

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СЕТЕВОГО УГЛА
ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ДРАПИРУЕМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ
И ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПРЕПРЕГОВ НА ИХ ОСНОВЕ***

**STUDY OF NETWORK ANGLE DEPENDENCE FROM THE DRAPABILITY
COEFFICIENT OF TECHNICAL FABRICS AND THERMOPLASTIC
PREPREGS BASED ON THEM ***

А.Г. ТЕРЕШКОВ¹, Г.В. МАЛЫШЕВА¹, А.И. СОЛОВЬЕВ¹, Ш.И. ДЖАФАРОВА¹, А.А. САМОШКИН^{1,2}

A.G. TERESHKOV¹, G.V. MALYSHEVA¹, A.I. SOLOVIEV¹, S.I. DZHAFAROVA¹, A.A. SAMOSHKIN^{1,2}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

(¹Bauman Moscow State Technical University,

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)

E-mail: atereshkov@emtc.ru

Описана математическая модель драпируемости технических тканей и термопластичных препрегов на основе сетей Чебышева. Математически выражена зависимость минимально допустимого сетевого угла от коэффициента драпируемости. Проведена выкладка тканей и препрегов на нескольких видах оснастки с измерением сетевых углов. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости сетевого угла от коэффициентов драпируемости конструкционных тканей и термопластичных препрегов. Получено экспериментальное подтверждение теоретически рассчитанных сетевых углов, а также работоспособности и точности математической модели драпируемости.

The mathematical model of drapeability of technical fabrics and thermoplastic prepregs based on Chebyshev networks is described. The dependence of the minimum permissible network angle on the drapeability coefficient is expressed mathematically. Fabrics and prepregs are laid out on several types of equipment with the measurement of network angles. The results of experimental studies of the dependence of the network angle on the drapeability coefficients of structural fabrics and thermoplastic prepregs are presented. Experimental confirmation of the theoretically calculated network angles, as well as the operability and accuracy of the mathematical model of drapeability, is obtained.

Ключевые слова: ткань, препрег, термопластичный материал, драпируемость, сети Чебышева.

Keywords: fabric, prepreg, thermoplastic material, drapability, Chebyshev networks.

* Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы (НТИ) на базе образовательных учреждений высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» на базе МГТУ им. Баумана).

Введение

Слоистые полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используют при изготовлении высокоответственных нагруженных деталей современной техники благодаря их высоким удельным характеристикам прочности и жесткости и высокой весовой эффективности [1...5]. При производстве слоистых армированных пластиков из тканей и препрегов большое значение имеет драпируемость последних. Драпируемость характеризует поведение материала при выкладке на криволинейную поверхность, при недостатке драпируемости становится невозможной бесшовная выкладка без образования складок и других дефектов. Традиционно в качестве связующих для производства слоистых ПКМ использовали терморезактивные материалы, как правило, эпоксидные [6...8]. В настоящее время им на смену пришли термопласты, что связано с существенным сокращением времени на формование (за счет отсутствия технологической операции – отверждения), менее токсичным химическим составом, простотой и удобством вторичной переработки [9, 10]. В связи с этим актуальным является исследование драпируемости препрегов с термопластичными связующими.

В технической литературе основное внимание авторы уделяют механическим и теплофизическим характеристикам термопластичных препрегов и не рассматривают их технологические свойства, не зная которые невозможно разрабатывать технологические процессы и изготавливать детали из ПКМ [11...13]. Основной проблемой является сложность выполнения стандартной технологической операции выкладки. Мерой количественной оценки технологичности термопластичных препрегов является коэффициент драпируемости, который позволяет количественно оценить возможность или невозможность бесшовной выкладки ткани на поверхность криволинейной оснастки [14]. Чем выше коэффициент драпируемости, тем проще выкладывать ткань без складок с минимальным количеством кусков.

Целью работы является установление зависимости минимально допустимого сетевого угла от коэффициента драпируемости для технических тканей и препрегов.

Поставленная цель достигается путем разработки математической модели на основе сетей Чебышева. Валидация математической модели производится сравнением значений сетевых углов тканей и препрегов, полученных расчетным и экспериментальными методами.

