

Список литературы

1. Чвалун С.Н., Новокшенова Л.А., Коробко А.П., Бревнов П.Н. Полимер-силикатные нанокompозиты: физико-химические аспекты синтеза полимеризацией *in situ* // Российский химический журнал. 2008. Т. LII. № 5. С. 52–57. 2. Wall L.A. *Factors influencing the behavior of polymers exposed to high-energy radiation* // J. Polym. Sci. 1955. V.17. № 1. P. 141. 3. Grassie N. *Chemistry of Vinyl Polymer Degradation*. Butterworth, London. 1956. 4. Bockhorn H. A. Hornung A., Hornung U., Schawaller D. Kinetic study on the thermal degradation of polypropylene and polyethylene. // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1999. V. 48. No. 2. P. 93. 5. Ballice L, Reimert R. Classification of volatile products from the temperature-programmed pyrolysis of polypropylene (PP), atactic-polypropylene (APP) and thermogravimetrically derived kinetics of pyrolysis // Chemical Engineering and Processing. 2002. V. 41. P. 289. 6. Систер В.Г., Ломакин С.М., Иванникова Е.М. Экологические аспекты снижения горючести полимерных материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 9 (101). С. 156–169. 7. Chan J.H., Balke S.T. The thermal degradation kinetics of polypropylene: Part III. Thermogravimetric analyses // Polymer Degradation and Stability. 1997. V. 57. № 1. P. 135. 8. Gao Z., Kaneko T., Amasaki I., Nakada M. A kinetic study of thermal degradation of polypropylene // Polymer Degradation and Stability. 2003. V. 80. № 2. P. 269. 9. Zanetti M., Lomakin S., Camino G. Polymer layered silicate nanocomposites // Macromol. Mater. Eng. 2000. V. 279. № 1. P. 1. 10. Rakhimkulov A. D., Lomakin S.M., Dubnikova I.L. et al. The effect of multi-walled carbon nanotubes addition on the thermo-oxidative decomposition and flammability of PP/MWCNT nanocomposites // Journal of Materials Science. 2010. 45. (3). P. 633–640. 11. Систер В.Г., Ломакин С.М., Иванникова Е.М. Сравнительный анализ скорости тепловыделения при горении композиции полипропилена с гидроксидом магния и со слоистым силикатом // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 8. С. 50–55. 12. Систер В.Г., Ломакин С.М., Иванникова Е.М. Термические и горючие свойства нанокompозита полиэтилена на основе органически модифицированного слоистого силиката // Наноматериалы и нанотехнологии. 2012. № 1. С. 2–14. 13. Систер В.Г., Ломакин С.М., Иванникова Е.М., Ямчук А.И. Композиции полипропилена с углеродными нанотрубками // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 11. С. 17–24.

**К.Ю. Зерщиков, канд. техн. наук (ООО «Константа-2», г. Волгоград, Россия),
Е.К. Кузахметова (ВолГТУ, г. Волгоград, Россия). E-mail: secret@constanta-2.ru**

Работоспособность мембран из армированного фторопласта

В промышленности применяются запорная арматура и насосы с мембранными исполнительными элементами. Мембраны изготавливаются из эластомеров, армированных эластомеров или пластмасс (в основном из политетрафторэтилена — фторопласта, как наиболее агрессивной полимера, реже из сополимеров политетрафторэтилена). Мембраны подвергаются действию циклического знакопеременного нагружения, а также воздействию давления и агрессивных сред.

Политетрафторэтилен обладает уникальной химической стойкостью и термостойкостью до 250 °С, но присущие ему ползучесть под нагрузкой и низкая прочность обуславливают его применение только при небольших давлениях. Соплимеры политетрафторэтилена более технологичны, однако их невысокая прочность и повышенная жесткость приводят к аналогичным проблемам; кроме того, их

стоимость высока. Эластомерные и эластомерные армированные мембраны в силу высокой эластичности и низкой жесткости имеют большой ресурс, однако из-за невысоких химической стойкости и теплостойкости не применяются в сильно агрессивных средах и при высоких температурах.

