

Предложенная модель деформирования препрегов позволяет установить зависимость между деформацией и напряжениями сжатия и растяжения армирующего материала, а также зависимость между семействами нитей, которая устанавливается с учетом сил трения. Уравнения равновесия получены в предположении, что композиционные материалы представляют собой ортотропные структуры в виде многослойных сред на основе стеклотканей гладкого переплетения. Решение полученной системы уравнений зависит от двух произвольных функций, которые определяют при решении конкретных граничных задач

ЛИТЕРАТУРА

1. Kawabata, S., Proc. 14 th Text. Res. Symp. At Mt. Fuji, 1985, The Textile Machinery Society of Japan, Osaka, 1985, p.1. 2. Комков, М.А., Колганов, В.И., Колганов, А.В., Сахоненко, В.М., Сахоненко, С.В. Сдвиговые перемещения нитей в неотвержденных тканых композитах под действием внешних нагрузок. Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информтехника». – Вып. 1(134)–2 (135), 2004 г, С.51-55. 3. Сахоненко, С.В. Процессы растяжения и сжатия в материале препрегов при проколе отверстий / БГУ – Минск, 2004 – Деп. в ГУ «БелИС». 10.03.2005 - №Д200576. 4. Колганов, В.И., Колганов, А.В., Сахоненко, В.М., Сахоненко, С.В. Моделирование процессов растяжения и сжатия в материале препрегов при выполнении отверстий. Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информтехника». – Вып. 1(134)–2 (135), 2004 г, С.31-37

УДК 539.374

Василевич Ю.В., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В.

КОНЕЧНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРЕПРЕГОВ В ДВУХ ИЗМЕРЕНИЯХ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Предметом исследований являются препреги, которые представляют собой многослойную композицию из тканого материала и полимерного связующего. При этом каждый слой состоит из двух взаимно-перпендикулярных и связанных между собой семейств нитей тканого материала. Связующее не отверждено и находится в состоянии наименьшей вязкости, например, в разогретом состоянии до температуры 80°C. Для того, чтобы перейти к дальнейшим исследованиям, сделаем допущение об абсолютной гибкости нитей в тканых препрегах [1-2]. Предполагаем плоское напряженное состояние в плоскости слоя ткани. Рассматривается напряженное состояние тех зон препрега, в которых под действием внешней нагрузки происходят сдвиговые деформации со смещением одного семейства нитей по отношению к другому. Эти области назовем зонами деформации.

Пусть в начальном или недеформированном состоянии семейства нитей препрега параллельны осям координат Ox , причем первое семейство нитей параллельно оси Ox , а второе – оси Oy . Для препрегов необходимо знать перемещения точек каждого семейства нитей, т.к. если взять какую-либо точку (x, y) препрега в исходном состоянии, то предполагаем, что она характеризует точку пересечения нити первого семейства с координатой y и нити второго семейства с координатой x . После деформации точки соприкосновения нитей разойдутся и будут находиться в одной плоскости, однако, в разных местах. Вычисления перемещений по заданным напряжениям необходимо проводить для нитей каждого семейства

Каждая нить семейства перемещается так, что не имеет разрывов между точками, принадлежащими этой нити.

