

Н. П. Семенюк, **И. Ю. Бабич**, Н. Б. Жукова

**ВЛИЯНИЕ НЕПОЛНОЙ АДГЕЗИИ КОМПОНЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА И УСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ИЗ НАНОКОМПОЗИТОВ**

*Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина;
e-mail: compos@inmech.kiev.ua*

Abstract. An approach is proposed to determination of effective characteristics of nanocomposites with using the known methods of micromechanics. An irregularity of distribution of discrete links between a nanofibers and a polymeric matrix over the fiber perimeter is taken into account. The area with high density of links is modeled by a solid body and with the small number of links is modeled by a discontinuity. The dependence of mechanical characteristics of nanocomposites on the filler volume fraction and the size of incomplete contact area are studied. The features of functioning the materials of such a type are shown on example of stability analysis of cylindrical shells.

Key words: nanocomposites; effective elastic properties; incomplete adhesion of components; methods of micromechanics; stability of cylindrical shell.

Введение.

Разработке методов исследования механических свойств нанокomпозитов посвящены многочисленные работы [8, 9, 17, 18 и др.]. В большинстве из них рассмотрены композиционные материалы, состоящие из полимерной матрицы и наполнителя – углеродных нанотрубок. Диаметр нанотрубок в среднем равняется 2 нм, длина может быть от одного до нескольких десятков мкм. Нанообразование в виде длинных нанотрубок имеет дискретную структуру каркасной формы с молекулами фуллерена, расположенными в углах шести- или пятиугольников.

В работах [3, 4], посвященных разработке основ механики нанокomпозитов, наиболее перспективным принят подход, первым этапом которого является процедура континуализации, в результате которой нанотрубка моделируется линейным упругим изотропным однородным телом с усредненными значениями упругих постоянных. Развита экспериментальные и теоретические методы определения необходимых постоянных – модуля Юнга и коэффициента Пуассона [7, 10 – 12]. Весьма значительный разброс полученных данных свидетельствует о том, что эти методы далеки от совершенства. Если исключить очень высокие и очень малые значения, полученные рядом авторов, то оказывается, что модуль Юнга нанотрубок $E \approx 1$ ТПа. В межфазной зоне атомы нанотрубок и полимерной матрицы взаимодействуют, образуя поперечные связи, вид которых показан на рис. 1, а [9]. На наномасштабном уровне эти связи имеют дискретный характер и различную плотность по периметру сечения нанотрубок.

В работе [4] структурные особенности промежуточных зон рекомендуется в соответствии с традициями механики моделировать некоторыми граничными условиями. При этом следует учитывать, что из-за локальных дефектов на поверхности раздела и начальных напряжений адгезия компонентов неполная. По мнению авторов [4], в связи с неопределенностью структуры граничных условий на геометрической границе раздела является актуальной разработка двусторонних оценок этих условий. Такие оценки можно получить, полагая, в первом случае наличие совершенного контакта

между компонентами, а во втором – полное отсутствие связи между ними, проскальзывание. С применением этих типов граничных условий исследована устойчивость волокнистых композитов [6]. Если использовать результаты микромеханики композитов [1], то можно сузить этот интервал, рассматривая частичную связь компонентов.

Устойчивость конструкций из нанокompозитов может быть рассмотрена при наличии приведенных механических характеристик, полученных с учетом несовершенного контакта компонентов. Для определения этих характеристик воспользуемся методами, предложенными в работах [1, 2]. Исследуя устойчивость слоистых цилиндрических оболочек, получим представление о том, как функционируют нанокompозиты в конструкциях. Ответ на этот вопрос является решающим при создании новых материалов [4].

1. Механические свойства волокнистых композитов с несовершенным контактом слоев.

Рассмотрим материал, состоящий из параллельных цилиндрических включений (волокон) и матрицы, связывающей волокна в единое целое. В работах [1, 2] получены аналитические решения задач статики для волокнистых сред с различными периодическими структурами. Однако в формулах первого приближения эффекты, обусловленные особенностями расположения волокон в поперечном сечении элементарной ячейки, не учитываются. Для учета неравномерной плотности дискретных связей между нановолокном и матрицей в континуальной модели полагаем, что на межфазной границе имеются участки разрыва сплошности – трещины, которые могут быть произвольно расположены по периметру волокна, но имеют одинаковую величину. Чтобы получить выражения для приведенных характеристик такого материала, используем полученное в [1] решение для случая, когда трещины имеют не только одинаковую величину, но и ориентацию. При постановке задачи в [1] принято, что волокнистая среда однородна вдоль волокон.