Армирование полимеров непрерывными волокнами или тканями материалами обеспечивает значительное увеличение их прочности и снижение ползучести. Поэтому для увеличения ресурса мембран без снижения теплостойкости и химической стойкости предложено изготавливать их из фторопласта, армированного стеклотканью.

Для оценки эффективности предлагаемого решения определены основные факторы, влияющие на работоспособность мембран: статическая прочность и усталостная прочность. Необходимо, чтобы при рабочих перемещениях

деформации мембраны были упругими — это условия статической прочности; а обеспечение прочности в течение всего срока службы оборудования — условия усталостной прочности [1].

Рассматриваемая мембрана представляет собой запорный орган в виде полусферы, снабженной штуцером с резьбой; полусфера зашпунтована по периметру и взаимодействует в положении «закрыто» с седлом, выполненным в форме плоского выступа, расположенного поперек полусферы (рис. 1, а). Рабочий ход мембраны осуществляется путем перестановки полусферы из одного положения в другое посредством вытягивания или вдавливания за штуцер, соединенный с исполнительным элементом.

Предварительный анализ условий работы и характерных мест разрушения (см. рис. 1, б) показал, что основными факторами, определяющими работоспособность мембраны, являются:

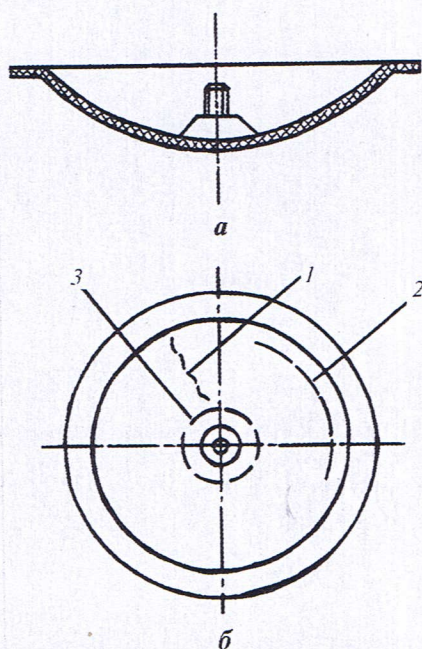


Рис. 1. Общий вид мембраны (а); и характерные места разрушения — пунктирные линии (б)

- физико-механические свойства материала мембраны;
- геометрические характеристики мембраны;
- напряженно-деформированное состояние, возникающее при перестановке из положения «открыто» в положение «закрыто»;
- воздействие давления и агрессивности среды.

Рассмотрим схему работы мембраны (рис. 2). 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. При этом 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. В результате потери устойчивости падает усилие P .

Рассмотрим элемент купола ds , который в процессе циклического нагружения претерпевает многократные изгибные деформации. У немаetalлических мембран не возникает изгибающих моментов, поэтому напряжения от изгибающих моментов много меньше растягивающих напряжений [1]. Уравнения механики деформируемых сред дают для элементарной площадки ds следующее значение амплитудных деформаций [2]:

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

где h , R — толщина и радиус мембраны.

Отсюда следует, что деформации, а значит, и напряжения, возникающие в куполе в процессе перестановок, будут тем меньше, чем меньше его толщина и больше радиус изгиба.

Предлагаемый композит (армированный стеклотканью фторопласт) в большей степени удовлетворяет условию статической прочности: его предел текучести (100 МПа) на порядок выше, чем у фторопласта (10 МПа). Кроме того, за счет более высокой прочности требуемая толщина мембраны меньше, соответственно из формулы (1) следует, что напряжения, возникающие в композиционном материале, ниже.