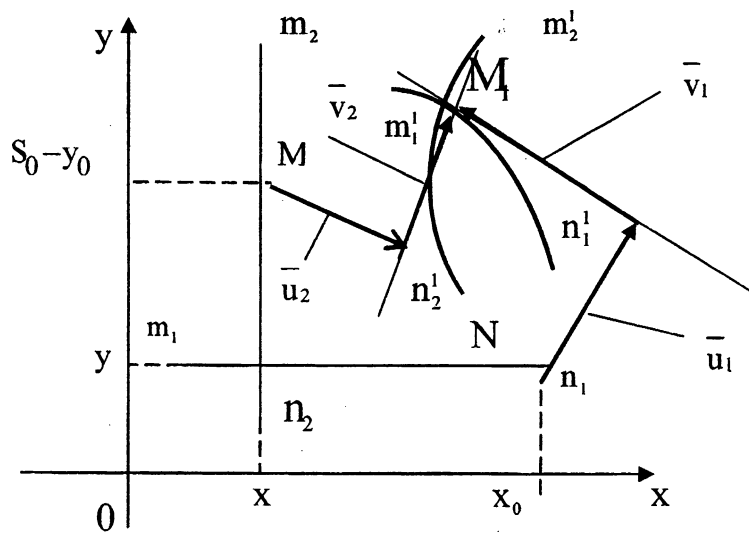


Рисунок 1. Перемещение точек нитей препрега в условиях деформации

На рисунке 1 показано, как перемещаются точки нитей препрега в результате деформации. До деформации нить первого семейства занимает положение $m_1 n_1$, а после деформации - положение $m_1' n_1'$. Нить второго семейства $m_2 n_2$ после деформации занимает положение $m_2' n_2'$. Точки M и N , лежащие на нитях разных семейств до деформации, после деформации совпадают в точке M_1 . S_0 и y_0 - расстояния, отсчитываемые соответственно от верхней границы зоны деформации вдоль нити $m_1 n_1$ до оси x и до точки M согласно принятому правилу обхода нитей.

Рассмотрим деформацию первого семейства нитей. В качестве величин деформации возьмем изменения длин линий, совпадающих с линиями нитей, а также изменение длин линий, перпендикулярных во всех точках к нитям семейства. Предположим, что при деформации первые линии находятся в растянутом состоянии, а вторые - в сжатом. Пусть отрезки NP и NQ (рис. 2), находящиеся в недеформированном состоянии, перпендикулярны, причем NQ совпадает с нитью семейства «1», имеющей координату y , а NP совпадает с нитью семейства «2», имеющей координату x . Обозначим через $NP = -dy$, $NQ = dx_0$ проекции длин соответствующих отрезков линий. После деформации точка N переместится в положение M_1 , точка P займет положение P_1 , а точка Q - положение Q_1 . Примем за положительное направление при обходе вдоль нити первого семейства направление вектора $\overline{M_1 Q_1}$, а при обходе вдоль линии, которая обозначает линию сжатия семейства нитей, примем направление вектора $\overline{M_1 P_1}$. Отметим также, что на основании принятых предположений касательные к рассматриваемым кривым в точке M_1 перпендикулярны.

