



УДК 678:624.011.78:001.891.573:66.017

© С. П. Захарычев, В. А. Иванов, Д. В. Отмахов, В. А. Авдеев,  
В. М. Манаков, 2010

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НАМОТКИ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Захарычев С. П.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90; *Иванов В. А.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90; *Отмахов Д. В.* – преп. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90; *Авдеев В. А.* – доц. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса»; *Манаков В. М.* – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Высшая математика», тел.: (4212) 22-44-23 (ТОГУ)

Применение предварительно напряженных армированных материалов значительно повышает физико-механические и другие качественные параметры антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ), использующихся в деталях узлов трения различных машин. Свойства ПКМ определяются не только составом компаундов, но и технологическими условиями формирования внутренней структуры материалов.

The use of prestressed reinforced materials significantly improves physico-mechanical and other qualitative parameters of antifriction polymeric composite materials (PCMs) being used in friction units of various machines. The properties of PCMs are defined not only by the composition of compounds, but also technological conditions in forming internal material's structure.

*Ключевые слова:* полимерный композиционный материал, ткань хлопчатобумажная, намотка.

### Введение

Применение волокон в структуре полимерных композиций улучшает свойства получаемых ПКМ. В таких материалах используется высокая удельная прочность волокон, воспринимающих большую часть внешних нагрузок и разгружающих матрицу. Кроме того, гетерогенные структуры армированных волокнами ПКМ характеризуются уникальной выносливостью. Основное внимание создателей новых ПКМ направлено на получение высоких физико-механических свойств путем подбора составов композиций и

свойств применяемых волокон. Работы в этой области посвящены в основном получению конструкционных ПКМ: стекло-, угле- и органопластиков. Созданы материалы с высокими характеристиками. В то же время – весьма мало имеется публикаций, посвященных изучению влияния технологических факторов изготовления армированных изделий на структуру и свойства антифрикционных ПКМ – актуального направления материаловедения.

Антифрикционные ПКМ лимитируют долговечность узлов трения машин, значительно уменьшая их долговечность и другие показатели надежности машин. Такие материалы должны обладать не только высокими физико-механическими, но и соответствующими триботехническими свойствами. Этот комплекс требований, зачастую вступающих в конфронтацию, может быть обеспечен только путем системных оптимизационных исследований на всех этапах создания новых материалов [1].

Большинство деталей узлов трения машин имеют форму втулок и колец. Для получения армированных ПКМ наиболее пригоден способ радиальной намотки пропитанной компаундом ткани на оправки требуемых диаметров и ширины. Метод прост в реализации, не требуя создания специальных раскладчиков волокна, обладает достаточно высокой производительностью и экономичностью, позволяя изготавливать сразу несколько заготовок с минимальными припусками на механическую обработку. При изготовлении изделий появляется возможность получения градиентных и комбинированных структур материалов с повышенными эксплуатационными свойствами.

**Описание процесса.** На показатели антифрикционных ПКМ существенное влияние оказывает не только состав и свойства материалов, используемых в композиции, но и технологические факторы, определяющие структурообразование ПКМ в процессе формирования изделий.

Для выполнения исследований и изготовления изделий из армированных ПКМ постоянно использовалась разработанная для этих целей автоматизированная экспериментальная установка радиальной намотки (рис. 1).

Установка снабжена автоматизированной системой управления на базе промышленного контроллера «LOGO!» фирмы «Siemens» (Германия). Электропривод установки – частотно-регулируемый. Контролируемые параметры: частота вращения; усилие натяжения ткани; температура; число витков тела намотки [2].

Натяжение ткани, наматываемой на оправку, фиксируется тензодатчиком фирмы «Siwagex R» (Нидерланды) по разработке фирмы «Siemens». Датчик воспринимает силу реактивного момента от рычага, закрепленного на мотор-редукторе, балансируно подвешенном на консоли вала привода оправки. Мотор-редуктор состоит из асинхронного электродвигателя 1ММ71В4УЗ мощностью 0,37 кВт и червячного редуктора 7Ч-М-70-70, изменяющих частоту вращения от 0 до 20 мин<sup>-1</sup>.

Установка состоит из блоков размотки, пропитки и намотки ткани на формообразующую оправку. Работает установка следующим образом. На ведомый вал блока размотки устанавливается рулон ткани (шпуля), ткань про-



пускается через вальцы пропитки и затем наматывается на оправку. Технологическое натяжение ткани создается окружной силой от крутящего момента на оправке. Для изменения силы натяжения используется дисковый тормоз, расположенный на валу разматываемой шпули с тканью.



