

# ОЦЕНКА ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРИСТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СВС-ФИЛЬТРАХ

В.В. Евстигнеев, Н.П. Тубалов

Структурно-механическая целостность компактного конечного продукта СВС обусловлена двумя основными факторами. Первым фактором, имеющим внутреннюю природу, является уровень и распределение остаточных механических напряжений, возникающих в процессе синтеза. Другим фактором, привнесенным извне, следует признать уровень действующих механических напряжений вследствие наличия силового поля на стадии эксплуатации изделий из СВС-продукта.

Оба фактора приводят к разрушению синтезированного материала при достижении определенных условий.

С точки зрения обеспечения механической прочности компактного конечного продукта слабейшими звеньями матричной структуры являются образованные при СВС твердые частицы крупных размеров или контактные их поверхности в случае мелкозернистой структуры. Снижению механической прочности также способствуют макро- и микропоры, являющиеся эффективными концентраторами напряжений. Одним из значимых факторов, также ведущих к снижению прочности синтезированного материала, служит наличие напряжений вблизи межфазных границ благодаря различию коэффициентов теплового расширения соприкасающихся фаз [1, 2]. Все эти напряжения носят характер действующих, и они релаксируют в процессе жизни СВС-продукта, приводя к нестабильности механических характеристик во времени.

Уместно остановиться еще на одной группе факторов, обусловленных внутренней природой СВС-продукта. Высокие скорости процесса при значительных градиентах температур и концентраций, вступающих во взаимодействие друг с другом веществ, приводят к метастабильному состоянию конечного продукта. Наряду с резко выраженной гетерофазностью в нем продолжает сохраняться неоднородное распределение концентрации исходных компонентов по объему отдельных фаз, определяющее некогерентность межфазных границ. Все это достаточно эффективно подтверждается экспериментальными наблюдениями за элементами структуры не

только в завершающей стадии, но и на промежуточных этапах СВС, фиксируемых путем принудительного прекращения технологического горения [3]. Наряду с явлением релаксации напряжений, перераспределение концентраций, протекающее еще с меньшей скоростью, поскольку оно определяется диффузионными явлениями, также ответственно за нестабильность механических характеристик продукта при его хранении и эксплуатации.

При существующих технологических схемах другой стороной рассматриваемой проблемы представляется генерация остаточных механических напряжений вследствие усадки и различия в коэффициентах линейного расширения СВС-продукта и технологической оснатики в диапазоне от адиабатической температуры до эксплуатационной (то есть после момента окончания синтеза). В приближении СВС-продукта как однородного тела температурная часть этих напряжений поддается количественному расчету, реализация которого составляет одну из задач настоящего раздела. Другая часть напряжений, вызванных усадочными явлениями, требует для своей оценки постановки специальных исследований.

Рассмотрим поставленную задачу на примере работы цилиндрического фильтроэлемента, изготовленного из пористого проницаемого материала по СВС-технологии.

Принципиально возможны два варианта пропуска фильтруемой среды через фильтроэлемент: со стороны внутренней поверхности под давлением  $P_1$  и с внешней стороны под давлением  $P_2$  (рис. 1). Для простоты будем пренебрегать влиянием торцов, что в реальной обстановке означает использование достаточно длинных фильтроэлементов ( $l/H \gg 1$ ). Введем также безразмерный параметр – отношение внешнего радиуса  $b$  к внутреннему  $a$  ( $M=b/a$ ). Согласно работе [3] радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\sigma_t$  напряжения в функции радиуса толстостенного цилиндра, нагруженного равномерно распределенным по длине внутренним и внешним давлением, могут быть вычислены по формулам:

$$\sigma_r = \frac{P_1 - P_2 \cdot \mu^2}{\mu^2 - 1} - \frac{(P_1 - P_2) \cdot b^2}{\mu^2 - 1} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{P_1 - P_2 \cdot \mu^2}{\mu^2 - 1} + \frac{(P_1 - P_2) \cdot b^2}{\mu^2 - 1} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2)$$

Соответственно радиальные перемещения вычисляются по формуле:

$$U = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{P_1 - P_2 \cdot \mu^2}{\mu^2 - 1} \cdot r + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(P_1 - P_2) \cdot b^2}{\mu^2 - 1} \cdot \frac{1}{r}, \quad (3)$$

где  $\mu$  - коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона);  $E$  - модуль нормальной упругости.