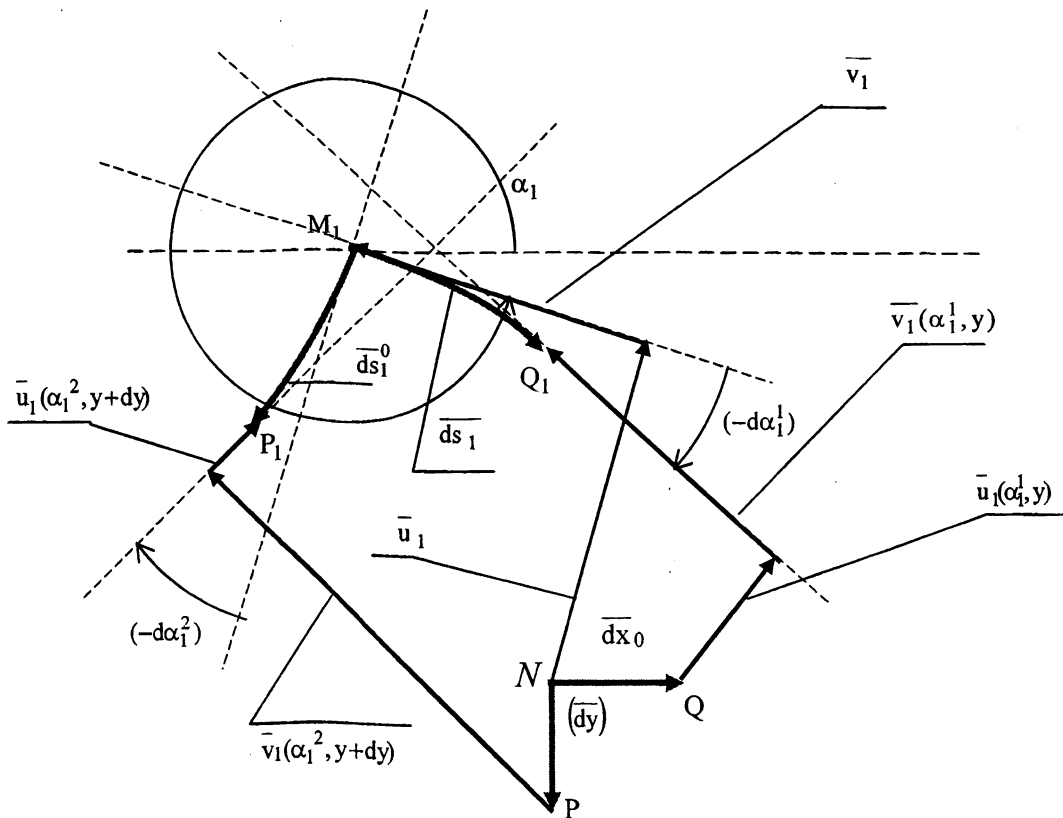


Рисунок 2. Схема перемещения точек первого семейства нитей при их деформировании

Обозначим через $u_1(\alpha_1, y)$ и $v_1(\alpha_1, y)$ нормальную и касательную составляющие перемещения точки из положения N в положение M_1 (на рис. 2 соответствующие компоненты перемещений показаны в виде векторов \bar{u}_1 , \bar{v}_1 , а положение точки M_1 характеризуется обобщенными координатами α_1, y). Из определения компонент перемещений u_1 и v_1 можно извлечь несколько следствий. Материальные точки, лежавшие до деформации на одной из нитей семейства «1», получают перемещения u_1, v_1 и будут находиться на той же нити после деформации. При этом имеет место взаимнооднозначное соответствие, а именно: другая нить, находящаяся на расстоянии dy , тоже обладает этими свойствами, однако для нее компоненты перемещений u_1 и v_1 представляют совсем другие функции. Таким образом, приходим к выводу, что функции u_1 и v_1 должны зависеть от переменных α_1, y . Очевидны следующие равенства:

$$\bar{u}_1 + \bar{v}_1 + \bar{ds}_1 = \bar{dx}_0 + \bar{u}_1(\alpha_1^1, y) + \bar{v}_1(\alpha_1^1, y),$$

$$\bar{u}_1 + \bar{v}_1 + \bar{ds}_1^0 = \bar{dy} + \bar{v}_1(\alpha_1^2, y + dy) + \bar{u}_1(\alpha_1^2, y + dy).$$

Здесь $\alpha_1^1 = \alpha_1 + d\alpha_1^1$, $\alpha_1^2 = \alpha_1 + d\alpha_1^2$, $\bar{u}_1 = \bar{u}_1(\alpha_1, y)$, $\bar{v}_1 = \bar{v}_1(\alpha_1, y)$. В полученных представлениях точка M_1 характеризуется обобщенными координатами (α_1, y) , точка Q_1 координатами (α_1^1, y) (координата y не изменяется, так как точки M_1 и Q_1 лежат на одной и той же нити); точка P_1 имеет обобщенные координаты $(\alpha_1^2, y + dy)$. Величина $(-d\alpha_1^2)$ соответствует изменению угла касательной или нормали к кривой M_1P_1 при переходе от точки M_1 к точке

P_1 , а угол $\alpha_1^2 = \alpha_1 + d\alpha_1^2$ равен углу, который составляет касательная к нити семейства «1» в точке P_1 .

Спроектируем полученные векторные равенства на направления векторов \vec{u}_1 и \vec{v}_1 , и тогда с учетом того, что $d\alpha_1^1 < 0$, $d\alpha_1^2 < 0$ и $dy < 0$, получим:

$$\begin{aligned} u_1 + ds_1 \sin\left(\frac{d\alpha_1^1}{2}\right) &= -dx_0 \sin\alpha_1 + u_1(\alpha_1^1, y) \cos d\alpha_1^1 - v_1(\alpha_1^1, y) \sin d\alpha_1^1, \\ v_1 - ds_1 \cos\left(\frac{d\alpha_1^1}{2}\right) &= -dx_0 \cos\alpha_1 + u_1(\alpha_1^1, y) \sin d\alpha_1^1 + v_1(\alpha_1^1, y) \cos d\alpha_1^1, \\ u_1 - ds_1^0 \cos\left(\frac{d\alpha_1^2}{2}\right) &= dy \cos\alpha_1 + u_1(\alpha_1^2, y+dy) \cos d\alpha_1^2 - v_1(\alpha_1^2, y+dy) \sin d\alpha_1^2, \\ v_1 - ds_1^0 \sin\left(\frac{d\alpha_1^2}{2}\right) &= -dy \sin\alpha_1 + u_1(\alpha_1^2, y+dy) \sin d\alpha_1^2 + v_1(\alpha_1^2, y+dy) \cos d\alpha_1^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Следует заметить, что на рис. 2 направления выпуклостей кривых выбраны так, что $d\alpha_1^1 < 0$, и $d\alpha_1^2 < 0$. Однако возможны и другие варианты. Тем не менее, заметим наперед, что при принятии любых других направлений выпуклостей получается тот же результат.