Усталостную прочность (количество циклов до разрушения)

можно оценить по эмпирической формуле Мэнсона, хорошо описывающей явление малоциклового усталости [3]:

$$h/2 - 0,5 \ln(1/(1 - \psi))^{0,6} N_p^{-0,6} - 1,75(\sigma_B - \sigma_w)/EN_p^{-0,12} = 0, \quad (2)$$

где h — толщина мембраны, мм; $\psi = \lambda/(1 + \lambda)$ — остаточное сужение; λ — остаточное удлинение при разрыве; N_p — количество циклов до разрушения; E , σ_B — модуль упругости и предел прочности материала, МПа; σ_w — среднее напряжение цикла, которое в силу симметричности принимается равным нулю.

Результаты расчетов долговечности по формуле (2), проведенных методом последовательных приближений, представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наиболее значимые параметры мембраны — толщина и радиус.

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений N_p для серийных мембран из полиэтилена низкого давления (ПЭНД) и фторопласта Ф-4 показало завышенные значения N_p . Это объясняется тем, что для расчета принимали завышенные значения R , равные радиусу сферической поверхности мембраны — не было учтено влияние образующихся складок-волн с меньшим радиусом. В дальнейших расчетах долговечности использовали определенные экспериментально радиусы складок-волн R_{min} . Введение экспериментально полученных значений в формулу (2) дает практически одинаковые значения долговечности мембран из ПЭНД: 150 и 100 циклов соответственно. Значения долговечности, рассчитанной для серийно выпускаемых фторопластовых мембран в пределах погрешности, допустимой при

Таблица 1

h , мм	N_p , циклы, при: $R = 100$ мм; $\psi = 0,75$; $\sigma_B = 30$ МПа; $E = 700$ МПа	R , мм	N_p , циклы, при: $\psi = 0,75$; $\sigma_B = 30$ МПа; $E = 700$ МПа; $h = 2$ мм	E , МПа	N_p , циклы, при: $R = 100$ мм; $\psi = 0,75$; $\sigma_B = 30$ МПа; $h = 2$ мм	σ_B , МПа	N_p , циклы, при: $R = 100$ мм; $\psi = 0,75$; $E = 700$ МПа; $h = 2$ мм	ψ	N_p , циклы, при: $R = 100$ мм; $\sigma_B = 30$ МПа; $E = 700$ МПа; $h = 2$ мм
1	$2 \cdot 10^7$	50	1294	350	$2 \cdot 10^7$	20	7531	0,67	79 000
3	5657	100	81 350	700	81 350	30	81 350	0,75	81 000
5	506	200	$2 \cdot 10^7$	1000	9470	40	$7,2 \cdot 10^5$	0,8	83 000

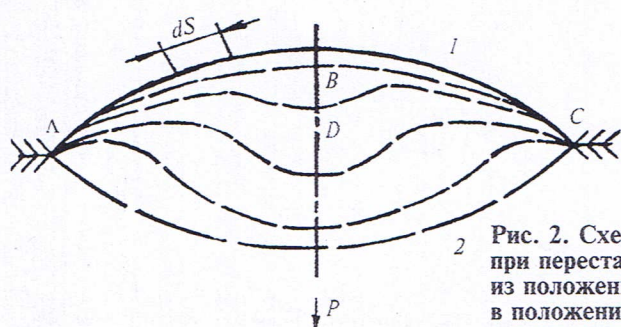


Рис. 2. Схема работы мембраны при перестановке из положения «открыто» (1) в положение «закрыто» (2)

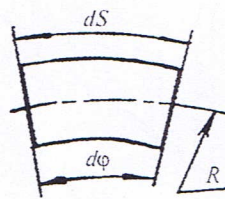
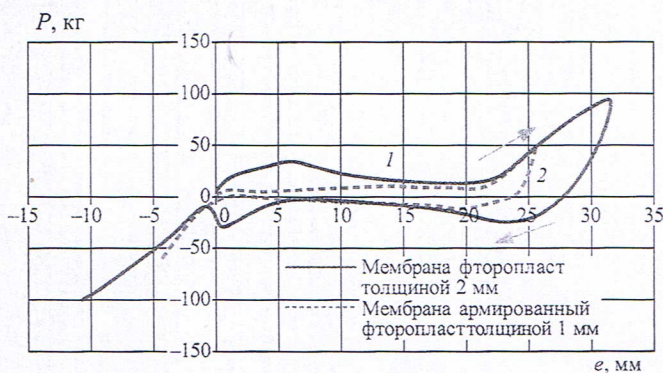


