

УДК 677.027

В.В. СЫС

Херсонский национальный технический университет

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОПИТЫВАЮЩЕГО СОСТАВА В СТРУКТУРЕ АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ

В работе выполнена оценка содержания пропитывающего состава отдельно в межнитевом и межволоконном пространствах, а также на внешних поверхностях нитей. Сопоставлены результаты теоретического моделирования структуры ткани и практических рекомендаций по реализации процесса пропитки от фирмы-производителя. Это позволило выявить резервы совершенствования процесса пропитки в части обеспечения минимально необходимого количества пропитывающего состава в структуре ткани.

Ключевые слова: процесс пропитки, структура ткани, межнитевое пространство, межволоконное пространство, моделирование.

V.V. SYS

Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

ESTIMATES OF THE DISTRIBUTION OF IMPREGNATING COMPOSITION IN THE PORE STRUCTURE OF REINFORCING FABRIC

Abstract

The work carried out to assess the content of the impregnating composition separately in interthread and interfiber spaces, as well as the outer surfaces of the filaments. Compared the results of theoretical modeling of tissue structure and practical recommendations for the implementation of the impregnation process by the manufacturer. It revealed reserves of impregnation process improvement in terms of ensuring a minimum quantity of impregnating composition to the fabric structure.

Keywords: impregnation process, fabric structure, interthread space, interfiber space, modeling.

Введение

В настоящее время существует проблема совершенствования пропитки армирующей ткани пропитывающего состава при производстве композиционных материалов. Работа посвящена одному из аспектов этой проблемы, а именно – оценке распределения пропитывающего состава по структурным уровням ткани. Рассматривается два уровня – уровень нити и волокна, поровое пространство которых заполняет пропитывающий состав. Кроме того, выполнена оценка количества той части пропитывающего состава, которая находится на внешней поверхности нитей. Анализ распределения пропитывающего состава в межнитевом, межволоконном поровом пространстве и на внешней поверхности нитей в структуре ткани является основой для поиска новых подходов к совершенствованию процесса пропитки.

Постановка проблемы

Поставим задачу оценки распределения объема порового пространства между нитями и волокнами в структуре ткани на основе моделей, построенных автором ранее. Решение этой задачи позволяет, с одной стороны, убедиться в правильности подходов к построению модели, а, с другой стороны, – наметить основные принципы разрабатываемых способов совершенствования процесса пропитки ткани.

Для оценки распределения пропитывающего состава требуется знание структуры ткани. Однако, ввиду малых геометрических размеров межнитевых, и, особенно, межволоконных пор, оценка распределения чисто экспериментальным путем затруднена. В этих условиях выходом является моделирование структуры ткани на уровнях нитей и волокон с последующим изучением свойств полученной модели.

Существующие в настоящее время средства моделирования структуры ткани имеют в основном коммерческое назначение, и поэтому, как правило, чрезмерно сложны и универсальны [1-3]. Но главным их недостатком является недоступность алгоритма работы для пользователя.

Поэтому в предыдущих публикациях, которые в настоящее время находятся в печати, автором построены простые и прозрачные модели порового пространства армирующей арамидной ткани саржевого переплетения 2/2, образованного плоскими нитями. Одна из моделей отражает форму и размеры межнитевого порового пространства, другая – межволоконного порового пространства.

Модель межнитевого порового пространства базируется на построении формы профиля упругой изогнутой нити, защемленной в местах перехода с одной стороны ткани на другую боковыми гранями перпендикулярных ей нитей. Профиль нити описывается сплайн-аппроксимацией точек защемления

отрезками кубических полиномов (рис. 1). Линия, которую описывает сплайн-функция, напоминает по форме гибкую линейку, защемленную в узловых точках [4].