Величина dx_0 представляет собой длину участка нити семейства «1», расположенного до деформации между точками N и Q. После деформации этот участок нити займет положение M_1Q_1 , а его длина должна стать больше исходного размера dx_0 на величину деформации в результате действия растягивающих усилий.

Имеют место равенства [3, 4]:

$$ds_1 = \left(1 + \gamma_{11} + \frac{\sigma_{11}}{E_{11}}\right) dx_0, \quad ds_1^0 = -\left(1 - \gamma_{12} - \frac{\sigma_{12}}{E_{12}}\right) dy. \quad (2)$$

где γ_{11} и γ_{12} - относительные неупругие удлинения при растяжении и сжатии первого семейства нитей; E_{11} и E_{12} - модули упругости при растяжении и сжатии соответственно в направлении первого семейства нитей и перпендикулярно ему; σ_{11} и σ_{12} - растягивающие и сжимающие напряжения первого семейства нитей в районе точки M_1 ; ds_1 и ds_1^0 - длины нити, изображенные на рис.2.

Формулы (2) отличаются от закона Гука тем, что в них присутствуют слагаемые γ_{11} и γ_{12} . По результатам проведенных исследований для стеклотканей гладкого переплетения [3] коэффициенты γ_{11} и γ_{12} имеют величину порядка 0,05, поэтому их обнуление может привести к нежелательным результатам. Отметим также, что, если положить $\gamma_{11} = \gamma_{12} = 0$, то рассматриваемая среда превращается в упругое твердое тело.

Согласно определению, параметр x_0 характеризует положение точки на нити семейства «1» в исходном положении до деформации препрега. Изменение x_0 влечет за собой изменение положения точки M_1 на нити после деформации. Такое изменение сопровождается изменением угла α_1 . Следовательно, параметр x_0 является функцией угла α_1 . Если взять другую нить семейства «1», то для одного и того же значения угла α_1 параметр x_0 для разных нитей будет иметь разные значения. Положение нитей первого семейства характеризуется параметром y , поэтому x_0 одновременно является функцией угла α_1 и координаты y . Длина участка нити dx_0 в этом случае представима в виде:

$$dx_0 = x_0(\alpha_1 + d\alpha_1, y) - x_0(\alpha_1, y) = \frac{\partial x_0}{\partial \alpha_1} d\alpha_1.$$

Функцию u_1 в точках (α_1^1, y) и $(\alpha_1^2, y + dy)$, фигурирующих в (1), разложим с точностью до бесконечно малых первого порядка в ряд Тейлора в окрестности точки (α_1, y) :

$$u_1(\alpha_1^1, y) = u_1 + \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} d\alpha_1^1, \quad u_1(\alpha_1^2, y + dy) = u_1 + \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} d\alpha_1^2 + \frac{\partial u_1}{\partial y} dy. \quad (3)$$

Аналогичные разложения можно осуществить и для функции v_1 . Подставив в систему (1) разложения функций в ряд Тейлора, разделим первые два из уравнений системы (1) на $d\alpha_1^1$, а два вторых на $d\alpha_1^2$, и, переходя к пределу при $d\alpha_1^1 \rightarrow 0$ и $d\alpha_1^2 \rightarrow 0$ с учетом (3) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} - v_1 &= Z_{11}R_1 \sin \alpha_1, & \frac{\partial v_1}{\partial \alpha_1} + u_1 &= -R_1 + Z_{11}R_1 \cos \alpha_1, \\ \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} - v_1 - \frac{\partial u_1}{\partial y} \cdot Z_{12}R_1^0 &= -R_1^0 + Z_{12}R_1^0 \cos \alpha_1, & (4) \\ \frac{\partial v_1}{\partial \alpha_1} + u_1 - \frac{\partial v_1}{\partial y} \cdot Z_{12}R_1^0 &= -Z_{12}R_1^0 \sin \alpha_1, \\ Z_{11} &= \frac{1}{1 + \gamma_{11} + \frac{\sigma_{11}}{E_{11}}}, & Z_{12} &= \frac{1}{1 - \gamma_{12} - \frac{\sigma_{12}}{E_{12}}}, \\ dx_0 &= Z_{11}R_1 d\alpha_1, & dy &= -Z_{12}R_1^0 d\alpha_1, \end{aligned}$$

R_1 - радиус кривизны нити семейства «1» в точке M_1 ; R_1^0 - радиус кривизны линии перпендикулярной во всех точках к нитям семейства «1», в точке M_1 .