Рис. 1. Установка радиальной намотки

При намотке ткани на оправку определенного радиуса неизбежно создается крутящий момент  $M_k$  на оправке, зависящий от величины силы  $F_{mk}$  натяжения ткани

$$M_k = F_{mk} \cdot r \approx F_{mk} \cdot \frac{d}{2}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус намотки ткани;  $d$  – диаметр заготовки.

Изменение натяжения ткани вызывает изменение уплотнения волокнистого наполнителя и объемного содержания волокон в композиционном материале, так как сила натяжения ткани  $F_{mk}$  вызывает давление  $q$  на оправку

$$q = \frac{n \cdot F_{mk}}{r \cdot b},$$

где  $n$  – количество намотанных слоев;  $b$  – ширина ткани.

Повышенная прочность намотанных пластиков во многом связана с созданием предварительного натяжения волокон. Для обеспечения стабильности укладки армирующего полотна и выбора скоростного режима намотки необходимо изучение физических особенностей движения установки применяемой конструкции.

В начале движения при трогании с места момент трения, создаваемый тормозом, изменяется скачкообразно. Связано это явление с особенностями трения покоя и трения движения (переходом коэффициента сцепления в ко-

эффицент граничного трения), а также и с динамикой работы валов с промежуточной упругой связью (рис. 2).

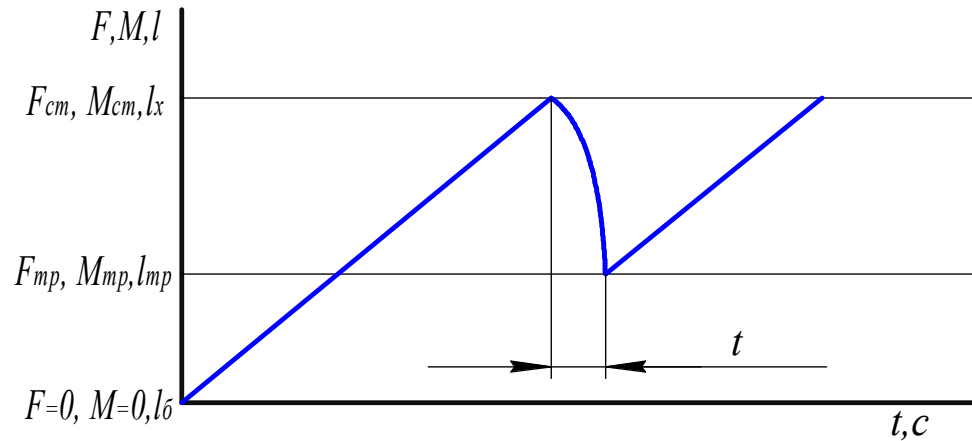


Рис. 2. Изменение технологических параметров процесса:  
 $F_{cm}, M_{cm}, l_{cm}$  – сила натяжения ткани, момент от силы натяжения и удлинение ткани при страгивании ведомого вала;  
 $F_{mp}, M_{mp}, l_{mp}$  – то же, соответственно при остановке ведомого вала,  
 $l_b$  – длина не растянутой ткани

Система из состояния покоя переходит в ускоренное движение. Натяжение и удлинение армирующей ткани при этом достигает максимальных значений. Крутящий момент на ведомом валу увеличивается пропорционально усилию натяжения ткани до величины, соответствующей моменту страгивания. После этого происходит поворот ведомого вала на некоторый угол  $\phi$ , и за время движения  $t$  ведомого вала удлинение ткани  $l_x$  снижается на величину  $r\phi$ . Момент на ведомом валу, создававшийся усилием натяжения армирующей ткани, из-за ее укорачивания становится меньше момента трения, установленного сжатием тормозных дисков, и происходит остановка вала. Исключить нежелательные рывки ткани при разгоне и низкой скорости возможно, если задать скорость намотки такой, чтобы не происходило остановок вала, а именно: если скорость намотки ткани на формообразующую оправку будет выше скорости изменения момента, создаваемого усилием натяжения ткани от величины момента страгивания  $M_{cm}$  до величины трения  $M_{mp}$ .

Момент на ведомом валу  $M_x$ , создаваемый силой натяжения ткани, определялся из выражения

$$M_x = kr(l_x - r\phi) , \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности упругого растяжения ткани, Н/м;  $l_x = l_p - l_b$  – прирост длины ткани при ее растяжении, м;  $l_p$  – длина после растяжения ткани, м;  $l_b$  – длина нерастянутой ткани, м.



