

ИЗДАЕТСЯ С ИЮЛЯ 2004 Г.

КЛЕИ, ГЕРМЕТИКИ В ТЕХНОЛОГИИ 5 1 2015

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Орган Института химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Редакционная коллегия:

Главный редактор
академик РАН А.А. Берлин

Заместители главного редактора:

А.П. Петрова, д-р техн. наук, проф.,
Г.В. Мальшева, д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии:

- Аниховская Л.И., канд. техн. наук
- Аронович Д.И., канд. хим. наук
- Бабяевский П.Г., д-р техн. наук, проф.
- Войтович В.А., канд. техн. наук
- Гладков С.А.
- Горбаткина Ю.А., д-р физ.-мат. наук
- Ковалевский М.А., канд. экон. наук
- Кульков А.А., д-р техн. наук, проф.
- Лукоцкий В.П., д-р техн. наук, проф.
- Масленков С.Б., д-р техн. наук, проф.
- Минаков В.Т., д-р техн. наук, проф.
- Морозов Ю.Л., д-р техн. наук, проф.
- Новиков И.А., академик РАН
- Осипчик В.С., д-р техн. наук
- Резниченко С.В., д-р техн. наук, проф.
- Стоянов О.В., д-р техн. наук, проф.
- Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф.
- Угрюмов С.А., д-р техн. наук
- Хайруллин И.К., канд. техн. наук
- Чалых А.Е., д-р хим. наук, проф.
- Ширшин К.В., д-р хим. наук, проф.

Ведущий редактор

Еселева Л.И.
Адрес редакции:
105215, Москва, ул. 9-я Парковая, д. 60

Адрес для почтовых отправлений:
105425, Москва, Сиреневый бульвар, д. 14, корп. 1.

Тел. редакции: 8 (499) 995-45-22
E-mail: admin@nait.ru; korhimk@nait.ru
http://www.nait.ru

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.
При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал обязательна.

© ООО «Наука и Технологии», 2015

С 2007 г. журнал переводится на английский язык и выпускается издательством "Pleiades Publishing, Ltd" как приложение к журналу "Polymer Science, Series D", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

- Нейлова О.В., Газзаева Р.А. Полиорганосилоксановая композиция для склеивания стекла с металлом. 2
- Захарян Р.А., Лунин Б.С., Крейсберг В.А. Газовыделение в вакууме из некоторых зарубежных эпоксидных и керамических клеев. 8
- Слободкина К.Н., Рудаков А.А., Макаров Т.В., Вольфсон С.И. Маслобензостойкие герметизирующие композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука и тиокола. 12

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ИСПЫТАНИЙ

- Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль клеевых соединений в конструкциях и изделиях из ПКМ ультразвуковым теневым методом. 15
- Старостина И.А., Нгуен Д.А., Стоянов О.В. Оценка свободной поверхностной энергии дисперсных добавок для полимерных композиций в условиях избирательного смачивания. 24
- Угрюмов С.А., Осетров А.В. Исследование процессов отверждения модифицированной феноло-формальдегидной смолы. 32

ТЕХНОЛОГИЯ

- Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов. 35

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

- Белов П.А., Нелюб В.А. Теория пластин Тимошенко с адгезионными свойствами лицевых поверхностей. 41

ИНФОРМАЦИЯ

- Выставки, конференции, курсы. 45
- Новости литературы. 46

В Н О М Е Р Е

УДК 629.76

ТЕОРИЯ ПЛАСТИН ТИМОШЕНКО С АДГЕЗИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ЛИЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

П.А. Белов, д-р. физ-мат. наук, В.А. Нелюб

МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: malyin@mail.ru)

Статья поступила 04.02.2015

Разработана модель полимерного волокнистого композиционного материала, состоящая из последовательно чередующихся слоев моноволокон и связующего. Силы взаимодействия между волокном и связующим учтены в рамках теории идеальных адгезионных взаимодействий. Предложено обобщение теории пластин Тимошенко с учетом адгезионных свойств лицевых поверхностей.

