положение 2 (см. рис. 1) от величины прогиба называется характеристикой мембраны. Для оценки влияния геометрии и свойств материала мембраны на ее характеристику использовались решения, предложенные в [1]. Сферический тонкостенный купол малого подъема (высоты), выполненный из материала с высоким пределом упругости, называется хлопающей мембраной, для которой справедливо следующее соотношение [1]

$$p(D/2)^4/(E\delta^4) = (4,88 h^2/\delta^2 + 5,87)w/\delta - 7,71h/\delta(w/\delta)^2 + 2,76(w/\delta)^3, \quad (2)$$

где D , h — диаметр и высота мембраны (см. рис. 1);
 E — модуль упругости материала мембраны;
 p — давление, действующее на купол;
 w — текущий прогиб, образующийся в результате действия давления p .

Привод мембран может быть как от давления, действующего на купол для его перестановки, так и при вытягивании или вдавливания за штуцер,

расположенный в вершине купола. Заменяя давление равнодействующей силой, приложенной в вершине купола, получим

$$P(D/2)^2/(\pi E \delta^4) = (4,88 h^2/\delta^2 + 5,87)w/\delta - 7,71h/\delta (w/\delta)^2 + 2,76(w/\delta)^3, \quad (3)$$

где P — сила, приложенная в вершине купола.

При подстановке P вместо p получают несколько заниженные значения прогиба, однако эта разница дает погрешность не более 3%. Экспериментально показано, что замена равномерно распределенного давления на равнодействующую силу, приложенную в вершине мембраны, не изменит характера зависимости усилия или давления при перестановке купола мембраны от величины прогиба, она повлияет лишь на характер деформирования мембраны: вместо мгновенной потери устойчивости и "выщелкивания" наблюдается постепенный переход с образованием складок-волн. И в том, и в другом случае характеристика мембраны однотипна и определяется, согласно [1], соотношением h/δ и величинами E , R и δ .

На рис. 3 представлены рассчитанные по формуле (3) зависимости усилия на штоке P от прогиба w , изображенных на рис. 1 неармированной и армированных мембран различной толщины. Наблюдаемый максимум усилия на кривой определяет изгибную жесткость мембраны. Видно, что рост толщины и модуля упругости сопровождаются ростом усилия P , необходимого для перестановки мембраны из положения 1 в положение 2.

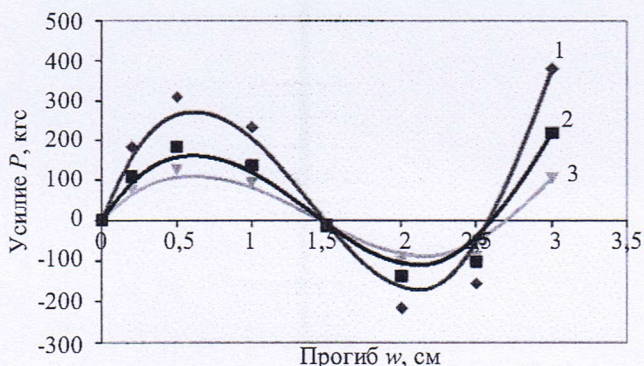
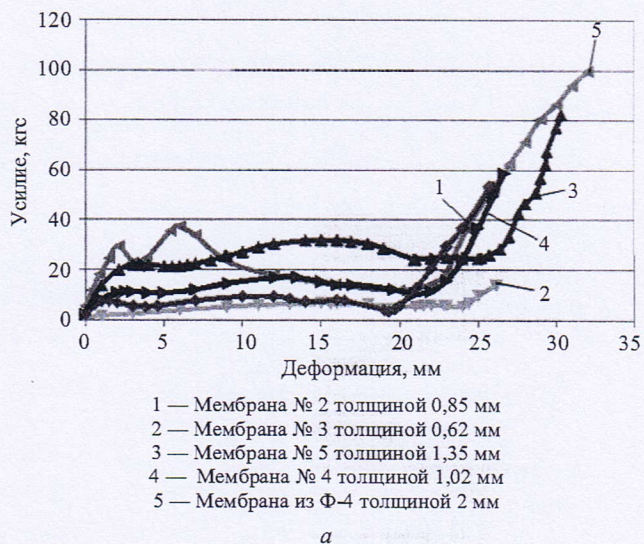