При этом сделаны следующие допущения: растяжение ткани пропорционально силе натяжения, а угловая скорость ведущего вала не зависит от усилия намотки, а момент трения, создаваемый тормозом, изменяется скачкообразно.

Вращение ведомого вала для данной установки определяется уравнением движения валов с промежуточной упругой связью

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_x - M_{mp}, \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции ведомого вала;  $\varphi$  – угол поворота ведомого вала;  $M_x$  – момент, создаваемый силой натяжения ткани  $F_{mk}$ ;  $M_{mp}$  – момент трения, создаваемый тормозом.

Подставляя (2) в уравнение (3), после приведения получим

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{kr^2}{J} \phi = \frac{kl_x r_x - M_{mp}}{J}. \quad (4)$$

Имеем дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами и правой частью, общее решение которого складывается из общего решения соответствующего уравнения без правой части и частного решения с правой частью.

Для угла поворота  $\varphi(t)$  и угловой скорости  $\omega(t)$  ведомого вала установки решениями данного уравнения являются выражения

$$\phi(t) = \frac{kl_x r - M_{mp}}{kr^2} \left(1 - \cos\left(rt \sqrt{\frac{k}{J}}\right)\right), \quad (5)$$

$$\omega(t) = \frac{kl_x r - M_{mp}}{kr^2} r \sqrt{\frac{k}{J}} \sin\left(rt \sqrt{\frac{k}{J}}\right).$$

Для исключения рывков и неустойчивости натяжения ткани, влияющих на структурообразование ПКМ, необходимо обеспечивать положительную разность между крутящим и тормозным моментом ведомого вала

$$M_k - M_{mp} \geq 0.$$

Критическая линейная скорость намотки ткани, при которой не будет рывков ткани и остановок ведомого вала, определяется из выражения

$$V_{np} = \frac{M_{cm} - M_{mp}}{\sqrt{kJ}}, \quad (6)$$

где  $M_{cm}$  – момент трения тормоза при страгивании с места.

Из формулы (6) следует, что предельная (критическая) скорость протяжки тканевой ленты зависит от конструкции тормоза, упругих свойств ткани (параметр  $k$ ), инерционных свойств ведомого вала. Величина момента инерции ведомого вала установки для данной установки  $J = 3,337 \times 10^{-2}$  кг·м<sup>2</sup>.

На рис. 3 представлены графики изменения моментов трения и страгивания в зависимости от силы натяжения при работе использованной установки, определенные экспериментально.

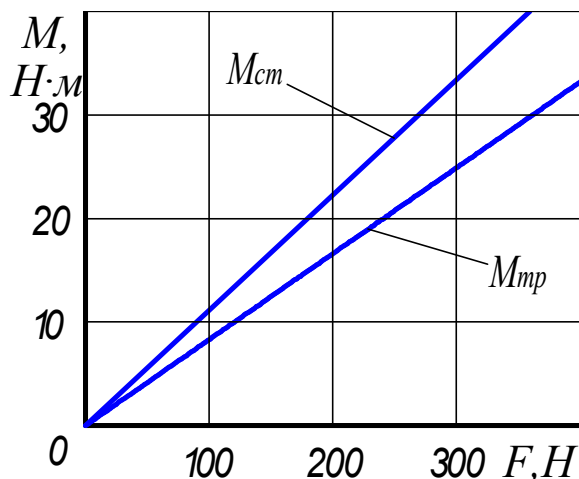


Рис. 3. Изменение моментов трения ( $M_{тр}$ ) и страгивания ( $M_{ст}$ ) от силы натяжения тканей при работе экспериментальной установки

При обработке технологии намотки в данной работе применялись хлопчатобумажные ткани полотняного плетения. Выбор природных тканей данного вида определяется их широким применением в различных антифрикционных ПКМ. Эти ткани имеют высокую адгезию с эпоксидным связующим и характеризуются широким диапазоном изменения деформационно-прочностных свойств, обладают высоким маслопоглощением, низким коэффициентом трения, низкой стоимостью и доступностью, что немаловажно при использовании их в конструкциях подшипников скольжения для массового применения. Волокна имеют развитую поверхность, что обеспечивает большую площадь пропитки ткани и большую силу сцепления волокон со связующим после отверждения. Исследования проводились для трех видов ткани: плотной, средней и низкой плотности (см. таблицу).

Использованные для армирования ткани имели различные разрывные нагрузки, зависевшие от природы волокон, диаметров, крутки и типов переплетений нитей. Для сравнения различных тканей между собой был введен коэффициент натяжения ткани  $K_n$ , равный отношению действующей силы натяжения  $F_n$  к разрывной нагрузке  $F_{разр}$  конкретного полотна:  $K_n = F_n / F_{разр}$ .