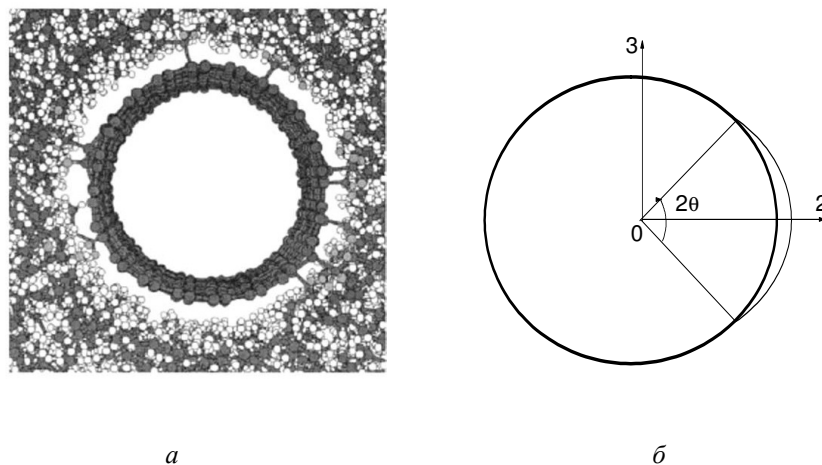


Рис. 1

Пусть оси системы координат расположены так, что ось 1 совпадает с направлением волокон, ось 2 перпендикулярна к волокну и делит трещину с центральным углом 2θ пополам (рис. 1, б); ось 3 – перпендикулярна к плоскости, образованной осями 1 и 2. Волокна и связующее предполагаются изотропными и упругими с модулями Юнга E_a и E , коэффициентами Пуассона ν_a и ν , соответственно. Волокнистая среда с несовершенным контактом подобного вида на макроуровне будет ортотропной с неизвестными 9 независимыми коэффициентами. Соотношения упругости имеют для рассматриваемого композита вид

$$\varepsilon = a\sigma, \quad (1)$$

где $\varepsilon = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{44}, 2\varepsilon_{55}, 2\varepsilon_{66})$, $\sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{44}, \sigma_{55}, \sigma_{66})$ – векторы с компонентами, соответствующими тензорам деформаций и напряжений; a – матрица шестого порядка с ненулевыми коэффициентами

$$a_{11} = \frac{1}{E_1}; \quad a_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_2}; \quad a_{13} = -\frac{\nu_{13}}{E_3}; \quad a_{22} = \frac{1}{E_2}; \quad a_{23} = -\frac{\nu_{23}}{E_3}; \quad a_{33} = \frac{1}{E_3};$$

$$a_{44} = \frac{1}{G_{23}}; \quad a_{55} = \frac{1}{G_{13}}; \quad a_{66} = \frac{1}{G_{23}}; \quad a_{ij} = a_{ji}. \quad (2)$$

При заданных объемном содержании волокон ξ , связующего $\eta = 1 - \xi$, угле раскрытия трещины 2θ технические постоянные в (2) определяются формулами [1]

$$E_1 = \xi E_a + \eta E + \frac{8\xi\eta(\nu_a - \nu)^2 mGG_a}{u_{26}}, \quad \frac{1}{E_2} = \frac{\nu_{21}^2}{E_1} + \frac{1 + \kappa}{4G} \frac{u_{23} - \xi G_a \Omega(\theta)}{u_{24}(\lambda_1) + u_{25}},$$

$$\frac{1}{E_3} = \frac{\nu_{31}^2}{E_1} + \frac{1 + \kappa}{4G} \frac{u_{23} - \xi G_a \mu(\theta)}{u_{24}(\lambda_2) + u_{25}}, \quad G_{12} = G \frac{u_{11} - u_{12}}{u_{22} + u_{12}}, \quad G_{13} = G \frac{u_{11} + u_{12}}{u_{22} - u_{12}},$$

$$G_{23} = G \frac{(1 + \kappa)[1 + \xi\chi(\theta)]G_a + \eta(1 + \kappa_a)G}{(1 + \kappa)[1 - \xi\chi(\theta)]G_a + (1 + \kappa_a)(1 + \xi\kappa)G}, \quad (3)$$

$$\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{21}\nu_{31}}{E_1} +$$

$$+ \frac{1}{2Gu_{24}(\lambda_1)} \left[(1 + \kappa)G_a + (1 + \kappa_a)(1 + \xi\kappa)G - 0,5\xi(1 + \kappa)G_a(\Omega(\theta) + \kappa(1 + 4\beta^2)\sin^2 \theta) \right],$$

$$\nu_{21} \approx \nu_{31} = \nu + \frac{\xi(1 + \kappa)(\nu_a - \nu)mG_a}{u_{26}},$$

где введены обозначения:

$$\kappa = 3 - 4\nu;$$

$$\chi(\theta) = (\cos \theta - 2\beta \sin \theta)e^{-2\beta(\pi - \theta)} - \frac{\sin^4 \theta (1 + 4\beta^2)^2}{4 \left[1 + (\cos \theta + 2\beta \sin \theta)e^{2\beta(\pi - \theta)} \right]};$$

$$m(1 + e^{2\beta\pi}) = 1 + (\cos \theta - 2\beta \sin \theta)e^{2\beta(\pi - \theta)};$$

$$e^{2\beta\pi} = \frac{G + \kappa G_a}{G_a + \kappa_a G}; \quad u_{11} = (1 + \xi \cos \theta)G_a + \eta G; \quad u_{12} = \frac{1}{2} \xi G_a \sin^2 \theta;$$

$$u_{22} = (1 - \xi \cos \theta)G_a + (1 + \xi)G; \quad u_{23} = \kappa G_a + (1 + 2\xi)[G_a + (1 + \kappa_a)G];$$

$$u_{24}(\lambda_1) = (1 + \kappa)[1 + \eta + \xi\lambda_1(\theta)]G_a; \quad u_{25} = 2\eta(1 + \kappa_a)G;$$

$$u_{26} = \xi(1 + \kappa)mG_a + 2\eta(G_a + \kappa_a G) - \eta(1 + \kappa_a)mG;$$

$$\Omega(\theta) = q + m(1 + e^{2\beta\pi}) + 2\kappa(\cos \theta - 2\beta \sin \theta)e^{-2\beta(\pi - \theta)} -$$