Решение системы уравнений (4) представим в виде суммы частного и общего решений соответствующих дифференциальных уравнений. Частное решение находим методом вариации произвольных постоянных. В итоге решение системы дифференциальных уравнений (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= c_{11} \sin \alpha_1 - c_{12} \cos \alpha_1 - \int_{\alpha_1}^{\alpha_{01}} [Z_{11}R_1 \sin \alpha_1 - R_1 \sin(\alpha_1 - \alpha)] d\alpha, \\ v_1 &= c_{12} \sin \alpha_1 + c_{11} \cos \alpha_1 - \int_{\alpha_1}^{\alpha_{01}} [Z_{11}R_1 \cos \alpha_1 - R_1 \cos(\alpha_1 - \alpha)] d\alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь c_{11} и c_{12} являются функциями от переменной y ; направление интегрирования совпадает с положительным направлением при обходе вдоль нити семейства «1»; α_{01} - угол между касательной и осью x для рассматриваемой нити на границе области деформации препрега.

Два последних уравнения системы (4) позволяют найти выражения частных производных $\frac{\partial u_1}{\partial y}$ и $\frac{\partial v_1}{\partial y}$, которые в результате преобразований равны:

$$\frac{\partial u_1}{\partial y} = \frac{Z_{11}R_1}{Z_{12}R_1^0} \sin \alpha_1 + \frac{1}{Z_{12}} - \cos \alpha_1,$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial y} = \frac{Z_{11}R_1}{Z_{12}R_1^0} \cos \alpha_1 - \frac{R_1}{Z_{12}R_1^0} + \sin \alpha_1.$$

Используя полученные зависимости и продифференцированные по y выражения (5), найдем соотношения для определения c_{11} и c_{12} :

$$\frac{\partial c_{11}}{\partial y} = \frac{Z_{11}R_1}{Z_{12}R_1^0} + \frac{\sin \alpha_1}{Z_{12}} - \frac{R_1}{Z_{12}R_1^0} \cos \alpha_1 + \int_{\alpha_1}^{\alpha_{01}} \frac{\partial}{\partial y} (Z_{11}R_1 - R_1 \cos \alpha) d\alpha,$$

$$\frac{\partial c_{12}}{\partial y} = 1 - \frac{R_1}{Z_{12}R_1^0} \sin \alpha_1 - \frac{\cos \alpha_1}{Z_{12}} - \int_{\alpha_1}^{\alpha_{01}} \frac{\partial R_1}{\partial y} \sin \alpha d\alpha.$$
(6)

Так как c_{11} и c_{12} не зависят от переменной α_1 , то от нее не зависят и их частные производные по y . Поэтому в результате дифференцирования по α_1 выражений (6), получим:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{Z_{11}R_1}{Z_{12}R_1^0} + \frac{\sin \alpha_1}{Z_{12}} - \frac{R_1}{Z_{12}R_1^0} \cos \alpha_1 \right) = \frac{\partial}{\partial y} (Z_{11}R_1 - R_1 \cos \alpha_1),$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{R_1}{Z_{12}R_1^0} \sin \alpha_1 + \frac{\cos \alpha_1}{Z_{12}} \right) = \frac{\partial R_1}{\partial y} \sin \alpha_1.$$
(7)

Установим теперь аналогичные зависимости между перемещениями и напряжениями для второго семейства нитей. Для этого определим касательную и нормальную составляющие перемещения точки, как это было сделано для семейства нитей «1». На рис.1 показаны компоненты u_1, v_1 перемещения точки M в точку M_1 . Первое поле представляет перемещений собой семейство кривых, на которых лежат точки, до деформации лежавшие на прямых, параллельных оси Oy , а второе – семейство ортогональных кривых, перпендикулярных в точках пересечения с кривыми первого семейства. Причем для любой нити семейства «2» функция u_2 представляет собой нормальную составляющую перемещения, а v_2 – касательную. Для ортогональных кривых – с точностью до наоборот. Отметим также, что функции u_2 и v_2 являются функциями от переменных α_2 и x . Это касается и параметра y_0 . Параметр S_0 зависит только от переменной x .