Было установлено, что при степени натяжения ткани  $K_n = 0,6$  величина момента страгивания приближалась к разрывной силе для используемых тканей, поэтому для проведения исследований ограничили диапазон степени натяжения тканей от  $K_n = 0,05$  до  $K_n = 0,5$ .



Характеристики армирующих хлопчатобумажных тканей

Параметры тканей	Виды тканей по степени плотности		
	плотная	средней плотности	низкой плотности
Наименование	Тик С38-БЮ	Бязь ГОСТ 10183-93	Мадаполам С5-ТИ ГОСТ 29298-92
	1	2	3
Линейная плотность нити, текс	54/52	32/28	18/20
Плотность ткани, нить/10 см	189/154	217/125	255/119
Линейная плотность ткани, г/м	18,8	10,7	7,5
Поверхностная плотность ткани, г/м <sup>2</sup>	188	107	75
Относительная плотность, %	55/44	48/26	43/21
Объемное заполнение волокон, %	55,9	42,7	42,7
Разрывная нагрузка, Н	490,5	329,4	294,3

Плотная хлопчатобумажная ткань полотняного плетения характеризовалась большим удлинением по сравнению с двумя другими тканями, имела минимальное значение коэффициента пропорциональности упругого растяжения и для нее требовалась большая скорость намотки, обеспечивающая стабильность натяжения по сравнению с тканями средней и малой плотности. Зависимости удлинения ткани от силы натяжения были получены на машине WDW (рис. 4, а). Зависимость критической линейной скорости для плотной ткани (рис. 4, б) позволила определить минимальную величину окружной скорости намотки – с  $V_{пр} = 0,05$  м/с, обеспечивавшей стабильное натяжение при намотке всех трех видов армирующих хлопчатобумажных тканей во всем диапазоне изменения коэффициентов натяжения. Эта скорость была принята постоянной для изготовления всех экспериментальных образцов.

Так как входных параметров процесса достаточно много, то исследование влияния технологических факторов на структуру армированных ПКМ и их свойства было решено разделить на ряд последовательных этапов, используя системный подход в решении задачи создания технологии намотки [1]. На первых стадиях изучения процесса применялось простое планирование экспериментов, сохраняя постоянными входные параметры, определенные по априорной информации – состав компаунда, вид армирующей ткани, геомет-

рические размеры изделий. Основными варьируемыми факторами являлись натяжение ткани, скорость и температура формирования изделий.

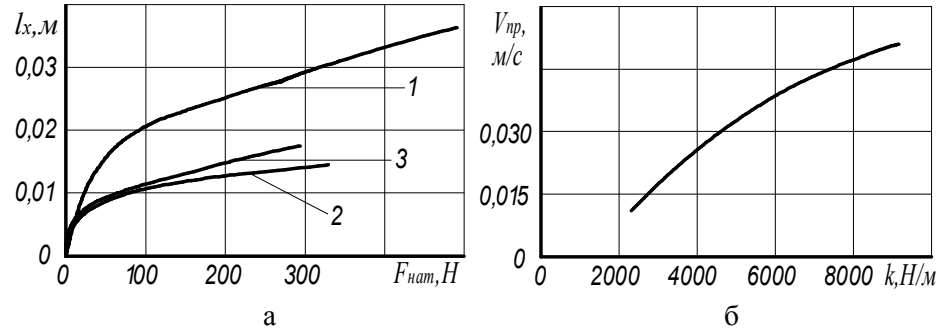


Рис. 4. Зависимость удлинения ткани от силы натяжения:

а 1 – плотная ткань, 2 – ткань средней плотности, 3 – ткань низкой плотности;  
б – зависимость линейной скорости движения плотной ткани от коэффициента растяжения ткани  $k$