$$\begin{aligned}
& -0,5(1+4\beta^2)\left[\kappa+2+\kappa q(1+e^{2\beta\pi})^{-1}\right]\sin^2\theta; \\
4\lambda_{1,2}(\theta) &= 2q+2m(1+e^{2\pi\beta})+4(\cos\theta-2\beta\sin\theta)e^{-2\beta(\pi-\theta)}\pm \\
& \pm(1+4\beta^2)\left[\xi+q(1+e^{2\beta\pi})^{-1}\right]\sin^2\theta; \\
\mu(\theta) &= q+m(1+e^{2\pi\beta})+(1+8\beta^2)\sin^2\theta+2\kappa(\cos\theta-2\beta\sin\theta)e^{-2\beta(\pi-\theta)}+ \\
& +0,5(1+4\beta^2)\left[1+\kappa q(1+e^{2\beta\pi})^{-1}\right]\sin^2\theta; \quad q=(1+\kappa)mG\frac{m(1+e^{2\beta\pi})-(1+4\beta^2)\sin^2\theta}{2(G_a+\kappa_a G)-(1+\kappa_a)mG}.
\end{aligned}$$

В выражении $\chi(\theta)$ при $\theta = \pi$ (полное отслоение) во втором слагаемом знаменатель обращается в нуль. Однако, учитывая то, что $\sin^4\theta$ при $\theta \rightarrow \pi$ будет малой величиной более высокого порядка, второе слагаемое следует положить равным нулю.

Формулы (3) получены для случая симметричного относительно осей координат размещения на поверхности волокна областей несовершенного контакта компонентов. Обобщение этого варианта формул для расчета приведенных характеристик при произвольном размещении разрывов сплошности можно получить, проведя их перерасчет относительно системы координат, которая повернута вокруг оси 1 на некоторый угол α . В новой системе координат армированный волокнами материал будет иметь только одну плоскость упругой симметрии, перпендикулярную к направлению волокон. Вместо соотношений (1) будем иметь равенство

$$\varepsilon' = a' \sigma', \quad (4)$$

где не равные нулю коэффициенты матрицы a' определяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} a_{11}' \\ a_{12}' \\ a_{13}' \\ a_{14}' \\ a_{22}' \\ a_{23}' \\ a_{24}' \\ a_{33}' \\ a_{34}' \\ a_{44}' \\ a_{55}' \\ a_{56}' \\ a_{66}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & u_2 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & -u_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -u_2 & 0 & 0 \\ u_3 & u_4 & 0 & u_5 & 0 \\ u_6 & 0 & 0 & u_5 & 0 \\ 0 & 0 & -u_4 & 0 & -2u_5 \\ u_3 & -u_4 & 0 & u_5 & 0 \\ 0 & 0 & -u_4 & 0 & 2u_5 \\ u_7 & 0 & 0 & -u_5 & 0 \\ u_8 & u_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_9 & 0 & 0 \\ u_8 & -u_9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \\ \cos 4\alpha \\ \sin 4\alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Используемые в (5) константы u_i вычислим на основе формул

$$u_1 = \frac{1}{2}(a_{12} + a_{13}); \quad u_2 = \frac{1}{2}(a_{12} - a_{13}); \quad u_3 = \frac{1}{8}(3a_{22} + 2a_{23} + 3a_{33} + a_{44});$$

$$u_4 = \frac{1}{2}(a_{22} - a_{33}); \quad u_5 = \frac{1}{8}(a_{22} - 2a_{23} + a_{33} - a_{44});$$

$$u_6 = \frac{1}{8}(a_{22} + 6a_{23} + a_{33} - a_{44}); \quad u_7 = \frac{1}{2}(a_{22} - 2a_{23} + a_{33} + a_{44}); \quad (6)$$

$$u_8 = \frac{1}{2}(a_{55} + a_{66}); \quad u_9 = \frac{1}{2}(a_{55} - a_{66}).$$

Отметим, что в [1] также рассмотрен случай произвольного расположения трещин. Часть формул этой работы совпадает с приведенными выше, другие имеют вид, который сложно использовать при расчетах. В реальных композитах с несовершенным контактом компонентов значения углов α изменяются от 0 до π . Если в представительном объеме материала распределение значений α стохастически равномерно по всем волокнам, заключенным в этот объем, то усредненные деформации и напряжения не будут зависеть от направления осей 2 и 3. Армированный материал на макроуровне будет трансверсально-изотропным, так как плоскость, перпендикулярная к волокнам, изотропна. Усредненные значения упругих констант a_{ij} будут равны величинам, представленным в первом столбце матрицы в соотношении (5). Среди них всего 5 независимых, так как $\dot{a}_{12} = \dot{a}_{13}$, $\dot{a}_{22} = \dot{a}_{33}$, $\dot{a}_{55} = \dot{a}_{66}$, $\dot{a}_{22} - \dot{a}_{23} = \frac{1}{2}\dot{a}_{44}$. Для трансверсально-изотропного тела соотношения (1) запишем в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= b_{11}\varepsilon_{11} + b_{12}\varepsilon_{22} + b_{13}\varepsilon_{33}; \quad \sigma_{22} = b_{12}\varepsilon_{11} + b_{22}\varepsilon_{22} + b_{23}\varepsilon_{33}, \\ \sigma_{33} &= b_{12}\varepsilon_{11} + b_{23}\varepsilon_{22} + b_{22}\varepsilon_{33}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sigma_{23} = 2b_{44}\varepsilon_{23}; \quad \sigma_{13} = 2b_{55}\varepsilon_{13}; \quad \sigma_{12} = 2b_{66}\varepsilon_{12},$$