Объекты и методы

В работе использовалась пленка из полипропилена в качестве связующего для получения препрегов по пленочной технологии. В качестве армирующего наполнителя использовалась углеродная ткань саржевого плетения.

Для определения значений сетевого угла расчетным способом разработана математическая модель на основе сетей Чебышева (рис. 1) [15]. Суть подхода Чебышева состоит в математическом выражении геометрических зависимостей в элементарной ячейке ткани.

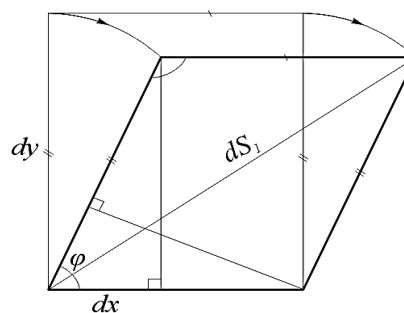


Рис. 1

Математическая модель выражается уравнением, описывающим линейный элемент сети:

$$dS_1 = \sqrt{dx^2 + dy^2 + 2 \cos \varphi \cdot dx dy}, \quad (1)$$

где dS_1 – линейный элемент сети Чебышева в деформированной ячейке; φ – сетевой угол; dx – ширина элементарной ячейки; dy – высота элементарной ячейки.

Путем масштабирования элементарной ячейки установлена связь с коэффициентом драпируемости:

$$D = \frac{dS_0 - dS_1}{dS_0}, \quad (2)$$

где D – коэффициент драпируемости; dS_1 – линейный элемент сети Чебышева в деформированной ячейке; dS_0 – линейный элемент сети Чебышева в недеформированной ячейке.

Далее путем математических преобразований получена зависимость косинуса сетевого угла от коэффициента драпируемости и размеров элементарной ячейки:

$$\cos \varphi_{min} = \frac{(D^2 - 2D) \cdot (dx^2 + dy^2)}{2dxdy}, \quad (3)$$

где φ_{min} – минимально допустимый сетевой угол; D – коэффициент драпируемости; dx – ширина элементарной ячейки; dy – высота элементарной ячейки.

Полученная формула позволяет рассчитывать минимально допустимый сетевой угол на основе коэффициента драпируемости. Значения коэффициента драпируемости, используемые в работе, определены в рамках предыдущего исследования авторов.

Для экспериментального измерения сетевых углов выбраны три оснастки: для изготовления винта, кожуха и щитков. В качестве эталона использована плоская оснастка (рис. 2). Сдвиг ткани на плоской оснастке позволяет определить минимальный сетевой угол без влияния формы оснастки на измерение.



Рис. 2

В контексте применяемой методики необходимо понимать, что чем меньше минимальный сетевой угол, тем сильнее может деформироваться ткань и, соответственно, выше драпируемость.

Результаты и обсуждение

В табл. 1..4 показаны результаты измерений и расчетов сетевого угла. Так, в табл. 1 приведены значения сетевого угла ткани на плоской оснастке, в табл. 2 – значения сетевых углов углеродной ткани на оснастке для формования винта, в табл. 3 –

на оснастке для формования кожуха, а в табл. 4 – на оснастке для формования щитков. Как видно из полученных данных, для плоской оснастки отклонение рассчитанных значений от измеренных не превышает 2%, что говорит о высокой точности расчетной методики. Для остальных оснасток сетевые углы по направлению 90° и -45° значительно выше, чем расчетные, что говорит о значительном запасе драпируемости. По направлениям 0° и $+45^\circ$ расчетные значения превышают измеренные, однако

эти значения не стоит принимать во внимание. Такие значения связаны с тем, что в используемой методике измерения коэффициента драпируемости обязательно присутствует ось сгиба и в данном случае она проходит вдоль направления 0° , однако схема плетения исследуемой ткани симметрична (одинакова в направлениях 0° и 90°). Поэтому при выкладке необходимо принимать значение сетевого угла в направлении 0° , идентичном направлению 90° , а в направлении $+45^\circ$, идентичном направлению -45° .

