Поступила в редакцию *13.09.2025*

УДК 621 DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-4(18)-74-86

Комбинированный подход к моделированию драпируемости технических тканей и термопластичных препрегов на их основе

А. Г. Терешков[*,1], В. А. Нелюб[*,], А. С. Бородулин[*]**

**Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия*

***Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

Аннотация

Разработан комбинированный подход к оценке драпируемости технических тканей и препрегов, учитывающий как механические свойства материала (коэффициент драпируемости), так и геометрию поверхности (гауссова кривизна). На основе сетей Чебышева создана модель, связывающая коэффициент драпируемости с минимально допустимым сетевым углом. Установлена взаимосвязь сетевого угла с геометрическими характеристиками поверхности. Предложен алгоритм оценки возможности драпировки, апробированный на оснастках сложной формы. Предложенный подход позволяет проводить оценку драпируемости тканей и препрегов перед выкладкой, снижая временные и материальные затраты.

Ключевые слова

Драпируемость, конструкционные ткани, термопластичные препреги, сети Чебышева, гауссова кривизна, коэффициент драпируемости, математическое моделирование, полимерные композиционные материалы.

Введение

Традиционно в качестве матриц для полимерных композиционных материалов (ПКМ) используются термореактивные полимеры [1, 2], однако активно ведутся работы по созданию ПКМ на основе термопластичных матриц [3]. Поскольку термопласты обладают на порядок большей вязкостью, чем реактопласты, актуальной становится разработка методики оценки драпируемости термопластичных препрегов. На данный момент по теме «драпируемость тканей» в технической и научной литературе преобладают публикации в области текстильной промышленности. Так, авторы публикаций [4, 5] создают математические модели драпируемости льняных тканей, данные модели основаны на методах измерения коэффициента драпируемости по ГОСТ Р 57470-2017. Модели и методы, применимые к текстильным тканям, неактуальны для технических (конструкционных) тканей и термопластичных препрегов на их

[1] Для переписки:
Email: atereshkov@emtc.ru

основе, являющихся объектами данного исследования. Для описания драпируемости конструкционных тканей и препрегов на их основе наиболее подходящим является подход на основе сетей Чебышева.

Существующие модели драпируемости, основанные преимущественно на сетях Чебышева, рассматривают процесс укладки исключительно с геометрической точки зрения. Авторы [6–7] не учитывают механические свойства армирующих тканей (выражающиеся интегральным параметром — коэффициентом драпируемости), которые критически важны для реальных процессов выкладки. Такой упрощённый подход не позволяет адекватно прогнозировать поведение препрегов при изготовлении изделий сложной геометрии. В работах [9, 10] исследована взаимосвязь сетевого угла и коэффициента драпируемости при выкладке тканей и термопластичных препрегов, что является первой частью комбинированной методики. В данной работе описана методика в целом, с учётом второй части подхода — взаимосвязи сетевого угла с геометрическими свойствами поверхности (гауссовой кривизной).

Целью данной работы является разработка комбинированного подхода к моделированию драпируемости технических тканей и термопластичных препрегов на их основе с учётом как свойств материала (коэффициент драпируемости), так и свойств поверхности (кривизны Гаусса).

Постановка задачи математического моделирования драпируемости

Математическая модель драпируемости разработана на основе сетей Чебышева. Для описания применимой на практике математической модели необходимо использовать двойной подход: с одной стороны, модель должна учитывать свойства драпируемости материала (ткани или препрега), которые выражаются коэффициентом драпируемости, с другой стороны, необходимо учитывать свойства поверхности, на которой производится выкладка, выражающиеся кривизной Гаусса. Также необходимо определить технологический параметр, через который будет установлена взаимосвязь между двумя частями математической модели.

Для создания и апробации на практике математической модели применяются три оснастки: оснастка кожуха, оснастка щитков и оснастка винта. Данные оснастки выбраны, поскольку обладают основными видами криволинейных поверхностей, такими как: конус, сфера, параболоид вращения и цилиндр, в различных комбинациях. Изображение геометрических моделей данных оснасток представлены на рисунке 1.

Модели оснасток построены в САПР Catia V5, также средствами данного ПО проведён анализ кривизны рабочих поверхностей оснасток, в ключевых точках измерены значения кривизны Гаусса (рисунок 2), измеренные значения указаны в таблицах 1–3.

Кривизна Гаусса — это мера внутренней искривлённости поверхности в точке, вычисляемая как произведение двух главных кривизн. Её ключевое свойство в том, что она остаётся неизменной при изгибании поверхности без растяжения и разрывов.

