

УДК 677.4.027.62

ПРОПИТКА ТКАНЫХ ПОЛОТЕН ИЗ ХИМИЧЕСКИХ НИТЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Н. Ясинская*, В.В. Мурычева*, К.Э. Разумеев**

*Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь,

**Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технология. Дизайн. Искусство), Москва

Текстильным композиционным материалом называют материал, состоящий из двух и более компонентов, сформированный на базе текстильных технологий в единую структуру, физико-механические свойства которого отличаются от свойств составляющих компонентов. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, разработана комплексная математическая модель кинетики пропитки текстильных материалов водными дисперсиями и растворами полимерных связующих различного состава, позволяющая определять рациональные режимы формирования текстильных композиционных материалов в зависимости от их геометрических характеристик, а также физико-химических свойств связующего.

Анализ всевозможных видов композитов различного назначения, в которых одним из составляющих компонентов является текстильный материал – волокно, пряжа (нить), ткань, трикотаж, нетканый материал, – позволил выделить в отдельную группу текстильные композиционные материалы. Текстильным композиционным материалом называют материал, состоящий из двух и более компонентов, сформированный на базе текстильных технологий в единую структуру, физико-механические свойства которого отличаются от свойств компонентов.

Одним из способов, позволяющих формировать структуру текстильного композиционного материала, является пропитка тканых полотен растворами или водными дисперсиями полимерных связующих с последующей сушкой и термофиксацией на стадии заключительной отделки [1]. Способ может быть реализован на существующем оборудовании, в частности, на сушильно-ширильных линиях, установленных на отделочных фабриках текстильного производства.

Качество текстильных композиционных материалов определяется однородностью структуры. Именно поэтому одной из основных операций технологического процесса является пропитка волокнистого материала полимерным связующим.

Целью данного исследования является разработка комплексной математической модели кинетики пропитки текстильных материалов водными дисперсиями полимерных связующих различного состава. Такая модель позволит определять рациональные режимы формирования текстильных композиционных материалов в зави-

симости от их геометрических характеристик, а также физико-химических свойств связующего.

Объектами исследования является тканое полотно из комплексных вискозных нитей и полимерное связующее на основе стиролакрилатной водной дисперсии, свойства которых представлены в табл. 1 и 2. Вопросы пропитки текстильных материалов широко освещены в работах [2-5].

От скорости, полноты и равномерности пропитки зависит качество готового материала. На полноту и кинетику пропитки влияют свойства волокнистого материала, полимерного связующего и условия проведения процесса. Для практических расчетов скорости самопроизвольного проникновения связующего в капиллярно-пористые системы наибольшее распространение получило уравнение Волковой – Госкинса – Уошберна [3, 6]:

$$\frac{dh}{d\tau} = \left(\frac{\sigma r \cos \theta}{4\eta h} \right),$$

интегрируя которое, получим

$$\frac{h^2}{\tau} = \frac{\sigma \cos \theta}{2\eta} \cdot r$$

где r – радиус капилляра, м.

Согласно данным экспериментальных исследований [3] при пропитке ткани происходит заполнение пор и капилляров диаметром более 10-15 мкм. Быстрее всего полимерное связующее проникает в поры между нитями основы и утка (сквозная пористость), медленнее – в межволоконное пространство. Нити основы и утка вследствие механических воздействий расплющивают-

Таблица 1. Свойства тканого полотна текстильного композиционного материала и з комплексных вискозных нитей

| Параметр | Комбинированное переплетение на базе репса 4/4 | Креповое переплетение |
|---|--|-----------------------|
| Линейная плотность нитей, текс | | |
| основы | 195.0 | |
| утка | 390.0 | |
| Ширина суровой тканой основы, см | 282.4 | |
| Плотность, нит/10 см: | | |
| по основе | 80.0 | 85.0 |
| по утку | 62.0 | 62.0 |
| Поверхностная плотность, г/м ² | 410.0 | 417.0 |
| Разрывная нагрузка, Н | | |
| по основе | 1396.0 | 1678.0 |
| по утку | 1970.0 | 1346.0 |
| Разрывное удлинение, % | | |
| по основе | 21.7 | 5.2 |
| по утку | 17.9 | 11.8 |
| Стойкость к истиранию, циклы | 1000.0 | 890.0 |