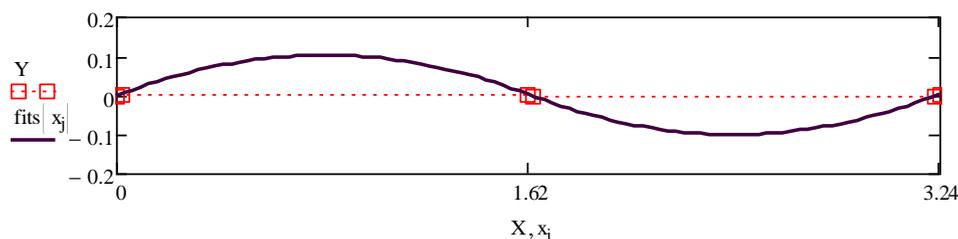


Рис. 1. Профиль нити, полученный в результате сплайн-аппроксимации точек её защемления

Моделирование выполнено в среде универсальной математической системы Mathcad 14 [5]. Результатом моделирования является трехмерная модель единичного компонента порового межнитевого пространства ткани, представленная на рис. 2. Модель компонента состоит из двух одинаковых элементов, состыкованных основаниями, причем нижний элемент повернут относительно вертикальной оси на 90°.

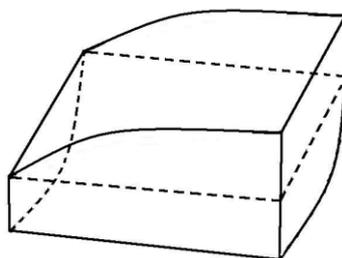


Рис. 2. Форма элемента межнитевого порового пространства ткани

Модель межволоконного порового пространства плоской нити представляет собой часть увеличенного поперечного сечения нити с распределенными на ней контурами сечений волокон в виде окружностей с учетом их случайного смещения относительно исходного регулярного расположения. Межволоконное поровое пространство в этой модели изображается площадью контура сечения нити за вычетом суммарной площади контуров сечения волокон. По результатам моделирования построена гистограмма распределения межволоконных промежутков по размерам, определенным как расстояния между контурами сечения волокон вдоль вертикальных линий, равномерно проведенных по всей ширине модели с относительно малым шагом.

Обе модели построены по результатам многочисленных наблюдений с использованием микроскопов МБС-1 и Optika B-192PLi структуры армирующей ткани, пропитанной затвердевшим составом.

Цель работы заключается в том, чтобы, используя построенные ранее модели автора, получить количественную оценку объема порового пространства исследуемой ткани на межнитевом и межволоконном уровнях, а также оценку массы состава, заполняющего поровое пространство и внешней поверхности нитей.

Основные результаты исследований

Все необходимые исходные данные для расчетов, полученные в результате наблюдений и анализа информационных источников, сведены в табл. 1.

Выполним оценку величины межнитевого порового пространства ткани. Для этого сначала определим площадь S_n под кривой профиля нити (рис. 1) на участке, длина которого равна ширине одной нити, взяв определенный интеграл от функции аппроксимации $f_{its}(x)$ с пределами $a = 0$ и $b = 0,7$, соответствующими границам по ширине нити [6]:

$$S_n = \int_a^b f_{its}(x) dx. \quad (1)$$

Подинтегральную функцию $f_{its}(x)$ определим через встроенную функцию интерполяции системы Mathcad $interp(SS, X, Y, x)$ [5]:

$$f_{its}(x) = interp(SS, X, Y, x), \quad (2)$$

где $SS = cspline(X, Y)$ – это вариант сплайн-аппроксимации отрезками кубических полиномов;
 X, Y – столбцы матрицы координат точек защемления, расстояние между которыми по горизонтали и по вертикали указаны в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

№	Название параметра	Численное значение	Единица измерения
1.	Размеры нити: ширина, b толщина	0,7 0,05	мм мм
2.	Координаты точек защемления: по горизонтали по вертикали	0,02 0,0018	мм мм
3.	Количество участков нити, выходящих на поверхность 1 см ² ткани	196	шт.
4.	Поверхностная плотность пропитываемой арамидной ткани	61	г/м ²
5.	Плотность смолы	1,100...1,180	г/см ³
6.	Плотность отвердителя	0,940...0,960	г/см ³
7.	Рекомендуемое фирмой-изготовителем соотношение компонентов пропитывающего состава (смола:отвердитель)	100:40	
8.	Пористость нити	50	%
9.	Радиус кевларового волокна	0,006	мм

Алгоритм расчетов для оценки распределения пропитывающего состава в структуре армирующей ткани представлен на рис. 3.