где принято:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{\dot{a}_{22} + \dot{a}_{23}}{\Delta}; \quad b_{12} = -\frac{\dot{a}_{12}}{\Delta}; \quad b_{22} = \frac{\dot{a}_{11}\dot{a}_{22} - (\dot{a}_{12})^2}{(\dot{a}_{22} - \dot{a}_{23})\Delta}; \\ b_{23} &= -\frac{\dot{a}_{11}\dot{a}_{22} - (\dot{a}_{12})^2}{(\dot{a}_{22} - \dot{a}_{23})\Delta}; \quad \Delta = \dot{a}_{11}\dot{a}_{22} + \dot{a}_{11}\dot{a}_{23} - 2(\dot{a}_{12})^2; \end{aligned} \quad (8)$$

$$b_{44} = \frac{1}{\dot{a}_{44}}; \quad b_{55} = \frac{1}{\dot{a}_{55}}; \quad b_{66} = \frac{1}{\dot{a}_{66}}; \quad b_{22} - b_{23} = 2b_{44}.$$

В работе [5] соотношения (7) положены в основу подхода, позволяющего получить усредненные характеристики армированного тела с произвольной ориентацией волокон. При вращении оси 1, направленной вдоль волокон, относительно фиксированной оси x_i' и задании деформации в направлении оси 3', установлено, что средние значения $\sigma_{ij}' / \varepsilon_{33}'$ в направлении волокон определяются согласно выражениям

$$\left. \frac{\sigma_{33}'}{\varepsilon_{33}'} \right|_{cp} = \frac{1}{15}(3b_{11} + 4b_{12} + 8b_{22} + 8b_{66});$$

$$\frac{\sigma'_{22}}{\varepsilon_{33}} \Big|_{cp} = \frac{1}{15} (b_{11} + 8b_{12} + b_{22} - 8b_{66} + 5b_{23}). \quad (9)$$

Так как тело с произвольной ориентацией волокон на макроуровне является изотропным, то с учетом равенств правых частей первого уравнения (9) величине $\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, а второго – $\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, определим

$$E = (2b_{11} + 7b_{22} - 5b_{23} - 4b_{12} + 12b_{66})(b_{11} + 2b_{22} + 2b_{23} + 4b_{12}) / D; \quad (10)$$

$$\nu = 3(b_{11} + b_{22} + 5b_{23} + 8b_{12} - 4b_{66}) / D;$$

$$D = 3(4b_{11} + 9b_{22} + 5b_{23} + 12b_{12} + 4b_{66}).$$

Подобное решение получено в [5] для изотропной среды, эквивалентной композиционной, полученной хаотическим армированием матрицы длинными волокнами. Отличительной особенностью формул (10) является то, что при их выводе учитывается несовершенный контакт компонентов. Эти формулы применимы также в случае волокон конечной длины. Если отношение длины волокон к диаметру достаточно большое, то, как следует из результатов работы [5], влиянием эффектов у концов волокон можно пренебречь.

2. Влияние структуры и несовершенного контакта компонентов на механические свойства композитов, состоящих из полимерной матрицы и нанотрубок в качестве наполнителя.

Механические свойства матрицы примем соответствующими эпоксидной смоле, для которой модуль упругости $E = 0,315 \times 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,382$ [1]. Значения модуля упругости нанотрубок и коэффициента Пуассона могут изменяться в широких пределах [8]. Используя данные работы [8], положим $E = 1,127$ ТПа, $\nu = 0,19$. Рассмотрим два варианта нанокompозитов. В первом варианте примем, что длинные нанотрубки распределены в матрице равномерно (вид упаковки не учитывается) и параллельно некоторому направлению. Области несовершенного контакта матрицы и нанотрубок распределены так, что на макроуровне композит можно рассматривать как трансверсально-изотропное тело с плоскостью изотропии, перпендикулярной направлению волокон. Во втором варианте полагаем, что распределение трубок также равномерное, но направлены они могут быть произвольно с равной вероятностью по отношению к осям трехмерной системы координат. На макроуровне такой материал будет изотропным [5]. На рис. 2 – 6 представлены в виде графиков результаты расчета приведенных характеристик для указанных двух вариантов нанокompозитов. Кривые 1, 2 на рис. 2 иллюстрируют зависимость E_2 / E от величины угла θ при объемном содержании наполнителя $\xi = 0,35$ и $\xi = 0,7$. Видно, что при $\xi = 0,7$ модуль E_2 больше, чем при $\xi = 0,35$, но только до $\theta = 67^\circ$. Если же область разрыва сплошности становится такой, что $\theta > 67^\circ$, то $E_2|_{\xi=0,7} < E_2|_{\xi=0,35}$. При пересечении кривых будет $E_2 = E$ в обоих случаях. Такие же зависимости для G_{12} / G и