Ключевые слова: теория пластин, композит, адгезионное взаимодействие, межслойный сдвиг

Введение

Полимерные композиционные материалы нашли широчайшее применение при производстве изделий ракетно-космической и авиационной техники, а также в судостроении [1—5]. В последнее десятилетие они начали применяться в строительстве, медицине, энергетике и т.д. [6—11]. Развитие технологий производства композиционных материалов ставит перед исследователями и инженерами ряд задач, без решения которых дальнейший прогресс в области разработки и проектирования композиционных материалов был бы невозможен. Одна из таких задач связана с исследованием влияния адгезии волокна к матрице в волокнистых композитах и, как следствие, решением задач об их расслоении. Специфическим отличием волокнистых композитов является достаточно высокая относительная объемная доля волокон, которая может достигать 70%. При таких концентрациях волокон эффективная толщина прослойки из матрицы составляет единицы микрон. Соответственно, и сама ячейка периодичности имеет микронные размеры. Моделирование механических свойств такой ячейки в рамках классических подходов механики композитов или в целом — механики деформируемого твердого тела уже вызывает сомнения, так как на таком масштабном уровне уже

начинают сказываться и играть существенную роль масштабные эффекты. Естественна необходимость построить модель композита с учетом масштабных эффектов. Как известно, масштабными называются эффекты, определяемые наличием в теории параметров среды, отличающихся друг от друга на целую степень длины. К примеру, наряду с классическими модулями Юнга и сдвига, имеющими размерность [Па], учет адгезионных модулей, имеющих размерность [дж/м²] = [Па·м], будет описывать ряд масштабных эффектов. Поэтому представляется полезным попытаться построить модель волокнистого композита как слоистую структуру, состоящую из чередующейся последовательности пленок монослоев волокон и связующего, контакт и совместная работа которых определяется адгезионным взаимодействием их поверхностей. В качестве первого шага на этом пути была осуществлена попытка сформулировать теорию пластин Кирхгоффа с адгезионными свойствами лицевых поверхностей [12, 13]. Следующим логичным шагом в этом направлении является формулировка теории пластин Тимошенко с адгезионными свойствами лицевых поверхностей. Этой задаче и посвящена данная работа.

Вариационная формулировка теории пластин Тимошенко с адгезионными свойствами лицевых поверхностей. Поскольку в теории

идеальной адгезии [1] уравнения равновесия те же, что и в классической теории, гипотезы Тимошенко применимы и к теории сред с идеальными адгезионными свойствами поверхностей.

Кинематические гипотезы Тимошенко:

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= U_1(x, y)z; \\ V(x, y, z) &= V_1(x, y)z; \\ W(x, y, z) &= W_0(x, y). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь U, V, W — компоненты перемещений; U_1, V_1 — углы поворотов; W_0 — прогибы. Статическая гипотеза Тимошенко (гипотеза ненадавливаемости) имеет выражение

$$\sigma_{zz} = (2\mu + \lambda)\epsilon_z + \lambda(\epsilon_x + \epsilon_y) = 0, \quad (2)$$

где μ, λ — коэффициенты Ламе; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ — деформации. Связь между коэффициентами Ламе и техническими модулями E, ν следующая:

$$\begin{cases} \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \\ \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \end{cases} \quad \begin{cases} 4\mu \frac{(\mu + \lambda)}{(2\mu + \lambda)} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \\ 2\mu \frac{\lambda}{(2\mu + \lambda)} = \frac{E\nu}{(1-\nu^2)}. \end{cases}$$

Напряжения σ_{ij} в соответствии с гипотезой ненадавливаемости:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{E}{(1-\nu^2)}(U_{1,x} + \nu V_{1,y})z \\ \sigma_{yy} = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\nu U_{1,x} + V_{1,y})z \\ \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{E}{2(1+\nu)}(U_{1,y} + V_{1,x})z \\ \sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)}(U_1 + W_{0,x}) \\ \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \frac{E}{2(1+\nu)}(V_1 + W_{0,y}). \end{cases} \quad (3)$$