Таблица 2. Свойства полимерного связующего для формирования текстильного композиционного материала

| Показатель | Значение показателя |
|---|--|
| Состав | Дисперсия стиролакрилата самосшивающая |
| Внешний вид | Низковязкая дисперсия белого цвета |
| Ионогенность | Анионоактивная |
| pH | 4-6 |
| Растворимость | Смешивается с холодной и теплой (до 50 °С) водой в любом соотношении |
| Рекомендации по хранению | Не менее 6 мес при температуре от 5 до 40 °С |
| Гриф | Жесткий |
| Морозостойчивость | Неморозостойкий |
| Устойчивость к стирке и химической чистке | Устойчив к стирке и химической чистке |

ся, изменяются размер пор и геометрическая форма – они принимают форму щели [4].

Тогда, согласно теории гидродинамики жидкостей [7] для определения скорости заполнения пор, образуемых между нитями основы и утка, используем следующее уравнение:

$$\frac{h^2}{\tau} = \frac{\sigma \cos \theta}{2\eta} \frac{2S}{P} = \frac{\sigma \cos \theta}{\eta} \frac{S}{P}, \quad (1)$$

где S – площадь капилляра (поры), м²; P – периметр капилляра (поры), м, откуда получим

$$h^2 = \frac{\sigma \cos \theta}{\eta} \frac{S}{P} \tau.$$

При пропитке пряжи и нитей, а также тканей с разреженной структурой целесообразно использовать кинетическое уравнение движения полимерного связующего [2, 3]:

$$h^2 = 2k_f \tau \frac{S_0}{P_R^2} \sigma \cos \theta, \quad (2)$$

где k_f – коэффициент фильтрации полимерного связующего в текстильном материале; S_0 – удельная поверхность волокон или элементарных нитей; P_R – пористость пряжи или нити.

Коэффициент фильтрации равен

$$k_f = \frac{k}{\eta} = \frac{P_R d^2}{\eta}, \quad (3)$$

где k – коэффициент проницаемости, равный площади поперечного сечения капилляра, м²; d – средний диаметр пор (капилляров), м; η – вязкость полимерного связующего, Па·с.

Удельная поверхность волокна или элементарной нити длиной l равна $\pi d_b l$, тогда удельная поверхность всех волокон или нитей в объеме материала

$$S_0 = \pi d_b L, \quad (4)$$

где L – длина волокон (филаментов) в объеме пряжи или нити, м.

Так как масса пряжи или нити равна массе волокон или филаментов в определенном объеме

$$\delta V_0 = \frac{\pi d_b^2}{4} \gamma L, \quad (5)$$

длина волокон (филаментов) в объеме пряжи или нити равна

$$L = 4 \frac{\delta}{\pi d_b^2}. \quad (6)$$

Таблица 3. Интервалы и уровни варьирования факторов

| Фактор | Обозначение | Уровни варьирования | | | Интервал варьирования |
|----------------------------------|-------------|---------------------|-----|-----|-----------------------|
| | | -1 | 0 | +1 | |
| Концентрация стиролакрилата, г/л | X_1 | 100 | 300 | 500 | 200 |
| Температура импрегнирования, °C | X_2 | 20 | 40 | 60 | 20 |

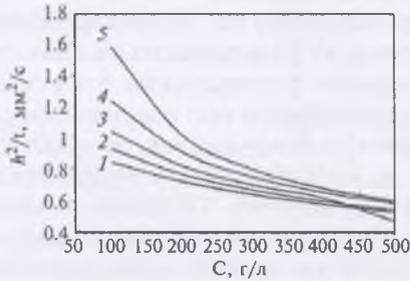


Рис. 1. Кинетика пропитки тканого полотна крепового переплетения дисперсией полимерного связующего при различной температуре (в °C): 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50; 5 – 60.

Пористость пряжи или нити может быть выражена как отношение их объемной плотности к плотности волокна (филамента). С учетом выражений (2)-(6) кинетическое уравнение пропитки пряжи или нитей

$$\frac{h^2}{\tau} = 8d^2 \frac{(1-P_R)}{P_R} \frac{1}{d_b} \frac{\sigma \cdot \cos}{\eta} \quad (7)$$

где d – диаметр капилляра (поры), м; d_b – диаметр волокна (филамента), м.