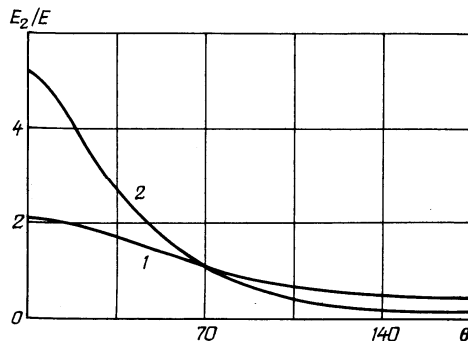


Рис. 2

таких же зависимостей для G_{12} / G и

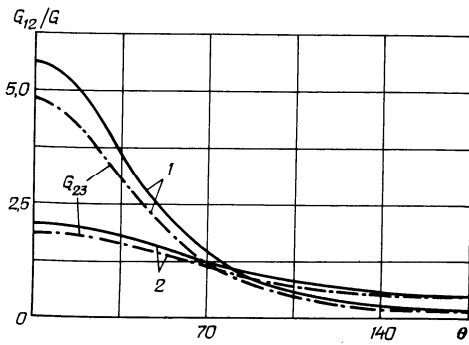


Рис. 3

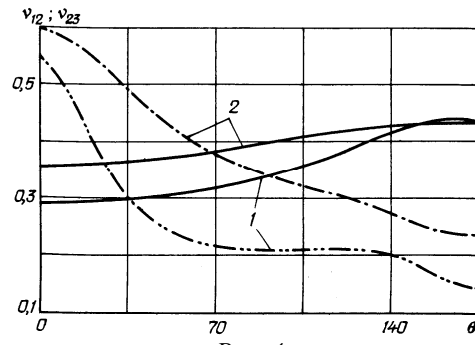


Рис. 4

G_{23} / G представлены на рис. 3. Сплошные кривые 1, 2 – это функции $G_{12}(\theta) / G$, а штрих-пунктирные – $G_{23}(\theta) / G$. Пересечение кривых 1 и 2 имеет место при $\theta = 78^\circ$, когда $G_{ij} = G$. Если же $\theta > 78^\circ$, то значения обоих модулей сдвига становятся меньше модуля сдвига связующего, причем более заметно при $\xi = 0,7$.

Влияние несовершенного контакта компонентов на коэффициенты Пуассона ν_{21} и ν_{23} показано на рис. 4 кривыми 1, 2 при $\xi = 0,35$ и $\xi = 0,7$, соответственно. Сплошные кривые вычислены для коэффициента ν_{21} , штрих-пунктирные – для коэффициента ν_{23} . Наблюдается возрастание коэффициента ν_{21} как при $\xi = 0,35$, так и при $\xi = 0,7$, и уменьшение коэффициента ν_{23} . Так как модуль E_1 практически от величины угла θ не зависит (слагаемое $E_a \xi$ в формуле (3) существенно превосходит все остальные), то вследствие равенства $\nu_{21} E_2 = \nu_{12} E_1$ неизменным будет также коэффициент ν_{12} .

Незначительная зависимость модуля E_1 от величины угла θ отражается на модуле E_{np} произвольно армированного композита. На рис. 5 приведены данные об изменении этого модуля при возрастании области несовершенного контакта связующего и наполнителя. Значения отношения $E_{np}(\theta) / E_{np}(0)$ при $\xi = 0,35$ (1) и $\xi = 0,7$ (2) уменьшаются с возрастанием угла θ , причем, более заметно при $\xi = 0,7$. Однако в обоих случаях это отношение не меньше 0,9. При тех же объемных содержаниях наполнителя зависимости коэффициента Пуассона иллюстрируют кривые на рис. 6. Представляет интерес более детальное изучение зависимости характеристик E_{np} и ν_{np} при малых объемных содержаниях нанотрубок и предельных значениях угла θ . На рис. 7 приведены графики зависимости $E_{np}(\xi) / E$ при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$. Кривые