Адгезионные напряжения a_{ij} равны:

$$\begin{cases} a_{xx}(x, y) = [(2\mu^F + \lambda^F)U_{1,x} + \lambda^F V_{1,y}]h/2 \\ a_{xy}(x, y) = a_{yx}(x, y) = [\mu^F(U_{1,y} + V_{1,x})]h/2 \\ a_{yy}(x, y) = [\lambda^F U_{1,x} + (2\mu^F + \lambda^F)V_{1,y}]h/2 \\ a_{zx}(x, y) = \delta^F W_{0,x} \\ a_{zy}(x, y) = \delta^F W_{0,y}. \end{cases} \quad (4)$$

Лагранжиан теории идеальной адгезии:

$$\begin{aligned} L = A - \frac{1}{2} \iiint C_{ijmn} R_{i,j} R_{m,n} dV - \\ - \frac{1}{2} \iint A_{ijmn} R_{i,j} R_{m,n} dF. \end{aligned} \quad (5)$$

Тензор упругих модулей:

$$C_{ijmn} = \lambda \delta_{ij} \delta_{mn} + \mu (\delta_{im} \delta_{jn} + \delta_{in} \delta_{jm}). \quad (6a)$$

Тензор адгезионных модулей [2]:

$$\begin{aligned} A_{ijmn} = \lambda^F \delta_{ij}^* \delta_{mn}^* + \\ + \mu^F (\delta_{im}^* \delta_{jn}^* + \delta_{in}^* \delta_{jm}^*) + \delta^F n_i n_m \delta_{jn}^*. \end{aligned} \quad (6b)$$

Лагранжиан теории адгезии идеальных поверхностей после подстановки соотношений (1), (3), (4) в (5) и последующего внутреннего интегрирования по координате z :

$$\begin{aligned} L = A - \frac{1}{2} \iint_{Face} [(D + (2\mu^F + \lambda^F)h^2/2)U_{1,x}U_{1,x} + \\ + 2(\nu D + \lambda^F h^2/2)U_{1,x}V_{1,y} + \\ + (D + (2\mu^F + \lambda^F)h^2/2)V_{1,y}V_{1,y} + \\ + ((1-\nu)D/2 + \mu^F h^2/2)(V_{1,x} + U_{1,y}) \times \\ \times (V_{1,y} + U_{1,x}) + Gh(U_1 + W_{0,x})(U_1 + W_{0,x}) + \\ + Gh(V_1 + W_{0,y})(V_1 + W_{0,y}) + \\ + 2\delta^F (W_{0,x}W_{0,x} + W_{0,y}W_{0,y})] dF. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ — цилиндрическая жесткость классической пластины; Gh — сдвиговая жесткость пластины в теории Тимошенко. Введем также определение эффективной цилиндрической жесткости $D^* = (D + (2\mu^F + \lambda^F)h^2/2)$ [1] и характерной длины кручения $h_*^2 = ((1-\nu)D + \mu^F h^2)/(2Gh)$. Заметим, что $D^* - 2Ghh_*^2 = \nu D + \lambda^F h^2/2$. Определения силовых факторов из формул Грина:

$$\begin{aligned} M_{xx} &= \frac{\partial U}{\partial U_{1,x}} = D^* U_{1,x} + (D^* - 2Ghh_*^2) V_{1,y} = \\ &= D^* (U_{1,x} + V_{1,y}) - 2Ghh_*^2 V_{1,y}; \\ M_{xy} &= \frac{\partial U}{\partial U_{1,y}} = Ghh_*^2 (V_{1,x} + U_{1,y}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{yx} &= \frac{\partial U}{\partial V_{1,x}} = Gh h_*^2 (V_{1,x} + U_{1,y}); \\
 M_{yy} &= \frac{\partial U}{\partial V_{1,y}} = (D^* - 2Ghh_*^2)U_{1,x} + D^*V_{1,y} = \\
 &= D^*(U_{1,x} + V_{1,y}) - 2Ghh_*^2U_{1,x}; \\
 Q_x &= \frac{\partial U}{\partial W_{0,x}} = Gh(U_1 + W_{0,x}) + 2\delta^F W_{0,x}; \\
 Q_y &= \frac{\partial U}{\partial W_{0,y}} = Gh(V_1 + W_{0,y}) + 2\delta^F W_{0,y}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Уравнения равновесия (уравнения Эйлера):