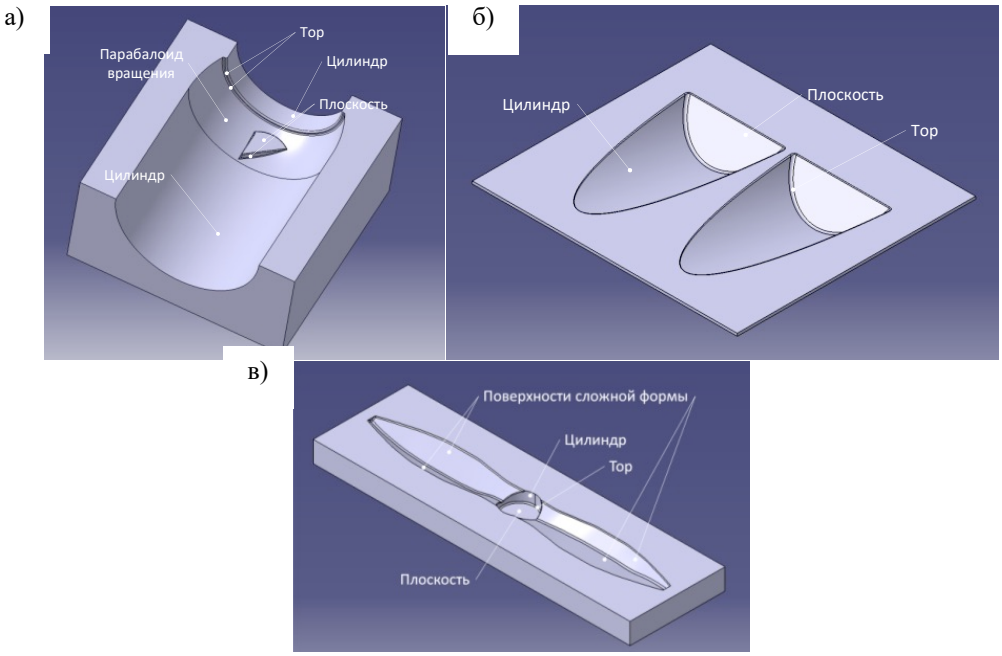

Рисунок 1 — Изображение геометрических моделей оснасток: а — модель оснастки кожуха; б — модель оснастки щитков; в) — модель оснастки винта