Рис. 3. Схема алгоритма оценки распределения пропитывающего состава в межнитевом и межволоконном поровом пространстве

Для указанных в табл. 1 значений исходных параметров площадь S_n равна $0,029 \text{ мм}^2$.

Чтобы определить объем элемента V межнитевого пространства, умножим площадь S_n на ширину нити b

$$V = S_i \cdot b, \quad (3)$$

в результате чего получим $V = 0,020 \text{ мм}^3$.

Результаты наблюдений, представленные в табл. 1, показывают, что количество выходящих на поверхность ткани участков нити составляет 196 на 1 см^2 . Поскольку под каждым участком находится два элементарных объема, умножим полученное значение на два, что даст 392 элементарных объема. Умножив это количество на объем элемента порового пространства V , получим суммарный объем межнитевого порового пространства 1 см^2 , а затем определим эту же величину для 1 м^2 ткани.

Далее вычислим массу состава, заполняющего найденный объем межнитевого пространства с учетом рекомендованного фирмой-производителем соотношения количества смолы и отвердителя, а также с учетом их плотности. Как следует из табл. 1, для арамидной ткани поверхностной плотностью 61 г/м^2 на 1 м^2 ткани берут 120 г смолы плотностью $1,100 \dots 1,180 \text{ г/см}^3$ и 46 г отвердителя плотностью $0,940 \dots 0,960 \text{ г/см}^3$. Принимая среднее значение плотности эпоксидной смолы $1,140 \text{ г/см}^3$, а отвердителя – $0,950 \text{ г/см}^3$, подсчитаем, какая доля межнитевого порового пространства приходится на смолу, а какая – на отвердитель с учетом известного соотношения этих компонентов в пропитываемом составе. Получим, что на долю смолы приходится $57,626 \text{ см}^3$, а на долю отвердителя – $22,09 \text{ см}^3$. Умножив значения объема на соответствующие плотности, получим, что масса смолы составляет $65,694 \text{ г}$, а масса отвердителя – $20,985 \text{ г}$. Суммарная масса смолы и отвердителя в межнитевых порах равна $86,679 \text{ г}$.

Это значение существенно меньше, чем рекомендовано фирмой-производителем для армирующей ткани данной поверхностной плотности. Объясняется это тем, что часть пропитываемого состава находится еще и в межволоконном поровом пространстве, а также на внешних поверхностях нитей, которую также требуется определить.

С этой целью выполним оценку объема межволоконных пор в структуре ткани. Для этого сначала вычислим, на сколько возрастет длина нити, заработанной в ткань, если её распрямить. Чтобы определить длину L криволинейного профиля нити на участке двойной ширины нити $2b$, воспользуемся формулой [6]:

$$L = \int_a^{2b} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} f_{\text{its}}(x) \right)^2} dx. \quad (4)$$

Если $a = 0$, а $b = 0,7 \text{ мм}$, то $L = 1,409 \text{ мм} > (2b = 1,4 \text{ мм})$. Это означает, что учет изогнутости нитей в структуре ткани в данном конкретном случае дает прирост в $0,647 \%$. Отсюда следует, что каждый квадратный метр ткани, если нити распрямить, будет иметь площадь 10110 см^2 . Поскольку толщина каждой нити составляет $0,05 \text{ мм}$, а структуру ткани образует переплетение пар нитей, то общая толщина пары нитей равна $0,1 \text{ мм}$ или $0,01 \text{ см}$, а суммарный объем нитей составит $101,054 \text{ см}^3$. Учитывая, что пористость нити составляет 50% , получим, что объем межволоконного порового пространства равен $50,527 \text{ см}^3$.