$$\begin{cases}
 M_{xx,x} + M_{xy,y} - Gh(U_1 + W_{0,x}) + p_x = 0, \\
 M_{yx,x} + M_{yy,y} - Gh(V_1 + W_{0,y}) + p_y = 0, \\
 Q_{x,x} + Q_{y,y} + q = 0.
 \end{cases} \tag{9}$$

Уравнения равновесия в перемещениях:

$$\begin{cases}
 D^*(U_{1,x} + V_{1,y})_{,x} - Ghh_*^2(V_{1,x} - U_{1,y})_{,y} - \\
 - Gh(U_1 + W_{0,x}) + p_x = 0, \\
 Ghh_*^2(V_{1,x} - U_{1,y})_{,x} + D^*(U_{1,x} + V_{1,y})_{,y} - \\
 - Gh(V_1 + W_{0,y}) + p_y = 0, \\
 Gh(U_{1,x} + V_{1,y}) + (Gh + 2\delta^F)\nabla^2 W_0 + q = 0.
 \end{cases} \tag{10}$$

Определим два частных решения W_0^* и ω^* из соотношений

$$\begin{aligned}
 (Gh + 2\delta^F)\nabla^2 W_0^* + q &= 0, \\
 Ghh_*^2\nabla^2 \omega^* &= (p_{y,x} - p_{x,y}).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Тогда полученную связанную систему уравнений равновесия можно представить как распадающуюся систему:

$$\begin{cases}
 Ghh_*^2\nabla^2 \omega - Gh\omega + (p_{y,x} - p_{x,y}) = 0, \\
 D^*\nabla^2\nabla^2 W_0 - \frac{1}{\left(\frac{1}{2\delta^F} + \frac{1}{Gh}\right)}\nabla^2 W_0 + q^* = 0,
 \end{cases} \tag{12}$$

$$q^* = \left(q - \frac{1}{Gh} D^*\nabla^2 q + p_{x,x} + p_{y,y} \right) \frac{Gh}{(Gh + 2\delta^F)}.$$

С помощью определенных из уравнений (12) прогиба W_0 и поворота $\omega = (V_{1,x} - U_{1,y})/2$ продольные перемещения находятся из третьего уравнения равновесия в форме следующих соотношений:

$$\begin{cases}
 U_1 = -\frac{(Gh + 2\delta^F)}{Gh} (W_{0,x} + W_{0,x}^*) - h_*^2 (\omega_y + \omega_y^*), \\
 V_1 = -\frac{(Gh + 2\delta^F)}{Gh} (W_{0,y} + W_{0,y}^*) + h_*^2 (\omega_x + \omega_x^*).
 \end{cases} \tag{13}$$

Таким образом, получена формулировка теории пластин Тимошенко с адгезионными свойствами лицевых поверхностей.

Заключение

Так же, как и в теории пластин Кирхгоффа с адгезионными свойствами лицевых поверхностей, в теории пластин Тимошенко с адгезионными свойствами лицевых поверхностей имеется аналогичное вырождение при стремлении толщины пластинки к нулю. Действительно, третье уравнение равновесия (10) при $h \rightarrow 0$ дает

$$2\delta^F \nabla^2 W_0 + q = 0. \tag{14}$$

Первые два уравнения в этом предельном случае вырождаются полностью. Если все-таки ограничиваться минимальными толщинами, удовлетворяющими условию $h^3 \ll h$, первые два уравнения равновесия дают

$$\begin{cases}
 Gh(U_1 + W_{0,x}) = p_x, \\
 Gh(V_1 + W_{0,y}) = p_y.
 \end{cases} \tag{15}$$