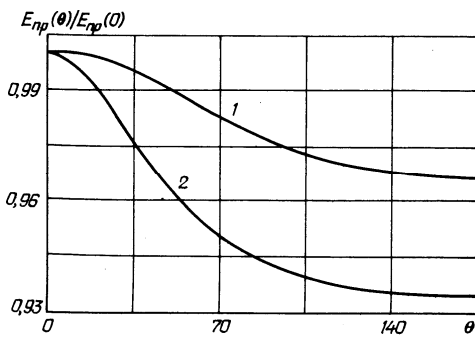


Рис. 5

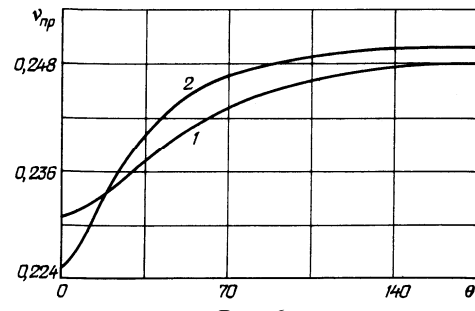


Рис. 6

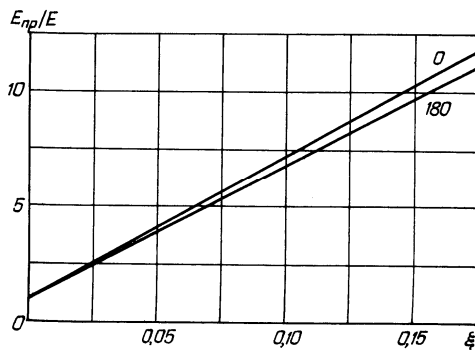


Рис. 7

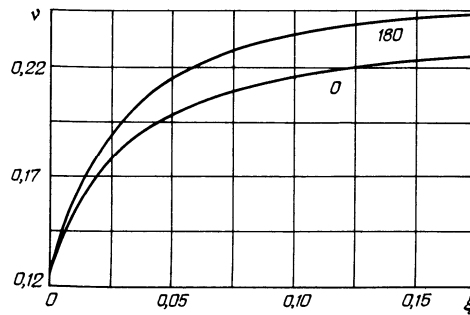


Рис. 8

(0) и (180) отличаются незначительно. При содержании наполнителя $\xi = 0,01$ отношение $E_{np}(\xi)/E = 1,63$, когда $\theta = 0^\circ$ и $E_{np}(\xi)/E = 1,60$, когда $\theta = 180^\circ$. Соответственно, при $\xi = 0,02$ получаем: $E_{np}(\xi)/E = 2,25$ и $E_{np}(\xi)/E = 2,17$.

Как видим, наполнение полимерного связующего нанотрубками порядка 1 – 2% по объему приводит к увеличению модуля Юнга изотропного композита в 1,5 – 2 раза. Это можно использовать для создания высокомодульных связующих при производстве композитов, армированных обычными волокнами или однонаправленными наночастицами.

Полученный результат согласуется с известными данными [11]. При произвольной ориентации волокон влияние типа граничных условий на межфазных поверхностях несущественно влияет на приведенные характеристики материала. Этот вывод подтверждается также графиками $\nu_{np}(\xi)$ при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$, приведенными на рис. 8.

3. Устойчивость цилиндрических оболочек из нанокомпозитов.

Используем полученные результаты для исследования устойчивости оболочек, изготовленных из материалов со свойствами, которые соответствуют представленным на рис. 2 – 8. Основные соотношения теории и методика расчета изотропных оболочек изложены в работах [13 – 16]. Методика позволяет рассматривать оболочки с различными вариантами укладки слоев (не только продольно-поперечную), с разным их количеством, а в совокупности с изложенной выше процедурой определения приведенных механических характеристик исследовать зависимость критических нагрузок от степени совершенства адгезии между компонентами, а также указать варианты армирования, позволяющие уменьшить негативный характер влияния структурных несовершенств. При этом появляется возможность улучшить функционирование нанокомпозитов в конструкциях.

Исследуем устойчивость цилиндрических оболочек с отношением длины к радиусу $L/R = 2$, толщины к радиусу $t/R = 0,01$. На рис. 9 представлены результаты расчета критических значений интенсивности внешнего давления q для оболочек из нанокомпозитов,

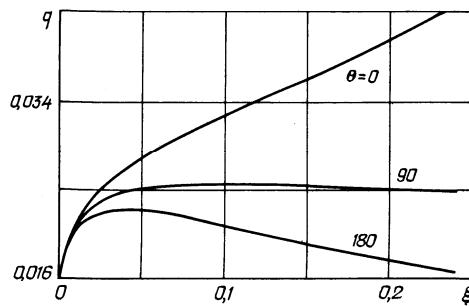


Рис. 9

компонентами которых являются эпоксидное связующее и нановолокна с указанными выше механическими свойствами. Кривые (рис. 9) описывают зависимость $q(\xi)$ при отсутствии областей разрыва сплошности ($\theta = 0^\circ$), когда область разрыва охватывает половину периметра поперечного сечения волокна ($\theta = 90^\circ$) и при полном отсутствии адгезии на поверхности кон-

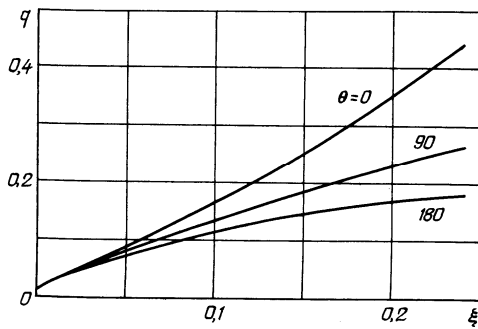


Рис. 10

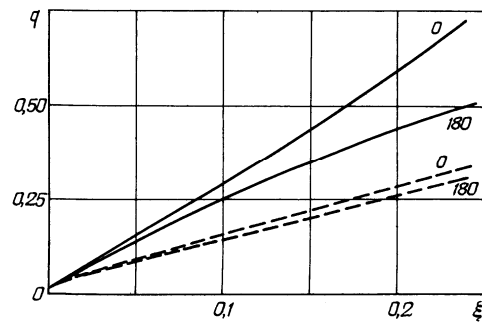


Рис. 11

такта ($\theta = 180^\circ$). Как и следовало ожидать, при совершенном контакте критические нагрузки возрастают с увеличением содержания наполнителя ξ ; при $\theta = 90^\circ$ возрастание наблюдается только до $\xi = 0,07$, а при отсутствии поверхностной адгезии возрастание имеет место только на начальном участке кривой до $\xi = 0,04$. При наличии развитого расслоения увеличение параметра ξ приводит к уменьшению критических нагрузок.

Кривые на рис. 10 описывают зависимость $q(\xi)$ для оболочек, изготовленных из нанокompозита при произвольном распределении направлений армирования. Обозначения соответствуют рис. 9. Такой композит на макроуровне является изотропным. Критические нагрузки для оболочек из указанного типа композита выше, чем армированного в осевом направлении. Влияние несовершенного контакта компонентов в рассматриваемом диапазоне параметра ξ значительно меньше.