Рис. 3. Усилие перестановки мембраны p при ее перемещении e (стрелками указаны направления перестановки мембраны из положения 1 — «закрыто» в положение 2 — «открыто» и обратно)



инженерных расчетах, совпадают с экспериментальными данными: 556 и 450 соответственно.

Для оценки адекватности заложенных в расчет положений экспериментально исследовали усилие p , требуемое для перестановки мембраны в положениях «открыто-закрыто». На рис. 3 представлены характеристики $p = f(e)$ для мембран различной толщины и из разных материалов (здесь e — перемещение штуцера).

Характерный первый максимум на кривой 1 свидетельствует о величине изгибной жесткости: чем этот максимум больше, тем выше усилие для перестановки из положения 1 в положение 2. У тонких мембран, не обладающих изгибной жесткостью, он отсутствует, и кривая носит иной характер. Видно, что оптимизация характеристик

мембраны приводит к снижению усилия для перестановки в 2 раза, что в свою очередь обеспечивает увеличение долговечности.

Площадь между кривыми прямого и обратного хода представляет собой работу внешних сил, затрачиваемых на перестановку мембраны из одного положения в другое. Соответственно гистерезис потеря показывает рассеянную в материале энергию. Можно предположить, что эта энергия вызывает в том числе локальные акты разрушения, нарушения структуры, которые реализуются затем в явлении малоциклового усталости.

Проведенная проверка показала адекватность расчетной методики, поэтому можно рекомендовать пути повышения долговечности мембран: необходимо уменьшать их толщину, увеличивать радиус складок-волн,

а также применять материалы с невысоким модулем упругости и большим пределом прочности.

Опираясь на полученные закономерности, провели оптимизацию характеристик мембран и выполнили расчет долговечности с учетом известных механических характеристик и экспериментально определенного R_{\min} (табл. 2).

Оптимизация геометрических характеристик и рациональный выбор материалов (см. табл. 2) позволяют обеспечить существенное повышение долговечности. Экспериментальная проверка долговечности при циклическом нагружении показала совпадение расчетных и опытных значений: долговечность армированной мембраны составила не менее 5000 циклов, что свидетельствует о корректности полученных решений.

Выводы

1. Предложена и подтверждена экспериментально возможность использования зависимости Мэнсона для расчета долговечности неметаллических мембран при малоцикловом нагружении.

2. Разработана расчетная методика, позволяющая назначать требуемые конструктивные размеры мембран и обоснованно выбирать оптимальные материалы. За счет армирования достигается увеличение предела текучести материала в 10 раз, устраняется ползучесть под нагрузкой, увеличивается максимальная температура эксплуатации — до 250 °С, давление — до 5 МПа. Повышение прочности позволяет снизить толщину мембраны в 1,5–2 раза, что обеспечивает увеличение ресурса как минимум до 5000 циклов «открыто-закрыто». Таким образом, значительно повышаются рабочие характеристики мембраны без существенного изменения ее стоимости и экономических характеристик.

Таблица 2

Материал	σ_B , МПа	λ , %	E , МПа	Ψ	R_{\min} , мм	N_p , циклы	h , мм
Сверхвысокомолекулярный полиэтилен	30	300	700	0,75	52	1552	1,5
Фторопласт Ф-4 + стеклоткань	120	40	740	0,58	60	9910	1

Список литературы

1. Феодосьев В.И. Упругие элементы точного приборостроения. М.: Оборонгиз. 1949.
2. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. М.: Наука, 1975.
3. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. М.: Машиностроение, 1974.