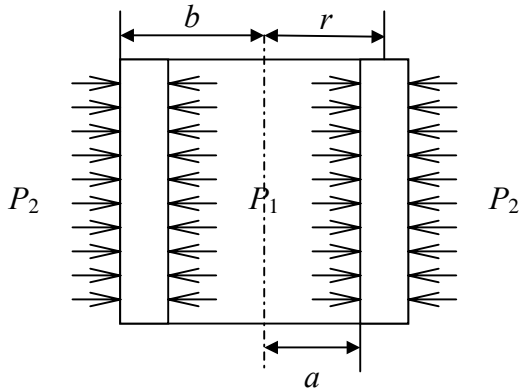
Заметим, что соотношения (2) и (3) инвариантны по отношению к продольной силе. Наличие продольной силы существенно отразится лишь на величине реальных перемещений. Они изменятся на величину:

$$\Delta U = -\mu \cdot \frac{\sigma_t}{E} \cdot r. \quad (4)$$

Рассмотрим случай подачи среды со стороны внутренней поверхности цилиндрического фильтроэлемента. Это соответствует схеме нагружения, когда  $P_1 = P$  и  $P_2 = 0$ . Тогда на внутренней поверхности ( $r = a$ ).

$$(\sigma_r)_{r=a} = -P \quad (5)$$

$$(\sigma_t)_{r=a} = P \frac{1 + \mu^2}{1 - \mu^2} \quad (6)$$



$$(U)_{r=a} = \frac{P_a}{E} \left( \mu + \frac{1 + \mu^2}{1 - \mu^2} \right) \quad (7)$$

Рис. 1. Расчетная схема нагруженного внутренним и внешним давлением цилиндрического элемента

Зависимость тангенциальных напряжений от соотношения внешнего и

внутреннего радиусов фильтроэлементов графически изображена на рисунке 2.

Напряжения и перемещения на наружной поверхности ( $r = b$ ) для этого случая вычисляются по формулам:

$$(\sigma_r)_{r=b} = 0 \quad (8)$$

$$(\sigma_t)_{r=b} = P \frac{r}{\mu^2 - 1} \quad (9)$$

$$(U)_{r=b} = \frac{P_b}{E} \frac{r}{\mu^2 - 1} \quad (10)$$

Параметрическое семейство кривых зависимости тангенциальных напряжений от поперечных размеров фильтроэлемента представлено на рисунке 3.

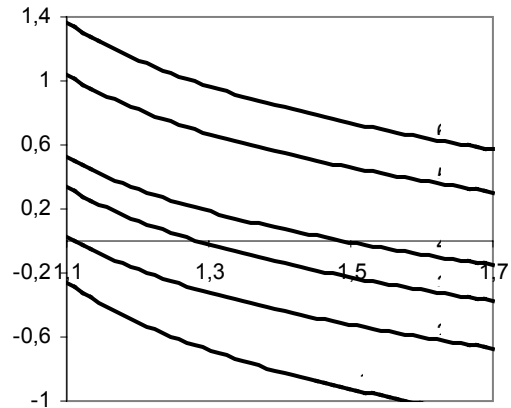


Рис. 2. Зависимость действующих напряжений ( $\lg(\sigma_t)$ , МПа) в цилиндрических изделиях от их размеров (М) при внутренних избыточных давлениях

1 - при внутреннем давлении 0.05 МПа; 2 - 0.1 МПа; 3 - 0.2 МПа; 4 - 0.5 МПа; 5 - 1 МПа; 6 - 2МПа.

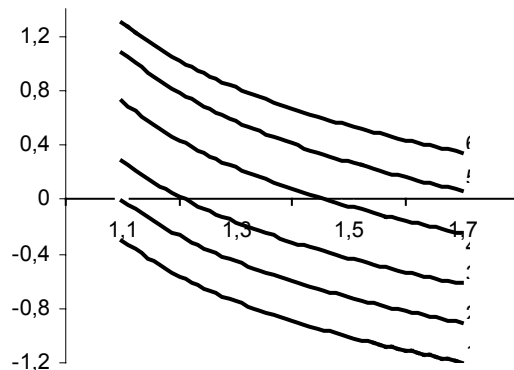


Рис. 3. Зависимость действующих напряжений ( $\lg(\sigma_t)$ , МПа) в цилиндрических изделиях от их размеров (М) при наружных избыточных давлениях

## ОЦЕНКА ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРИСТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СВС-ФИЛЬТРАХ ПРИ ОЧИСТКЕ ГАЗОВЫХ СРЕД

1 – при внутреннем давлении 0.05 МПа; 2 – 0.1 МПа; 3 – 0.2 МПа; 4 – 0.5 МПа; 5 – 1 МПа; 6 – 2 МПа.