Как известно, весьма существенное значение для повышения устойчивости оболочек имеет рациональное распределение композита по слоям. На рис. 11 и 12 показаны графики зависимости критического давления $q(\xi)$ для четырехслойной оболочки с укладкой слоев под углами $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ при совершенной адгезии компонентов ($\theta = 0^\circ$) и при полном отслоении ($\theta = 180^\circ$).

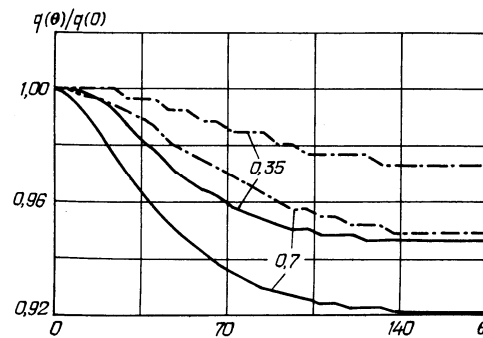


Рис. 12

Сплошные кривые вычислены для оболочек из нанокompозитов, связующее у которых – исходная эпоксидная смола, пунктирные – связующее наполнено произвольно распределенными нановолокнами. Как видно, в рассматриваемом случае армирования влияние несовершенного контакта компонентов незначительно, хотя оно несколько больше при армированном связующем. В отличие от предыдущих данных (рис. 10, 11), на рис. 12 приведены кривые, описывающие зависимость $q(\theta)$ при $\xi = 0,35$ и $\xi = 0,7$. По оси ординат отложены значения отношения $q(\theta)/q(0)$. Сплошные кривые получены для оболочки из 4-х трансверсально-изотропных слоев, штрих-пунктирные – для приведенных изотропных слоев. Хотя для анизотропных оболочек критические нагрузки $q(0)|_{\xi=0,35} = 0,42\text{МПа}$, $q(0)|_{\xi=0,7} = 0,87\text{МПа}$ выше, чем для изотропных $q(0)|_{\xi=0,35} = 0,35\text{МПа}$, $q(0)|_{\xi=0,7} = 0,65\text{МПа}$, степень влияния неполной адгезии слоев оказывает более существенное влияние на критические нагрузки для первого типа оболочек, чем для второго.

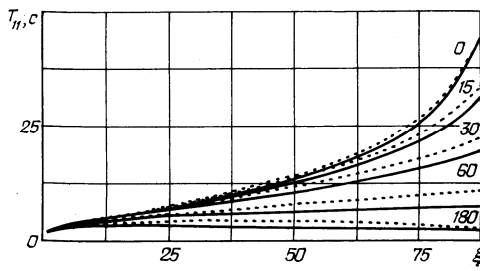


Рис. 13

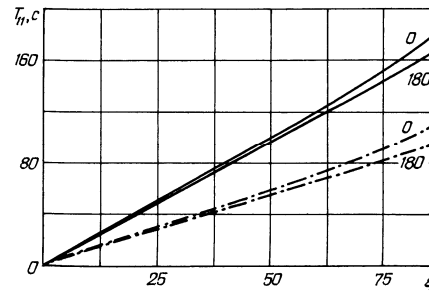


Рис. 14

Исследована также устойчивость ряда оболочек из нанокомпозитов при осевом сжатии. Полученные результаты представлены в виде графиков на рис. 13, 14. На первом из них изображены кривые (сплошные – для однослойной оболочки, пунктирные – для двухслойной с продольно-поперечной укладкой волокон) в системе координат «содержание наполнителя ξ – значение критического усилия $T_{11,c}$ » при углах $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 180^\circ$. Наблюдается существенное снижение усилий $T_{11,c}$ при возрастании размеров площадей несовершенного контакта компонентов. При $\theta > 60^\circ$ увеличение содержания волокон может быть не только бесполезным, но и приводить к обратному эффекту. Однако, при осевом сжатии также можно находить рациональные варианты армирования, вследствие чего уменьшается отрицательное влияние рассматриваемого структурного дефекта. Об этом свидетельствуют кривые на рис. 14 (обозначения соответствуют рис. 13). Сплошные кривые вычислены для 16-ти слойной оболочки с четырьмя повторяющимися пакетами $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ при углах $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$. Различие между кривыми 0° и 180° – незначительное. Штрихпунктирные кривые дают представление об устойчивости изотропных оболочек с приведенными модулем E_{np} и коэффициентом Пуассона ν_{np} . Влияние несовершенного контакта компонентов композита здесь также небольшое. Критические нагрузки для 16-слойной оболочки существенно выше, чем для изотропной.

Заключительные замечания. Выводы.

1. В предположении справедливости положений подхода, предложенного в [1], разработана методика расчета приведенных характеристик нанокомпозита, состоящего из полимерного связующего и длинных выпрямленных нанотрубок или нановолокон. Особенностью методики является учет неполной адгезии компонентов, присущей нанокомпозитам в большей степени, чем обычным композитам. При этом используются известные в микромеханике волокнистых материалов решения [1].

2. Показано, что формулы первого приближения, установленные в [1] для произвольного по периметру волокна расположения областей несовершенного контакта, совпадают с теми, которые получены при повороте системы координат. Последние удобно использовать при усреднении характеристик в случае случайного распределения рассматриваемых несовершенств.

3. При произвольном распределении длинных нановолокон материал на макроуровне будет изотропным, приведенные характеристики которого – модуль Юнга и коэффициент Пуассона – можно определить путем вычислений согласно [5]. В данном варианте при этом учитывается влияние на эти характеристики неполной адгезии компонентов.