Анализ кинетики самопроизвольной пропитки текстильных материалов позволил установить зависимость высоты и скорости поднятия полимерного связующего от пористости и геометрических параметров текстильного материала. Однако не учитывается влияние изменения физико-химических свойств полимерных связующих, используемых при формировании композиционного материала, в зависимости от условий пропитки. Поэтому целью дальнейших исследований является получение комплексной математической модели зависимости параметров процесса пропитки от структурных свойств текстильного материала, физико-химических свойств полимерного связующего и условий формирова-

ния текстильного композиционного материала.

В результате экспериментальных исследований для водных дисперсий полимерных связующих, используемых при формировании текстильных композиционных материалов, получены математические модели зависимости свойств композиции (поверхностное натяжение σ , краевой угол смачивания θ и вязкость η) от температуры пропиточной ванны и концентрации стиролакрилата в полимерной композиции. Минимальное и максимальное значения концентрации дисперсии стиролакрилата выбраны согласно данным на препарат, представленным документацией фирмы-производителя. Минимальная температура обусловлена температурным режимом в производственном помещении, где проводится эксперимент, максимальная обусловлена также рекомендациями фирмы-производителя дисперсии стиролакрилата: повышение температуры импрегнирования в пропиточной ванне более 60 °C приведет к астабилизации и коагуляции препарата.

Математические модели, описывающие зависимость свойств полимерной композиции от температуры пропитывания и концентрации дисперсии стиролакрилата, представлены ниже:

$$\sigma = 58.07 + 0.054c - 0.5t,$$

$$\theta = 21.0 + 0.03c - 0.2t,$$

$$\eta = 1.55 - 0.004c - 0.024t,$$

где σ – поверхностное натяжение, Н/м; θ – краевой угол смачивания, град; η – вязкость, Па·с.

В качестве объектов исследования процесса пропитки использованы тканые полотна из вискозных нитей двух переплетений (табл.1).

Анализ самопроизвольной пропитки тканого полотна крепового переплетения проведем, используя уравнение (1). Подставляя указанные выше математические модели физико-химических свойств водной дисперсии стиролакрилата в уравнение (1), получим зависимость высоты и скорости капиллярного поднятия от концентрации полимерного связующего и температуры про-

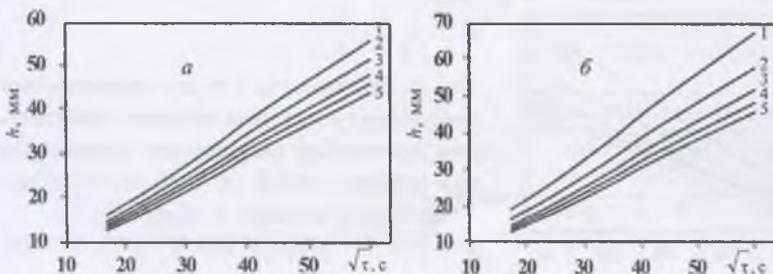


Рис. 2. Зависимость h от $\sqrt{\tau}$ для пропитки тканого полотна крепового переплетения дисперсией полимерного связующего при температуре 20 (а) и 60 (б) °C и различной концентрации (в г/л): 1 – 100; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 400; 5 – 500.

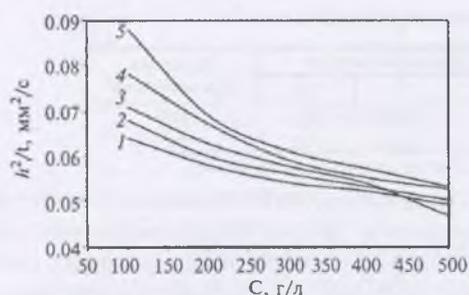


Рис. 3. Кинетика пропитки тканого полотна просвечивающего переплетения дисперсией полимерного связующего при различной температуре (в °С):

1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50; 5 – 60.

питочной ванны – формулы (8) и (9) (Приложение).

Площадь поперечного сечения S и периметр P сквозных пор для тканого полотна крепового переплетения из вязкозных нитей находятся по формулам $P = 2a + 2b$ и $S = ab$.

Графические зависимости скорости пропитки и высоты капиллярного поднятия от концентрации C и температуры t пропиточной ванны представлены на рис.1 и 2.