Соотношения (14)—(15) имеют важное практическое значение. При стандартных испытаниях на трехточечный изгиб образцов из композиционного материала (РД 50-657—88, ASTM Д 2344) пренебрегают изгибающими моментами по сравнению с перерезывающими силами, полагая, что между опорами в композите реализуется чистый межслоевой сдвиг. Именно этот случай соответствует системе (14)—(15), так как в уравнениях (15) остаются только Сен-Венановы перерезывающие силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов П.А., Лурье С.А. Теория идеальных адгезионных взаимодействий // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 14. № 3. С. 519—536.
2. Белов П.А., Нелюб В.А. Теория сред с сохраняющимися дислокациями. О единой природе адгезионных и реберных взаимодействий // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. № 5. С. 28—34.

3. Нелюб В.А., Гращенков Д.В., Коган Д.И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков // Химическая технология. 2012. № 12. С. 735—739.
4. Александров И.А., Малышева Г.В., Нелюб В.А., Буянов И.А., Чуднов И.В., Бородулин А.С. Исследование поверхностей разрушения углепластиков, изготовленных по расплавной и растворной технологиям // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3. С. 7—12.
5. Бородулин А.С. Свойства и особенности структур стеклянных волокон, используемых при изготовлении стеклопластиков // Материаловедение. 2012. № 7. С. 34—37.
6. Бородулин А.С. Пластификаторы для эпоксидных клеев и связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 7. С. 31—35.
7. Terekhina S.M., Malysheva G.V., Bulanov I.M., Tarasova T.V. Investigation of tribological properties of polymer composite materials based on bismaleimide binder // Polymer Science — Series D. 2011. 4 (2), pp. 136—137.
8. Нелюб В.А., Карасева А.А., Боченкова А.А. Конструкционные стеклопластики на основе полиэфирной матрицы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 7. С. 46—49.
9. Нелюб В.А. Новые материалы и технологии изготовления деталей из стеклопластиков на основе полиэфирной матрицы // Материаловедение. 2012. № 7. С. 30—33.
10. Bodrykh N.V., Malysheva G.V. Repair of starter storage batteries // Polymer Science — Series D. 2010. 3 (1), pp. 70—73
11. Malysheva G.V., Bodrykh N.V. Hot-met adhesives // Polymer Science — Series D. 2011. 4 (4), pp. 301—303.
12. Нелюб В.А. Технология производства деталей опор линий электропередач из эпоксидных связующих методами намотки // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 6. С. 25—29.
13. Нелюб В.А. Альтернативный pull-out-эксперименту метод определения адгезионной прочности системы волокно—матрица // Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы образования и науки». 30 декабря 2013 г. Тамбов, 2014. Ч. 14. С. 89—92.

**РОСПЛАСТ-2015. ПЛАСТМАССЫ. ОБОРУДОВАНИЕ. ИЗДЕЛИЯ —
Международная специализированная выставка сырья,
оборудования и технологий для производства изделий из пластмасс**

Дата проведения: **23.06.2015—25.06.2015**

Город: **Москва**

Основные тематические разделы

- Сырье: полимерные смолы, ингредиенты, пластмассы, пеноматериалы, композиты, резины, каучуки и эластопласты
- Полуфабрикаты: пленки, листы, профили, трубы, волокна
- Изделия из пластмасс, композиционных материалов, комбинированных металлополимерных систем
- Оборудование и технологии: машины, установки, линии, пилотные производственные инновационные агрегаты для актуальных технологий изготовления полуфабрикатов и изделий
- Средства производственной инфраструктуры: роботы, чиллеры, термошкафы, средства логистической инфраструктуры
- Системы диагностики оборудования, средства контроля и мониторинга
- Системы управления технологическим оборудованием различного назначения и сложности, программное обеспечение
- Оборудование и технологии для утилизации отходов и переработки полимерного вторсырья в изделия
- Интеллектуальные инновационные разработки и сервисное обслуживание, специализированные отраслевые СМИ и интернет-порталы

Режим работы:

- 23—24 июня — с 10:00 до 18:00
- 25 июня — с 10:00 до 16:00