4. Анализ зависимостей модулей однонаправленного композита от величины объемного содержания нановолокон ξ свидетельствует, что продольный модуль практически пропорционален параметру ξ , поперечный модуль и модули продольного и поперечного сдвига увеличиваются с ростом ξ только при отсутствии или наличии незначительных расслоений на межфазной границе. Если разрыв сплошности охватывает больше трети периметра волокна, то увеличение содержания волокон оказывает обратный эффект – они уменьшаются. Произвольно армированный композит реагиру-

ет на наличие разрывов сплошности в меньшей степени. Частично этот эффект зависит от используемой расчетной модели, согласно которой волокна воспринимают нагрузку, одинаковую в любом направлении.

5. Отличительные особенности поведения материалов отражаются на реакции оболочек, изготовленных из волокнистых нанокомпозитов, подверженных действию сжимающих нагрузок. Исследование устойчивости цилиндрических оболочек из нанокомпозитов показало, что они могут быть весьма эффективны только при рациональных вариантах армирования. Следует отметить, что в этом случае критические нагрузки оболочек, материал которых не имеет дефектов в межфазной области, и оболочек из материалов при отсутствии адгезии между компонентами, отличаются незначительно. При рациональном армировании для определения критических нагрузок реальных оболочек с неизвестным характером межфазной адгезии можно использовать предложенный в работе [4] способ двухсторонних оценок.

Р Е З Ю М Е . Запропоновано підхід до визначення ефективних характеристик нанокомпозитів з використанням відомих методів мікромеханіки. Враховано нерівномірність розподілу дискретних зв'язків між нановолокном та полімерною матрицею по периметру волокна. Область з високою щільністю зв'язків моделюється суцільним тілом, а з малою кількістю зв'язків – розривом суцільності. Досліджено залежність механічних характеристик нанокомпозитів від об'ємного вмісту наповнювача та розмірів області несущого контакту. Особливості функціонування матеріалів такого типу в конструкціях показано на прикладі розрахунку циліндричних оболонок на стійкість.

1. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с.
2. Ванин Г.А., Семенюк Н.П. Устойчивость оболочек из композиционных материалов с несовершенствами. – К.: Наук. думка, 1987. – 200 с.
3. Гузь А.Н., Руцицкий Я.Я. Наноматериалы. О механике наноматериалов // Прикл. механика. – 2003. – **39**, № 11. – С. 36 – 58.
4. Гузь А.Н., Руцицкий Я.Я., Гузь И.А. О построении основ механики нанокомпозитов // Прикл. механика. – 2007. – **43**, № 3. – С. 3 – 36.
5. Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
6. Механика композитов: В 12-ти т. / Под общ. ред. А.Н.Гузя. – К.: Наук. думка (т.1 – 4), «АСК» (т.5 – 12), 1993 – 2003.
7. Buryachenko V.A., Roy A., Lafdi K., Anderson K.L., Chellapilla S. Multi-scale mechanics of nanocomposites including interface: Experimental and numerical investigation // Composite Science and Technology. – 2005. – **65**. – P. 2435 – 2465.
8. Lau K.T., Chong G., Hui D. A critical review on nanotube and nanotube/nanoclay related polymer composite materials // Composites. Part B. – 2006. – **37**. – P. 425 – 436.
9. Lau K.T., Hui D. The revolutionary creating of new advanced carbon nanotubes composite // Composites. Part B. – 2002. – **33**. – P. 263 – 277.
10. Odegard G.V., Gates T.S., Nicholson L.M., Wise K.E. Equivalent-continuum modeling of nanostructured materials // Composite Science and Technology. – 2002. – **62**. – P. 1869 – 1880.
11. Odegard G.V., Gates T.S., Wise K.E., Park C., Sionchi E.J. Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites // Composite Science and Technology. – 2003. – **63**. – P. 1671 – 1687.
12. Saivastava D., Wei Ch., Chao k. Nanomechanics of carbon nanofibres and composites // Appl. Mech. Rev. – 2003. – **56**. – P. 215 – 229.
13. Semenyuk N.P., Trach V.M. Stability of Axially Compressed Cylindrical Shells Made of Reinforced Materials with Specific Fiber Orientation within Each Layer // Int. Appl. Mech. – 2007. – **42**, N 3. – P. 318 – 324.
14. Semenyuk N.P., Trach V.M. Stability and Initial Postbuckling Behavior of Anisotropic Cylindrical Shells under External Pressure // Int. Appl. Mech. – 2007. – **43**, N 3. – P. 314 – 328.
15. Semenyuk N.P., Trach V.M., Zhukova N.B. Stability and Initial Postbuckling Behavior of Anisotropic Cylindrical Shells Subject to Torsion // Int. Appl. Mech. – 2008. – **44**, N 1. – P. 1101 – 1111.
16. Semenyuk N.P., Trach V.M., Ostapchuk V.V. Nonlinear Axisymmetric Deformation of Anisotropic Spherical Shells // Int. Appl. Mech. – 2009. – **45**, N 10. – P. 1101 – 1111.
17. Thostenson E.T., Chunya Li, Chou T.W. Nanocomposites in context (Review) // Composites Science and Technology. – 2005. – **65**. – P. 491 – 516.
18. Tjong S.C. Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites // Material Science and Engineering. – 2006. – **53**. – P. 73 – 197.