Т а б л и ц а 1

Тип ткани	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
Углеродная ткань	50	49

Т а б л и ц а 2

Направление выкладки, град.	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
0	60	79
+45	65	68
-45	65	58
90	60	49

Т а б л и ц а 3

Направление выкладки, град.	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
0	70	79
+45	75	68
-45	75	58
90	70	49

Т а б л и ц а 4

Направление выкладки, град.	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
0	75	79
+45	80	68
-45	80	58
90	75	49

Проведена выкладка препрега с предварительным нагревом до 120°C . Как видно на фотографиях плоской оснастки (рис. 3), минимально допустимый сетевой угол значительно увеличился по сравнению с сухой тканью. На фотографиях выкладки видно появление складок, что говорит о недостатке драпируемости препрега.



Плоская оснастка



Оснастка для формования винта



Оснастка для формования кожуха



Оснастка для формования щитков

Рис. 3

В табл. 5...8 показаны результаты измерений и расчетов сетевого угла для препрегов. Так, в табл. 5 приведены значения сетевого угла препрега на плоской оснастке, в табл. 6 – значения сетевых углов на оснастке для формования винта, в табл. 7 – на оснастке для формования кожуха, а в табл. 8 – на оснастке для формования щитков. Как видно из таблиц, для плоской оснастки отклонение рассчитанных значений от измеренных не превышает 2%, так же как и для тканей.

Т а б л и ц а 5

Тип ткани	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
Углеродная ткань	80	79

Т а б л и ц а 6

Направление выкладки, град.	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
0	60	88
+45	65	84
-45	65	84
90	60	79

Т а б л и ц а 7

Направление выкладки, град.	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
0	70	88
+45	75	84
-45	75	84
90	70	79

Т а б л и ц а 8

Направление выкладки, град.	ϕ изм., град.	ϕ мин. расч., град.
0	75	88
+45	80	84
-45	80	84
90	75	79

Как видно из полученных данных, измеренные на оснастке сетевые углы значительно ниже, чем расчетные, это говорит о недостатке драпируемости и обязательном образовании складок, что и подтверждается на практике.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета минимально допустимого при выкладке сетевого угла для тканей и препрегов.

2. Проведена экспериментальная проверка работоспособности и точности разработанной методики.

3. Для термопластичных препрегов разработана методика оценки технологичности, благодаря которой на основе данных о коэффициентах драпируемости ткани и препрега и сетевых углах на выбранной оснастке заранее определяются места расположения складок, что позволяет технологически с высокой точностью разработать схему раскроя перед выкладкой препрега.

ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев Е.В., Степанов С.Г., Киселев М.В. и др. Полимерные композиционные материалы на волокнистой основе: тенденции развития, характеристики, научные направления и технологии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6(396). С. 14...20.
2. Дебердеев Т.Р., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Обзор путей развития и применения полимерных волокнистых композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6(396). С. 5...13.
3. Бородулин А.С., Марычева А.Н., Мальшева Г.В. Моделирование кинетики процессов пропитки тканых наполнителей при производстве изделий из стеклопластиков // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41, №6. С. 892...898.
4. Kobets L.P., Malysheva G.V., Borodulin A.S. Rheological properties of system "elastomer binder – discrete carbon fiber" // Inorganic Materials: Applied Research. 2016. №7. №1. P. 15...19.

5. Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Viscous hysteresis in filled siloxane binders // Polymer Science. Series D. 2017. T.10, №1. P. 19...22.

6. Нелюб В.А. Повышение качества формования углепластиков на основе эпоксидных связующих и металлизированных армирующих волокнистых материалов по технологии вакуумной инфузии // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. №9. С. 40...43.

7. Бизюк А.Н., Ясинская Н.Н. Моделирование пропитки при формировании полимерных композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 6(402). С. 215...220. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_6_215

8. Ерофеев В.Т., Ивлев В.И., Мышкин А.В. и др. Механические свойства отвержденной полиэфиракрилатной смолы МГФ-9 // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6(396). – С. 311...319. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_311.

9. Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Bazheva R.C. et al. Receipt and investigation of performance characteristics of super construction polyesters. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Т. 9, № 13. С. 1117...1127.

