

Из вышесказанного следует, что в реальных термосах вода может довольно долго (около 10 часов) оставаться относительно горячей, годной для заварки чая или доширака, однако температура крутого кипятка (~90 °С) держится не больше двух часов, да и то при принятии специальных мер вроде предварительного подогрева термоса. Для преодоления подобных проблем необходимо либо иметь возможность внутреннего электроподогрева, либо пользоваться изоляционными материалами лучшего качества.

#### Список литературы

1 Калашников, А. С. О характере распространения возмущений в задачах нелинейной теплопроводности с поглощением / А. С. Калашников // Журнал вычисл. матем. и матем. физ. – 1974. – Т. 14. – № 4. – С. 891–905.

УДК 539.37

## МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Е. Н. ШИКУЛА

Государственный университет инфраструктуры и технологий, г. Киев, Украина

При достаточно высоком уровне нагрузок многие композитные материалы, применяемые в судостроении, авиастроении и т.п., проявляют нелинейный характер зависимостей между макронапряжениями и макродеформациями вследствие физически нелинейного деформирования компонентов. Такой вид нелинейности характерен для композитов на основе пластической металлической матрицы, а также на основе полимеров при повышенных температурах.

Однако экспериментальные исследования показывают, что при достаточно высоких температурах нелинейно деформируются также высокомодульные материалы типа стекловолокон. На рисунке 1 приведены графики экспериментальной зависимости напряжения от деформации для органического стекла при различных температурах. Как видим, при температуре 80 °С зависимость между напряжением и деформацией имеет параболический характер. Поэтому представляет интерес исследование физически нелинейного деформирования композитных материалов при нелинейном деформировании как матрицы, так и волокон.

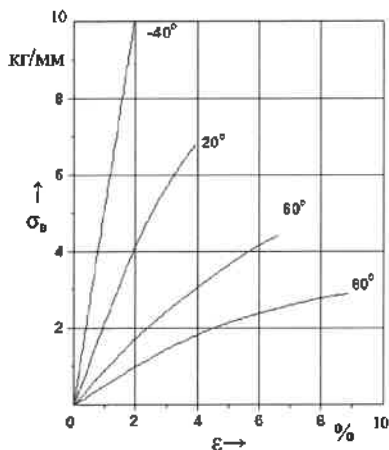


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость напряжения от деформации для органического стекла при различных температурах

Нелинейные волокнистые и слоисто-волокнистые композитные материалы изучались многими авторами. Однако авторы или рассматривали материалы с нелинейной или упругопластической матрицей и упругими волокнами, или применяли упрощенную теорию трансверсально-упругой пластичности. Деформирование волокнистых композитов в случае нелинейного деформирования как связующего, так и волокон было рассмотрено в работах Л. П. Хорошуна, Е. Н. Шикеры. Исследования для слоисто-волокнистого материала с нелинейными компонентами не проводились.

В настоящей работе предложена модель и алгоритм для определения эффективных деформативных свойств и напряженно-деформированного состояния слоисто-волокнистых композитных материалов.

Будем рассматривать слоисто-волокнистые материалы коосуальной намотки, т.е. слоистые материалы, в которых каждый слой представляет собой однонаправленный волокнистый композитный материал, причем возможны два типа слоев с углами ориентации:  $\gamma_1 = \gamma$  и  $\gamma_2 = \gamma$ , при этом объемное содержание слоев с различной ориентацией волокон одинаково, кроме того, одинаковы упругие характеристики и объемные содержания волокон и связующего в слоях с различной ориентацией волокон.

Определение эффективных деформативных характеристик слоисто-волоконистых материалов проводилось в два этапа.

На первом этапе, исходя из значений упругих постоянных для волокон  $K_1, \mu_1$  и связующего  $K_2, \mu_2$  на линейном участке их деформирования, а также заданных в волокнистом материале деформаций  $\epsilon$ , в предположении, что объемные деформации компонентов являются линейными, т.е. модули объемного сжатия  $K_1, K_2$  не зависят от деформаций, а сдвиговые деформации описываются заданными нелинейными диаграммами, т.е. модули сдвига зависят от деформаций в компоненте  $\mu_1 = \mu_1(\epsilon_1), \mu_2 = \mu_2(\epsilon_2)$ , методом условных моментов Л. П. Хорошуна были определены нелинейные деформативные характеристики волокнистого композитного материала  $\lambda_{11}^*, \lambda_{12}^*, \lambda_{13}^*, \lambda_{33}^*, \lambda_{44}^*$ , а также деформации в волокнах  $\epsilon_1$  и связующем  $\epsilon_2$ .