На рис. 4 и 5 приведены радиальные распределения радиальных и тангенциальных напряжений по своду фильтроэлемента, специально спроектированного для очистки машинных масел от механических примесей ( $a = 43,5\text{мм}$ ,  $b = 57,5\text{мм}$ ,  $l = 150\text{мм}$ ) по техническому заданию одного из предприятий г. Барнаула. Кривые рассчитаны по уравнениям (11) и (12), соответственно:

$$\sigma_r = \left(1.33 - \frac{44.8}{r^2}\right)P \quad (11)$$

$$\sigma_t = \left(1.33 + \frac{44.8}{r^2}\right)P \quad (12)$$

$$U = \left(1.33 \frac{1-\mu}{E} - \frac{44.8}{r^2} \cdot \frac{1+\mu}{E}\right)P \quad (13)$$

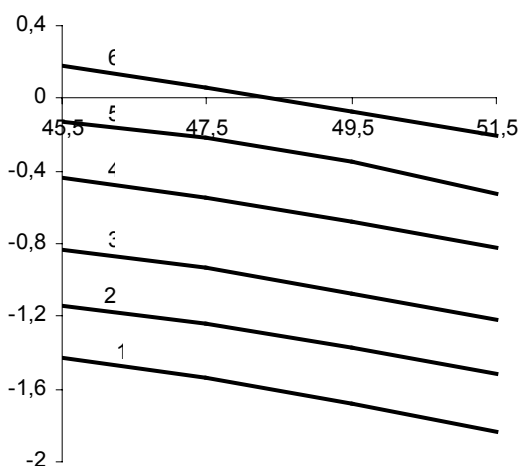


Рис. 4. Распределение радиальных напряжений по своду полого цилиндрического элемента ( $\lg(\sigma_r)$ , МПа) для фильтрации нефтепродуктов при их подаче со стороны внутренней поверхности

1 – при внутреннем давлении 0.05 МПа; 2 – 0.1 МПа; 3 – 0.2 МПа; 4 – 0.5 МПа; 5 – 1 МПа; 6 – 2 МПа.

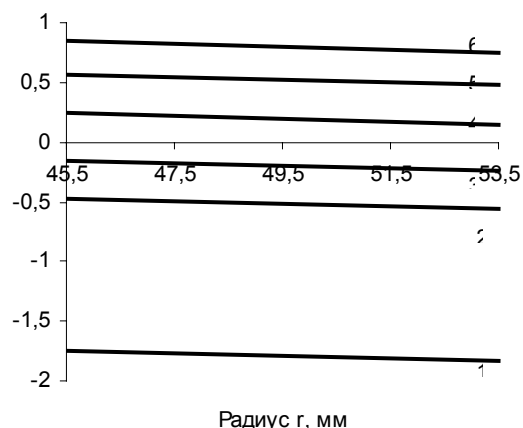


Рис. 5. Распределение тангенциальных напряжений по своду полого цилиндрического элемента ( $\lg(\sigma_t)$ , МПа) для фильтрации нефтепродуктов при их подаче со стороны внутренней поверхности

1 – при внутреннем давлении 0.05 МПа; 2 – 0.1 МПа; 3 – 0.2 МПа; 4 – 0.5 МПа; 5 – 1 МПа; 6 – 2 МПа.

При подаче среды со стороны внешней поверхности ( $P_1=0$ ,  $P_2=P$ ) имеем для внутренней поверхности ( $r = a$ ):

$$(\sigma_r)_{r=a} = 0 \quad (14)$$

$$(\sigma_t)_{r=a} = P \frac{r\mu^2}{\mu^2 - 1} \quad (15)$$

$$(U)_{r=a} = -\frac{P_a}{E} \cdot \frac{r\mu^2}{\mu^2 - 1} \quad (16)$$

Как видно из (15), в этом случае характер напряжений сжатия имеют тангенциальные напряжения. Их зависимость от размеров элемента представлена на рис. 6.