В результате анализа математических моделей (8) и (9) и графических зависимостей, представленных на рис.1 и 2, можно сделать следующие выводы:

- с увеличением концентрации полимерного связующего высота и скорость капиллярного поднятия уменьшаются;

- максимальное значение высоты подъема полимерного связующего при этом уменьшается;

- скорость пропитки при концентрации полимерной дисперсии 100-200 г/л возрастает в 1.5-2 раза при повышении температуры пропиточной ванны до 60 °С, в то время как при концентрации 300-500 г/л скорость пропитки практически не зависит от температуры;

- максимальная высота капиллярного поднятия водной дисперсии связующего при концентрации 400-500 г/л практически не зависит от температуры пропиточной ванны;

- чем больше щелевидное сечение сквозной поры (больше периметр поры), тем меньше скорость капиллярного поднятия полимерного связующего.

Незначительное влияние температуры на высоту и скорость капиллярного поднятия связующе-

го объясняется незначительным изменением пропитывающих свойств (вязкости, поверхностного натяжения, смачивания) низковязкой водной дисперсии полимера в зависимости от температуры. Кроме того, можно предположить, что при высоких концентрациях полимерной дисперсии частицы дисперсной фазы сорбируются волокном, что препятствует ее продвижению по порам и капиллярам.

При пропитке разреженных тканых полотен просвечивающего переплетения происходит заполнение капилляров и пор комплексных нитей, поэтому используем кинетическое уравнение (7), учитывающее пористость нити и диаметр составляющих ее филаментов. Подставляя математические модели зависимости физико-химических свойств водной дисперсии стиролакрилата, получим: формулы (10) и (11) (Приложение).

Для расчета значений высоты и скорости подъема полимерного связующего использованы следующие характеристики химических комплексных нитей:

- среднее значение пористости $P_r = 0.6$ [8],
- среднее значение диаметра капилляров $d = 20-30$ мкм [9];
- диаметр волокна $d_b = 15-20$ мкм.

Анализируя математические модели (10) и (11), а также графические зависимости, представленные на рис.3 и 4, можно сделать следующие выводы:

- характер зависимостей $h(\tau)$ и $\frac{dh}{d\tau}(\tau)$ одинаковый для тканых полотен крепового и просвечивающего переплетения с разреженной структурой;
- при заполнении капилляров и пор меньшего размера между филаментами комплексной нити в ткани просвечивающего переплетения скорость пропитки ниже, чем при заполнении сквозных пор большего размера в ткани крепового переплетения;
- максимальная высота подъема полимерного связующего и требуемое для этого время при капиллярах большего размера меньше, чем в случае капилляров с меньшей площадью сечения;
- с увеличением пористости комплексной нити скорость пропитки уменьшается.

С целью проверки адекватности комплексных математических моделей (8)-(11) в табл.4 сравниваются расчетные и экспериментальные

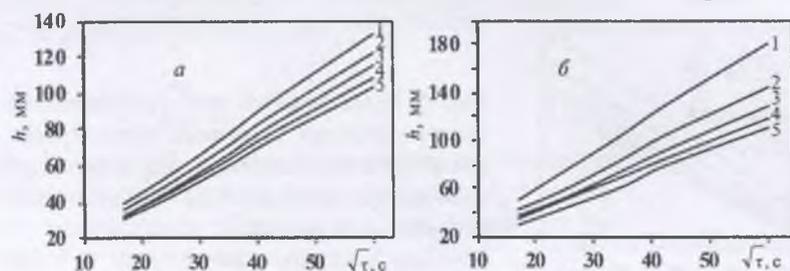


Рис. 4. Зависимость h от $\sqrt{\tau}$ для пропитки тканого полотна просвечивающего переплетения дисперсией полимерного связующего при температуре 20 (а) и 60 (б) °С и различной концентрации (в г/л):

1 – 100; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 400; 5 – 500.