На втором этапе по известным свойствам слоев  $\lambda_{11}^*, \lambda_{12}^*, \lambda_{13}^*, \lambda_{33}^*, \lambda_{44}^*$ , представляющих собой однонаправленный волокнистый материал, и заданным в слоисто-волоконистом материале макродеформациям  $\langle \epsilon \rangle$  методом усреднения были получены характеристики для слоисто-волоконистого композитного материала в целом  $l_{11}^*, l_{22}^*, l_{33}^*, l_{12}^*, l_{13}^*, l_{23}^*, l_{44}^*, l_{55}^*, l_{66}^*$  и определены деформации в слоях  $\epsilon$ .

Таким образом, была получена система нелинейных уравнений относительно деформаций в компонентах материала. Для ее решения был предложен алгоритм, позволяющий по заданным макродеформациям  $\langle \epsilon \rangle$  и деформативным характеристикам для волокон  $K_1, \mu_1 = \mu_1(\epsilon_1)$  и связующего  $K_2, \mu_2 = \mu_2(\epsilon_2)$  определить эффективные деформативные характеристики для слоисто-волоконистого композитного материала, а также изучить деформации в компонентах и слоях. При реализации алгоритма использовалась итерационная схема. В качестве нулевого приближения было выбрано решение для соответствующей линейной задачи.

Было исследовано влияние нелинейности и угла намотки на деформирование композита. Установлено, что нелинейность компонентов и величина угла намотки существенно влияют на эффективные деформативные свойства и напряженно-деформированное состояние слоисто-волоконистых композитов. На рисунках 2 и 3 показаны кривые зависимостей соответственно макронапряжения  $\sigma_{11}$  от макродеформации  $\epsilon_{11}$  и макронапряжения  $\sigma_{22}$  от макродеформации  $\epsilon_{22}$  для разных значений угла намотки  $\gamma$  при различных значениях объемного содержания волокон в материале  $c_1$ .

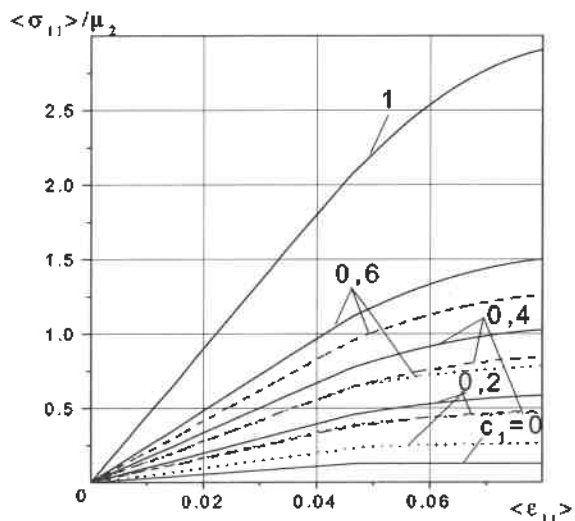


Рисунок 2 – Кривые зависимостей макронапряжения  $\sigma_{11}$  от макродеформации  $\epsilon_{11}$  для разных значений угла намотки  $\gamma$  при различных значениях объемного содержания волокон в материале  $c_1$

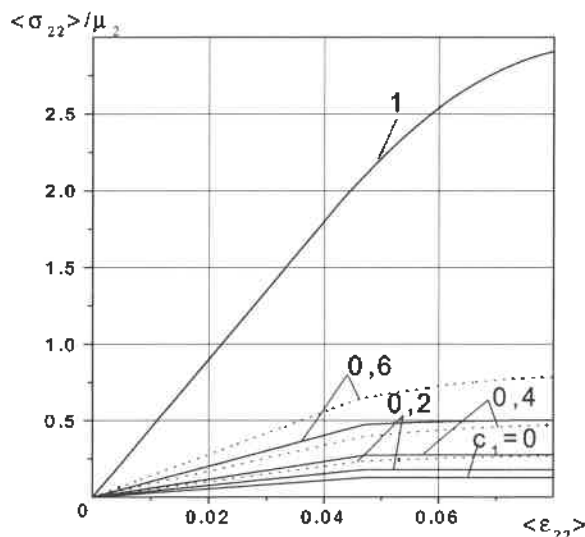


Рисунок 3 – Кривые зависимостей макронапряжения  $\sigma_{22}$  от макродеформации  $\epsilon_{22}$  для разных значений угла намотки  $\gamma$  при различных значениях объемного содержания волокон в материале  $c_1$