Рис. 3. Расчетная зависимость усилия на штоцере от прогиба (деформации) мембраны:

- 1 — армированный фторопласт $E = 10\ 000$ кгс/см², $\delta = 0,1$ см;
- 2 — армированный фторопласт $E = 10\ 000$ кгс/см², $\delta = 0,06$;
- 3 — фторопласт $E = 2000$ кгс/см², $\delta = 0,2$ см

Экспериментальные исследования зависимости усилий на штоцере от деформации мембраны (рис. 4, а, б) также показали влияние толщины и природы материала на характер и ход кривых. Сравнивая расчетную (кривая 3, рис. 3) и экспериментальную (кривая 5, рис. 4, а) зависимости для фторопластовой мембраны наблюдаем их качественное

соответствие, однако количественно они отличны. Характер зависимости усилий на штоцере мембран из армированного фторопласта несколько иной и существенно отличается от расчетных данных — расчетные значения усилия при перестановке оказываются сильно завышенными.



- 1 — Мембрана № 2 толщиной 0,85 мм
- 2 — Мембрана № 3 толщиной 0,62 мм
- 3 — Мембрана № 5 толщиной 1,35 мм
- 4 — Мембрана № 4 толщиной 1,02 мм
- 5 — Мембрана из Ф-4 толщиной 2 мм

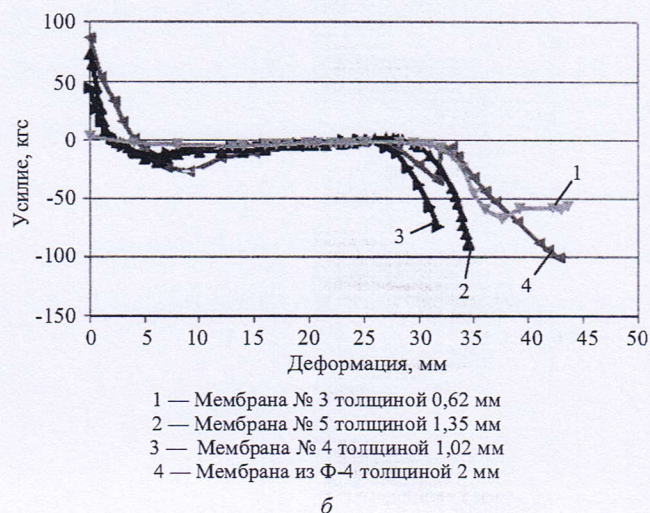


Рис. 4. Экспериментальные зависимости усилия на штоцере от деформации мембраны при движении из положения 1 в положение 2 (а) и обратном ходе из положения 2 в положение 1 (б)

Наблюдаемые различия объясняются неоднородностью и несимметричностью мембран [1]. Кроме того, расчет основывался на предположении о небольшой величине подъема $h < 5\delta$, что не выдержано в рассматриваемом случае. Для выявления основных факторов, приводящих к расхождению значений, необходимо провести дополнительные исследования и согласовать расчетные и экспериментальные данные. Тем не менее, качественное соответствие расчетных и экспериментальных кривых позволяет использовать зависимость (3) на этапе предварительного проектирования.

Проведенный анализ показывает возможность применения теоретических и экспериментальных методов для оценки статической прочности.

Анализ рис. 4 показывает влияние толщины мембраны на усилие и, следовательно, работу, затрачиваемую на перестановку мембраны из положения "открыто" в положение "закрыто" и обратно. Очевидно, что в результате осуществления полного цикла перестановки мембрана рассеивает некоторое количество энергии, тем большее, чем больше усилия, требуемые для ее перестановки. Согласно кинетической теории прочности полимерных материалов, чем больше вносится энергии в материал, тем чаще происходят элементарные акты разрушения и быстрее накапливаются в нем дефекты, тем при меньших значениях внешних нагрузок или их периодичности происходит потеря несущей способности материала. Следовательно, мембраны, имеющие большой гистерезис потерь при перестановках, должны обладать меньшей долговечностью, что и наблюдается на практике.