Таблица 4. Экспериментальные и расчетные значения максимальной высоты подъема полимерного связующего в тканых полотнах из вискозного волокна

| Пористость, % | | Размер пор $\frac{S, \text{м}^2}{P, \text{м}}$ | Высота подъема связующего за 30 мин, м | | | | Относительная погрешность, % |
|--|----------------|---|--|---------|---------|---------|------------------------------|
| нити | сквозная ткани | | эксперимент | | расчет | | |
| | | | 100 г/л | 500 г/л | 100 г/л | 500 г/л | |
| <i>Просвечивающее комбинированное переплетение</i> | | | | | | | |
| 60 | 11.7 | $\frac{2.35 \cdot 10^{-7}}{1.94 \cdot 10^{-3}}$ | 0.097 | 0.072 | 0.09357 | 0.07787 | 3.5/8.1 |
| <i>Креповое переплетение</i> | | | | | | | |
| 60 | 10.4 | $\frac{0.195 \cdot 10^{-7}}{1.78 \cdot 10^{-3}}$ | 0.062 | 0.043 | 0.05813 | 0.04529 | 6.2/5.3 |

значения высоты подъема полимерного связующего в тканых полотнах различной пористости.

При экспериментальных исследованиях в качестве объектов выбраны тканые полотна, используемые при формировании текстильных композиционных материалов способом пропитки, геометрические характеристики которых представлены в табл.4. Условия проведения эксперимента были следующими: температура 20 °С, концентрация водной дисперсии стиролакрилата 100 и 500 г/л. Высота капиллярного поднятия связующего определялась согласно ГОСТ 29104.11–91

Сравнение расчетных и экспериментальных значений высоты капиллярного поднятия полимерного связующего подтверждает возможность использования комплексных математических моделей (8)–(11) для анализа процесса самопроизвольной пропитки тканых полотен простых переплетений с достаточной для технологических расчетов точностью.

– Разработана комплексная математическая модель кинетики пропитки текстильных материалов водными дисперсиями и растворами полимерных связующих различного состава, позволяющая определять рациональные режимы формирования текстильных композиционных материалов в зависимости от их геометрических характеристик, а также физико-химических свойств полимерного связующего.

– Установлена зависимость высоты и скорости поднятия полимерного связующего от пористости и геомет-

рических параметров текстильного материала.

– Получены математические модели зависимости свойств полимерной композиции (поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, вязкость) от температуры пропиточной ванны и концентрации стиролакрилата в полимерной композиции.

Библиографический список

1. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.., Коган А.Г. Композиционные текстильные материалы монография. – Витебск: ВГУ, 2016. – 299 с.
2. Трецалин Ю.М. Композиционные материалы на основе нетканых полотен. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2015. – 220 с.
3. Воюцкий С. С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров. – М.: Химия, 1969. – 336 с.
4. Браславский В.А. Капиллярные процессы в текстильных материалах. – М.: Легпромбытиздат, 1987. – 112 с.
5. Трецалин Ю.М. Анализ структуры и свойств нетканых материалов. – М.: Изд. БОС, 2016. – 192 с.
6. Иманкулова А.С. Текстильные композиты. – Бишкек: МОК, 2005. – 152 с.
7. Гусев В.П. Основы гидравлики: учебное пособие. – Томск, изд. ТПУ, 2009. – 172 с.
8. Ясинская Н.Н., Бизюк А.Н., Разумеев К.Э. // Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. 2018. № 6 (378). – С.273-277
9. Бизюк А.Н., Жерносек С.В. и др. // Изв. вузов. Технол. лег. пром-сти. 2014. Т.23. № 1. – С.16-18.

Приложение

$$h = \sqrt{\frac{(58.1 + 0.054c - 0.5t) \cdot \cos(21.0 + 0.03c - 0.2t) \cdot S \tau}{(1.54 - 0.004c - 0.024t) P}} \tag{8}$$

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(58.1 + 0.054c - 0.5t) \cdot \cos(21.0 + 0.03c - 0.2t) \cdot S}{(1.54 - 0.004c - 0.024t) P}} \cdot \tau^{-1/2} \tag{9}$$

$$h = \sqrt{8d^2 \frac{(1 - P_n)}{P_n} \frac{1}{d_b} \frac{(58.1 + 0.054c - 0.5t) \cdot \cos(21.0 + 0.03c - 0.2t)}{1.54 - 0.004c - 0.024t} \tau} \tag{10}$$

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{2} \sqrt{8d^2 \frac{(1 - P_n)}{P_n} \frac{1}{d_n} \frac{(58.1 + 0.054c - 0.5t) \cdot \cos(21.0 + 0.03c - 0.2t)}{1.54 - 0.004c - 0.024t} \tau^{-1/2}} \tag{11}$$