Соответственно для наружной поверхности системы уравнений, определяющая напряженно-деформированное состояние, имеет вид:

$$(\sigma_r)_{r=b} = -P \quad (17)$$

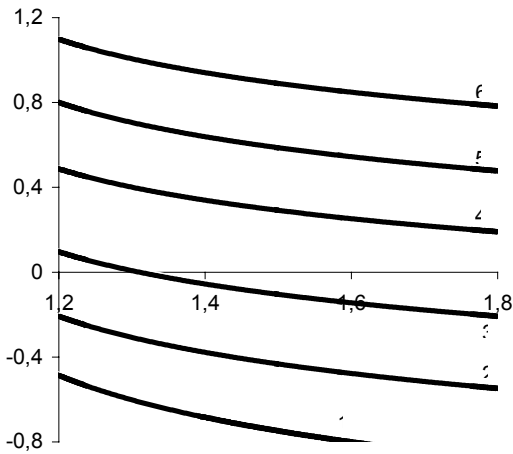


Рис. 6. Зависимость действующих напряжений ( $\lg(\sigma_t)$ , МПа) в цилиндрических изделиях от их размеров (М) при внутренних избыточных давлениях

1 – при внутреннем давлении 0.05 МПа; 2 – 0.1 МПа; 3 – 0.2 МПа; 4 – 0.5 МПа; 5 – 1 МПа; 6 – 2МПа.

$$(\sigma_t)_{r=b} = -p \frac{1+\mu^2}{\mu^2-1} \quad (18)$$

$$(U)_{r=b} = \frac{P_b}{E} \left( \frac{1+\mu^2}{\mu^2-1} - \mu \right) \quad (19)$$

Графический вид зависимости тангенциальных напряжений от соотношения между наружным и внутренним радиусами цилиндрического фильтроэлемента изображены на рисунке 7.

Применительно к примеру уже упомянутого промышленного образца элемента напряженно-деформированное состояние по объему при фильтрации с внешней поверхности запишется в виде:

$$\sigma_r = - \left( 2,34 + \frac{44,26}{r^2} \right) P \quad (20)$$

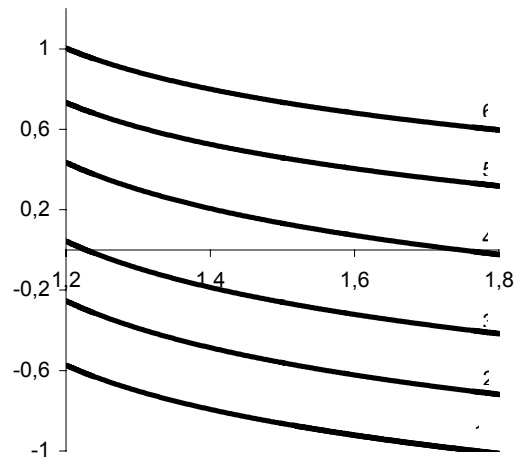


Рис. 7. Зависимость действующих напряжений ( $\lg(\sigma_t)$ , МПа) в цилиндрических изделиях от их размеров (М) при наружных избыточных давлениях

1 – при внутреннем давлении 0.05 МПа; 2 – 0.1 МПа; 3 – 0.2 МПа; 4 – 0.5 МПа; 5 – 1 МПа; 6 – 2МПа.

$$\sigma_t = - \left( 2,34 + \frac{44,26}{r^2} \right) P \quad (21)$$

$$U = \left( 2,34 \frac{1-\mu}{E} \cdot r - \frac{44,26}{r} \cdot \frac{1+\mu}{E} \right) P \quad (22)$$

#### Литература

1. Мержанов А.Г., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез неорганических соединений/ Докл. АН СССР. – 1972. – т.204. – N2. – С. 366-369.
2. Разработка новых видов композиционных материалов с заданным комплексом физико-химических свойств./ Отчет АлтПИ, 1990. – 169с.
3. Итин В.И., Найдбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. – Томск: Изд-во ТГУ, 1989. – 209 с.