Усталостную прочность, т. е. количество циклов до разрушения, можно оценить по эмпирической формуле Мэнсона, хорошо описывающей явление малоциклового усталости [3]. Она связывает показатель ресурса с геометрическими и прочностными показателями изделия

$$\delta/2 - 1/2 \ln(1/(1 - \psi))^{0,6} N_p^{-0,6} - 1,75 (\sigma_b - \sigma_w)/E N_p^{-0,12} = 0, \quad (4)$$

где δ — толщина мембраны, мм;

ψ — остаточное сужение $\psi = \lambda/(1 + \lambda)$, где λ — остаточное удлинение при разрыве;

N_p — количество циклов до разрушения;

σ_b — предел прочности материала, МПа;

σ_w — среднее напряжение цикла, которое в силу симметричности цикла принимается равным нулю.

Экспериментальную проверку проводили путем многократных перестановок мембраны, зажатой по периметру, из положения 1 в положение 2 в соответствии с диаграммами, показанными на рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений N_p для серийно производимых мембран из полиэтилена низкого давления (ПЭНД) и фторопласта Ф-4 показало повышенные значения N_p , полученные расчетным путем. Это объясняется тем, что при вычислениях принимали завышенные значения R , равные радиусу сферической поверх-

ности мембраны, т. е. не было учтено влияние образующихся складок-волн с меньшим радиусом. В дальнейших расчетах долговечности использовали определенные экспериментально радиусы складок-волн R_{\min} . Действительно, если подставить в формулу (1) характеристики серийных мембран из фторопласта, то получим $N_p = 100$ циклам, что хорошо согласуется с экспериментально определенным значением долговечности $N_p = 150$ циклам. В результате расчета, проведенного для мембран из армированного термопласта с оптимальной толщиной 1 мм, получено $N_p = 9900$ циклов, экспериментальная проверка показала отсутствие повреждений в мембране после 5000 циклов "открыто—закрыто" [4, 5].

Таким образом, предложенная оценка малоциклового усталости хорошо согласуется с экспериментом и может применяться при разработке конструкций мембран, работающих в особо сложных условиях.

Выводы

1. Предложена методика, позволяющая на этапе проектирования оптимизировать геометрические и физико-механические характеристики мембран по условию статической прочности и качественно оценивать характеристику мембраны.

2. Формула Мэнсона позволяет с достаточной точностью оценить долговечность подвергаемых циклическому нагружению мембран из армированного фторопласта.

3. Применение армированного фторопласта для изготовления мембран технически и экономически оправдано, поскольку позволяет эксплуатировать оборудование на недостижимых ранее параметрах

Литература

1. Феодосьев В. И. Упругие элементы точного приборостроения. — М.: Оборонгиз, 1949. — 343 с.
2. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. — М.: Наука, 1975. — 832 с.
3. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. — М.: Машиностроение, 1974. — 269 с.
4. Голубев А. И., Кондаков Л. А., Гордеев В. В. и др. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. — М.: Машиностроение, 1994. — 464 с.
5. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. — М.: Наука, 1976. — 608 с.

Investigation of characteristics of diaphragms from reinforced fluoroplastics

K. Yu. ZERSCHIKOV

Limited Liability Company "Constanta-2", Volgograd, Russia

The dependence of geometry and mechanical properties of reinforced fluoropolymeric diaphragms on their static or dynamic strength is investigated. The recommendations to increase characteristics of diaphragms are done.

Keywords: diaphragm, reinforced polytetrafluoroethylene, static and fatigue strength.

Зерщиков Константин Юрьевич, директор.

E-mail: vinogradova@constanta-2.ru

УДК 669.017: 541.6

Исследование свойств нанокompозитов на основе полипропилена и углеродных нанотрубок

З. М. ЖИРИКОВА; Г. В. КОЗЛОВ; В. З. АЛОЕВ, д-р хим. наук;
Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная академия, г. Нальчик, Россия

Г. Е. ЗАЙКОВ, д-р хим. наук
Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

Исследовано влияние кольцеобразных структур нанотрубок, образующихся в нанокompозитах на основе полипропилена (ПП) и углеродных нанотрубок (УНТ) на модуль упругости. Отмечено,