10. Borodulin A., Kalinnikov A., Tereshkov A., Kharaev A. New Polymeric Binders for the Production of Composites // Materials Today: Proceedings. 2019. Т. 11. С. 139...143.

11. Беев А.А., Хаширова С.Ю., Слонов А.Л. и др. Полиэфиримидные композиционные материалы, наполненные аппретированными стеклянными волокнами // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 4(400). С. 207...214. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_4_207

12. Думанский А.М., Алимов М.А., Хао Л. Закономерности нелинейного поведения однонаправленного углепластика при скоростном деформировании // Композиты и наноструктуры. 2019. Т. 11, № 1(41). С. 16...22.

13. Нелюб В.А. Жизненный цикл изделий из полимерных композиционных материалов // Технология металлов. 2019. №6. С. 33...39.

14. Иванова О.В., Смирнова Н.А. Анализ методов определения драпируемости текстильных полотен // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2007. № 5(301). С. 3...5.

15. Привалов А.А., Базаев Е.М., Зарецкая Г.П. и др. Математическое моделирование сетей Чебышева на поверхности конуса // Дизайн и технологии. 2021. № 83-84(125-126). С. 105...115.

REFERENCES

1. Rumyantsev E.V., Stepanov S.G., Kiselev M.V. et al. Fiber-based polymer composite materials: development trends, characteristics, scientific directions and technologies // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh

Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. № 6(396). P. 14...20. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_14

2. *Deberdeev T.R., Andrianova K.A., Amirova L.M.* Overview of ways of polymer fiber composite materials development and application // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. № 6(396). P. 5...13. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_5

3. *Borodulin A.S., Marycheva A.N., Malysheva G.V.* Simulation of impregnation kinetics of fabric fillers in the production of fiberglass articles // *Glass physics and chemistry*. 2015. V. 41, №6. P. 892...898.

4. *Kobets L.P., Malysheva G.V., Borodulin A.S.* Rheological properties of system “elastomer binder – discrete carbon fiber” // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. №7. №1. P. 15...19.

5. *Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V.* Viscous hysteresis in filled siloxane binders // *Polymer Science. Series D*. 2017. T.10, №1. P. 19...22.

6. *Nelyub V.A.* Quality improvement of molding of carbon-filled plastics based on epoxy binders and metallized reinforcing fibrous materials by vacuum infusion technology // *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2020. №9. P. 40...43.

7. *Biziuk A.N., Yasinskaya N.N.* Modeling of impregnation during the formation of polymer composite materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. № 6(402). P. 215...220. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_6_215

8. *Erofeev V.T., Ivlev V.I., Myshkin A.V. et al.* Mechanical properties of the cured polyester acrylate resin MGF-9 // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*.

2021. № 6(396). P. 311...319. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_311.

9. *Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Bazheva R.C., Kharaev A.M., Beshtoev B.Z.* Receipt and investigation of performance characteristics of super construction polystyrenes. // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. T. 9, № 13. C. 1117...1127.

10. *Borodulin A., Kalinnikov A., Tereshkov A., Kharaev A.* New Polymeric Binders for the Production of Composites // *Materials Today: Proceedings*. 2019. T. 11. C. 139...143.

11. *Beev A.A., Khashirova S.Yu., Slonov A.L. et al.* Polyesterimide composites filled with sized glass fibers // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. № 4(400). P. 207...214. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_4_207

12. *Dumansky A.M., Alimov M.A., Hao L.* Regularities of nonlinear response of unidirectional carbon fiber reinforced plastic under strain rate loading // *Composites and nanostructures*. 2019. V. 11, № 1(41). P. 16...22.

13. *Nelyub V.A.* Life cycle of polymer composite material products // *Tehnologia metallov*. 2019. №6. P. 33...39.

14. *Ivanova O.V., Smirnova N.A.* Analysis of methods for determining the drapability of textile fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2007. № 5(301). P. 3...5.

15. *Privalov A.A., Bazaev E.M., Zaretskaya G.P. et al.* Mathematical modeling of Chebyshev networks on the surface of a cone // *Design and technology*. 2021. No. 83-84(125-126). P. 105...115.

Рекомендована кафедрой СМ12 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Поступила 15.05.24.