Поступая аналогичным образом, как и в случае рассмотрения деформаций семейства нитей «1», получим систему уравнений, выражающую зависимость между компонентами перемещений и напряжений для нитей второго семейства:

$$\frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} + v_2 = Z_{22}R_2 \cos \alpha_2, \quad \frac{\partial v_2}{\partial \alpha_2} - u_2 = R_2 + Z_{22}R_2 \sin \alpha_2,$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} + v_2 + \frac{\partial u_2}{\partial x} Z_{21}R_2^0 = R_2^0 + Z_{21}R_2^0 \sin \alpha_2,$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial \alpha_2} - u_2 + \frac{\partial v_2}{\partial x} Z_{21}R_2^0 = -Z_{21}R_2^0 \cos \alpha_2.$$
(8)

Здесь γ_{21} и γ_{22} – относительные неупругие удлинения при сжатии и растяжении семейства нитей; E_{22} и E_{21} – жесткости при растяжении и сжатии второго семейства нитей; τ_{22} – растягивающие, а σ_{21} – сжимающие напряжения семейства нитей в точке M_1 ; R_2 –

радиус кривизны нити семейства «2» в точке M_1 , а R_2^0 - радиус кривизны линии, перпендикулярной во всех точках к нитям семейства «2», в точке M_1 ;

$$Z_{21} = \frac{1}{1 - \gamma_{21} - \frac{\sigma_{21}}{E_{21}}}, \quad Z_{22} = \frac{1}{1 + \gamma_{22} + \frac{\sigma_{22}}{E_{22}}}.$$

Решение системы (8) получим, используя первые два уравнения:

$$\begin{aligned} u_2 &= c_{21} \sin \alpha_2 + c_{22} \cos \alpha_2 + \int_{\alpha_{02}}^{\alpha_2} [Z_{22} R_2 \cos \alpha_2 - R_2 \sin(\alpha_2 - \alpha)] d\alpha, \\ v_2 &= c_{22} \sin \alpha_2 - c_{21} \cos \alpha_2 + \int_{\alpha_{02}}^{\alpha_2} [Z_{22} R_2 \sin \alpha_2 + R_2 \cos(\alpha_2 - \alpha)] d\alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь c_{21} и c_{22} являются функциями от переменной x . Из последних двух уравнений системы (8) найдем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial x} &= -\frac{Z_{22} R_2}{Z_{21} R_2^0} \cos \alpha_2 + \frac{1}{Z_{21}} + \sin \alpha_2, \\ \frac{\partial v_2}{\partial x} &= -\frac{Z_{22} R_2}{Z_{21} R_2^0} \sin \alpha_2 - \frac{R_2}{Z_{21} R_2^0} - \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Возьмем частную производную по x от выражений (9), и, сравнивая полученные соотношения с равенствами (10), найдем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_{22}}{\partial x} &= -\frac{Z_{22} R_2}{Z_{21} R_2^0} + \frac{\cos \alpha_2}{Z_{21}} - \frac{R_2}{Z_{21} R_2^0} \sin \alpha_2 - \int_{\alpha_{02}}^{\alpha_2} \frac{\partial}{\partial x} (Z_{22} R_2 + R_2 \sin \alpha) d\alpha, \\ \frac{\partial c_{21}}{\partial x} &= \frac{R_2 \cos \alpha_2}{Z_{21} R_2^0} + \frac{\sin \alpha_2}{Z_{21}} + 1 + \int_{\alpha_{02}}^{\alpha_2} \frac{\partial R_2}{\partial x} \cos \alpha d\alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

В результате дифференцирования (11) по α_2 имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{Z_{22} R_2}{Z_{21} R_2^0} + \frac{\cos \alpha_2}{Z_{21}} + \frac{R_2}{Z_{21} R_2^0} \sin \alpha_2 \right) &= -\frac{\partial}{\partial x} (Z_{22} R_2 + R_2 \sin \alpha_2), \\ \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{R_2}{Z_{21} R_2^0} \cos \alpha_2 + \frac{\sin \alpha_2}{Z_{21}} \right) &= -\frac{\partial R_2}{\partial x} \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Зависимости (5) - (12) получены при в предположении, что нити армирующего материала препрегов являются абсолютно гибкими, а напряжения растяжения и сжатия воспринимаются нитями семейств в продольном и поперечном взаимно-перпендикулярных направлениях.