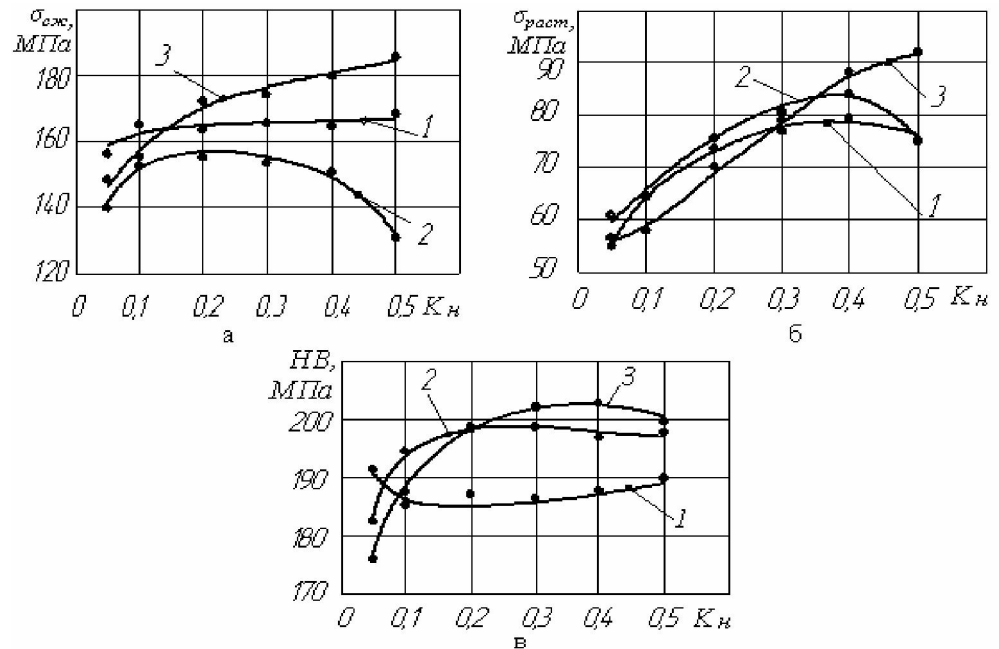


Рис. 5. Влияние степени натяжения ткани на механические свойства ПКМ:

а – напряжения растяжения; б – напряжения сжатия; в – твердость. Виды тканей:  
1 – плотная; 2, 3 – средней и низкой плотности





На первых этапах исследований в качестве связующегося использовался разработанный ранее эпоксиэфторопластовый компаунд МАС – материал антифрикционный самосмазывающийся, разработанный ранее в нашем университете [1]. Состав компаунда оставался постоянным: смола эпоксиэфторопластовая ЭД-20 – 73 масс. %; политетраэфторэтилен Ф-4 – 15 масс. %; дисульфид молибдена ДМИ-7 – 7 масс. %; коллоидно-графитовый материал ГС-1 – 5 масс. %. Компаунд полимеризовался отвердителем полиэтиленполиамином (ПЭПА), добавлявшимся в пропорции 10:1 масс. %.

Геометрические размеры получаемых образцов армированных эпоксиэфторопластов (АЭФ) были приняты также постоянными ( $D \times d = 57 \times 50$  мм,  $b = 50$  мм) [2].

Физико-механические показатели АЭФ определялись по известным методикам [3].

Проведено исследование влияния силы натяжения тканей при изготовлении намоткой на основные физико-механические свойства ПКМ при постоянной скорости намотки  $V = 0,05$  м/с, выбранной из условия обеспечения стабильности натяжения данных тканей при прочих равных условиях (рис. 5).

Анализ полученных результатов свидетельствует, что характер зависимостей механических свойств получаемых армированных эпоксиэфторопластов (АЭФ), как и предполагалось, во многом определяется не только натяжением, но и видом тканей, применявшихся для армирования в конкретных случаях. Для тканей различных плотностей имеются определенные зоны оптимальных натяжений – 30–50 % от разрывной нагрузки. В целом более высокими физико-механическими свойствами обладают АЭФ при армировании тканью низкой плотности даже при более низком объемном содержании волокна в структуре АЭФ по сравнению с использованием тканей средней и высокой плотности.

Дальнейшие триботехнические испытания показали, что лучшими антифрикционными свойствами обладают АЭФ, армированные тканями средней плотности.

## Выводы

1. Для получения высококачественных армированных ПКМ требуется анализ всех значимых технологических факторов, определяющих процесс.
2. Для различных габаритных размеров изделий необходимо использование программирования технологических параметров (в зависимости от ее вида ткани – натяжения, скорости намотки, числа витков, температуры компаунда), что позволяет промышленный контроллер системы управления технологической установкой.

Работа выполнена в рамках инвестиционного проекта (тема № 15-И-23) и целевой инвестиционной программы № П1733.



### Библиографические ссылки

1. *Иванов В. А., Ри Хосен.* Прогрессивные самосмазывающиеся материалы на основе эпоксидфторопластов для триботехнических систем. Владивосток; Хабаровск, 2000.
2. *Захарычев С. П., Иванов В. А.* Разработка установки радиальной намотки для изготовления армированных полимерных композиционных материалов // Вестник ТОГУ. 2008. № 1(8).
3. *Композиционные материалы: справочник / под ред. Д. М. Карпиноса.* Киев, 1985.
4. *Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976.