Определим отдельно объем смолы и отвердителя в пропитываемом составе исходя из их известного соотношения. На долю смолы приходится $36,525 \text{ см}^3$, а на долю отвердителя – $14,001 \text{ см}^3$. Умножив данные значения на соответствующие плотности компонентов, получим массу смолы $41,639 \text{ г}$ и массу отвердителя $13,301 \text{ г}$. Отсюда суммарная масса пропитываемого состава в межволоконных порах равна $54,940 \text{ г}$. Складывая массы пропитываемого состава в межнитевом и межволоконном пространствах, получим значение $141,620 \text{ г}$, необходимое для дальнейших расчетов.

Таким образом, выше выполнена оценка содержания пропитываемого состава как в целом в структуре ткани, так и отдельно в межнитевом и межволоконном пространствах. Результаты оценки показывают, что в межнитевых промежутках содержится существенно больше пропитываемого состава, чем в межволоконных порах. Это можно объяснить значительно большими размерами межнитевых пор по сравнению с межволоконными даже несмотря на то, что число межволоконных пор значительно превышает число межнитевых в сотни раз.

В заключение выполним оценку количества пропитываемого состава на внешних поверхностях нитей. Капиллярные силы, действующие в межволоконных порах, и силы поверхностного натяжения стремятся растянуть тонкую пленку пропитываемого вязкого состава по поверхности тех волокон, которые расположены на внешних поверхностях нитей. Известно, что толщина этой пленки соизмерима с величиной радиуса волокна. Тогда, принимая эту величину равной $0,006 \text{ мм}$ [7], получим массу пропитываемого состава на внешних поверхностях нитей 1 м^2 ткани, равную сумме массы смолы

(9,492 г) и отвердителя (3,638 г), что составляет 13,130 г. Суммируя полученную величину с массой пропитывающего состава в межнитевых и межволоконных порах, равной 141,620 г, получим 154,750 г.

Сравнивая выполненную общую оценку величины суммарной массы пропитывающего состава с рекомендованной фирмой-производителем, отметим следующее. Результаты выполненного выше теоретического исследования дают значение вычисленной величины 154,750 г, что близко к идеальному случаю минимально необходимого количества состава в структуре ткани. Рекомендованное значение, равное 166 г, – это эмпирическое значение, полученное в ходе отработки технологии пропитки в практике изготовления композиционных материалов. Разница между этими двумя значениями составляет 11,250 г.

Рекомендованное значение является устоявшимся в существующей технологии, однако найденная нами величина, близкая к идеальному варианту технологии, свидетельствует о наличии резерва. Реализовать этот резерв возможно за счет совершенствования технологии пропитки композиционного материала.

В заключение определим процентное соотношение пропитывающего состава в межнитевых и межволоконных порах, а также на внешних поверхностях нитей. В результате получим, что в межнитевых порах содержится 56,013 %, в межволоконных – 35,503 %, а на внешних поверхностях нитей – 8,485%.

Все основные результаты выполненных выше вычислений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты вычисления распределения пропитывающего состава по структурным уровням 1 м² ткани

№	Название параметра	Численное значение	Единица измерения
1.	Суммарный объем межнитевого порового пространства	79,716	см ³
2.	Суммарная масса пропитывающего состава в межнитевых порах	86,679	г
3.	Суммарный объем межволоконного порового пространства	50,527	см ³
4.	Суммарная масса пропитывающего состава в межволоконных порах	54,940	г
5.	Общая масса пропитывающего состава в межнитевом и межволоконном пространствах	141,620	г
6.	Масса пропитывающего состава на внешних поверхностях нитей	13,130	г
7.	Общая масса пропитывающего состава в межнитевых, межволоконных порах и на внешних поверхностях нитей	154,750	г
8.	Рекомендованная фирмой-производителем суммарная масса пропитывающего состава	166	г
9.	Разность рекомендованного значения массы состава и вычисленного теоретического значения	11,250	г
10.	Соотношение пропитывающего состава в: межнитевых порах межволоконных порах на внешних поверхностях нитей	56,013 35,503 8,485	% % %