Под действием внешних нагрузок в композиционно-волокнистых материалах при вязком состоянии полимеров (препрегах) происходят сдвиговые деформации со смещением между семействами нитей. В результате перемещения нитей достигают конечных значений. Предположение об абсолютной гибкости нитей, а также о том, что система напряжений сжатия и растяжения является взаимно-перпендикулярной для каждого семейства нитей, позволяет установить зависимости между компонентами перемещения точек нитей и напряжениями в армирующем материале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дукельский, А.И. Подвесные канатные и кабельные краны. - М.; Машгиз, 1951. 2
2. Качурин, В.К. Гибкие нити с малыми стрелками. - М.; ГИТТЛ, 1956. 3.
3. Комков, М.А., Колга-

нов, В.И., Колганов, А.В., Сахоненко, В.М., Сахоненко, С.В. Сдвиговые перемещения нитей в неотвержденных тканых композитах под действием внешних нагрузок // Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.; НТИЦ «Информтехника». – Вып. 1(134) – 2 (135), 2004, С.51-55. 4. Сахоненко, С.В. Процессы растяжения и сжатия в материале препрегов при проколе отверстий // БГУ – Минск, 2004 – Деп. в ГУ «БелИСА» 10.03.2005 - №Д200576.

УДК 621. 793. 74

*Дорожкин Н.Н., Кардаполова М.А., Дьяченко О.В.,
Абрамович Т.М., Донских С.А., Симонов Ю.А.*

ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe-Cr-B-Si ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ И ЛЕГИРОВАНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь
Таганрогский педагогический институт,
Таганрог, Россия*

Сплавы системы Fe–Cr–B–Si обладают высокой структурной чувствительностью к энергетическому воздействию и легирующим добавкам [1, 2]. Лазерное модифицирование позволяет точно дозировать подвод энергии и легирующих веществ, а характер получаемой структуры определяет качество упрочненного слоя. Кроме того, сплавы обладают высокой износостойкостью вследствие композиционной структуры.

Широко известен способ получения износостойких покрытий сочетанием плазменного напыления с последующим лазерным оплавлением [1 – 4]. Этот метод весьма успешно рекомендовал себя при изготовлении и восстановлении длинномерных, крупногабаритных деталей и деталей сложной конфигурации. Однако данная технология достаточно затратная.

Покрытия после лазерного оплавления обладают высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств. Для сравнения часть образцов подвергали лазерному оплавлению после клеевого метода нанесения покрытий.

Покрытия, нанесенные на деталь, в процессе эксплуатации подвергаются воздействию механических нагрузок, а адгезионная прочность лимитирует их применение. Лазерная обработка клеевых покрытий позволяет повысить прочность сцепления покрытия с основой при максимальном сохранении исходной структуры и свойств порошка. Для оценки работоспособности изделия подвергаются испытаниям на отрыв по ГОСТ 14760-69 «Метод определения прочности при отрыве».

Цель настоящей работы – исследовать адгезионную прочность и фазовый состав покрытий из самофлюсующихся сплавов на железной основе (клеевых и после плазменного напыления, оплавленных лазером и горелкой).

В качестве материала для нанесения клеевых покрытий и напыления использовали самофлюсующийся сплав из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф следующего химического состава (в %): Fe (83.1 – 87.6), В (3.3 – 4.3), Cr (3.5 – 4.5), Si (2.0 – 2.5), Mn (2.0 – 2.5), С (1.0 – 1.2), V (0.5 – 0.9), Al (0.05 – 0.5), Cu (0.05 – 0.5). На подготовленную поверхность штифтов клеевым способом его наносили кисточкой (в порошковый слой для клеевого покрытия добавлено 3% клея «АГО» к ацетону), а также методом плазменного напыления [1] с использованием установки УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазмотроном ПП-25 на режимах: $I = 20$ А, $U = 80$ В, $P = 0.06$ ГПа. Толщина слоя составляла 0.6 мм. Далее на плазменно-