Выводы

1. Получена количественная оценка распределения пропитывающего состава в поровом пространстве армирующей ткани.
2. Вычислен объем межнитевого пространства 1 м² ткани и масса заполняющего его состава.
3. Вычислен объем межволоконного пространства 1 м² ткани и масса заполняющего его состава.
4. Вычислена масса пропитывающего состава на внешней поверхности нитей 1 м² ткани.
5. Выполнено сравнение полученного общего значения массы с рекомендованным значением в межнитевом, межволоконном пространствах и на внешней поверхности нитей.
6. Установлено, что рекомендуемое значение больше на 11,25 г, чем теоретически вычисленное, что составляет 7,27 %.
7. Получено соотношение масс пропитывающего состава в межнитевых (56,013 %), межволоконных (35,503%) порах и на внешних поверхностях нитей (8,485 %).

Литература

1. Vignoles G. L. Contribution of X-ray CMT image processing to the modelling of pyrocarbon Chemical Vapour Infiltration [Электронный ресурс] / G. L. Vignoles, C. Mulat, C. Germain, O. Coindreau, S. Delettrez, G. Chollon // Carbon 2009, Biarritz : France. – Режим доступа : \www/ URL: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00399521/en/>. – 06.11.2013 г. – Загл. с экрана.
2. Ломов С. В. WiseTex – виртуальный мир и реальное прогнозирование структуры и свойств текстильных полимерных композитов [Электронный ресурс] / С. В. Ломов, И. Ферпуст // Технический текстиль. – 2006. – №13. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.rustm.net/catalog/article/140.html>. – 07.11.2013 г. – Загл. с экрана.
3. Яблочников Е. И. Интеграция процессов проектирования и подготовки производства изделий из полимерных композиционных материалов [Текст] / Е. И. Яблочников, С. Д. Васильков, И. А. Волков // Композитный мир. – 2012. – №2(41). – С. 54-57.
4. Самарский А.А. Численные методы [Текст] / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 430 с.
5. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad : Учебный курс [Текст] / Е.Г. Макаров. – СПб.: Питер, 2005. – 448 с.
6. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я. Выгодский. – М.: ВЕК, 1997. – 863 с.
7. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. Дж. Любина. Пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта под ред. Б. Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.

References

1. Vignoles G. L., Mulat, C., Germain, C., Coindreau, O., Delettrez, S., Chollon, G. (2009). Contribution of X-ray CMT image processing to the modelling of pyrocarbon Chemical Vapour Infiltration. Carbon 2009, Biarritz: France. Available: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00399521/en/>. Last accessed November 06, 2013.
2. Lomov S. V., Verpoest, I. WiseTex – the virtual world and the real prediction of the structure and properties of textile polymer composites. (2006). Technical textile, 13. Available: <http://www.rustm.net/catalog/article/140.html>. Last accessed November 07, 2013.
3. Yablochnikov E. I., Vasil'kov, S. D., Volkov, I. A. (2012). The integration of the design and manufacture of products from polymeric composite materials. Composite world, 41, 54-57.
4. Samarskiy A.A., Gulin A.V. Chislennyye metody. – Moscow.: Nauka, 1989. – 430 p.
5. Makarov E.G. Injenernyye raschety v Mathcad. Uchebny kurs. – St. Petersburg.: Piter, 2005. – 448 p.
6. Vygodskiy M.Y. Spravochnik po vyshey matematike. – Moscow.: Vek, 1997. – 863 p.
7. Spravochnik po kompozitsionnym materialam: V 2kn. Kn. 1 / Pod red. J. Lubin. Per. s angl. A. B. Gellera, M. M. Gelmonta pod red. B. E. Gellera. – Moscow.: Mashinostroenie, 1988. – 448 p.