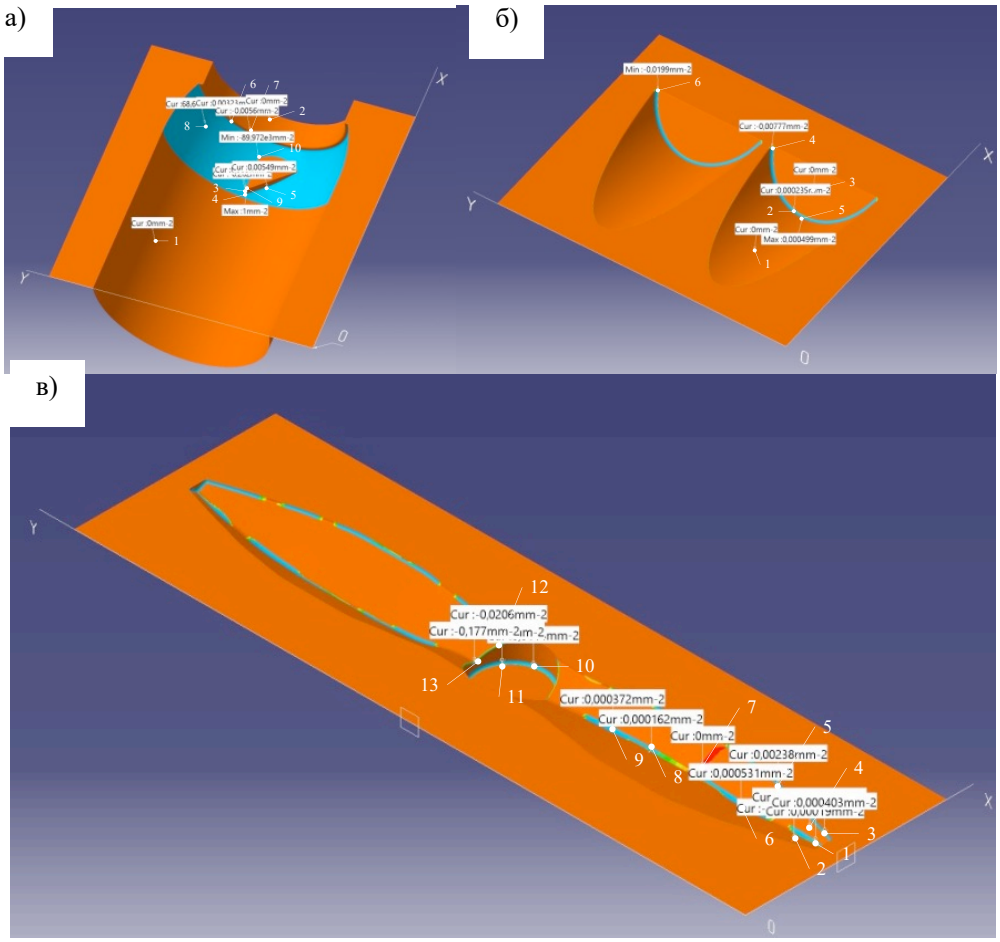

Рисунок 2 — Изображение распределения кривизны Гаусса на моделях оснасток: а — модель оснастки кожуха; б — модель оснастки щитков; в — модель оснастки винта

Таблица 1 — Значения кривизны Гаусса для точек на поверхности кожуха

№ точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Кривизна Гаусса, мм$^{-2}$
1	50.0	200.0	0.0000
2	285.0	190.0	0.0000
3	210.0	170.0	–0.2020
4	211.5	169.0	1.0000
5	219.0	158.5	0.0060
6	269.5	200.0	0.0030
7	271.0	180.0	–0.0060
8	230.0	230.0	68.6×10^{-6}
9	212.0	168.0	0.0000
10	225.0	165.0	–0.0897

Таблица 2 — Значения кривизны Гаусса для точек на поверхности щитков

№ точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Кривизна Гаусса, мм$^{-2}$
1	317.0	340.0	0.0000
2	336.0	599.0	0.0000
3	310.0	656.0	0.0002
4	483.0	696.6	–0.0078
5	590.0	300.0	0.0005
6	698.5	524.0	–0.0199

Таблица 3 — Значения кривизны Гаусса для точек на поверхности винта

№ точки	Координата X, мм	Координата Y, мм	Кривизна Гаусса, мм$^{-2}$
1	94.0	31.6	0.0002
2	86.0	42.5	$-986.13*10^{-9}$
3	100.0	29.6	0.0004
4	100.7	43.3	$-2.4*10^{-6}$
5	117.0	87.7	0.0024
6	99.2	103.1	0.0005
7	107.6	145.6	0.0000
8	100.9	185.2	0.0002
9	99.2	218.0	0.0004
10	118.4	308.1	0.0114
11	106.8	324.3	0.0130
12	105.6	325.9	–0.0206
13	88.5	330.4	–0.1770

Для построения математической модели драпируемости необходимо использовать комбинированный подход: с одной стороны — установить взаимосвязь между коэффициентом драпируемости и минимально допустимым сетевым ушлом, с другой — установить взаимосвязь между кривизной поверхности оснастки и фактическим сетевым углом, также необходимо установить условие драпируемости в зависимости от соотношения

минимально допустимого и фактического сетевого угла.

Прикладная математическая модель драпируемости

Описанные выше параметризованные геометрические модели не учитывают механические свойства тканей и препрегов, а также сложны к применению в условиях производства. В связи с чем требуется разработать математическую модель с учётом механических свойств тканей и препрегов, легко применимую на производстве. В данном случае совокупность механических характеристик выражается коэффициентом драпируемости. Математическая модель драпируемости была составлена на основе сетей Чебышева. Суть подхода Чебышева состоит в математическом выражении геометрических зависимостей в элементарной ячейке ткани (рисунок 3).

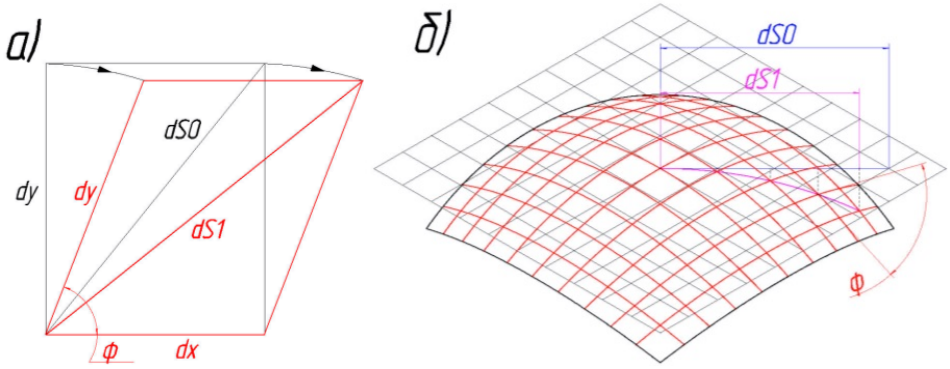

Рисунок 3 — Структурная ячейка сети Чебышева: а — в двумерном представлении; б — в трёхмерном представлении

Математическая модель выражается в уравнении, описывающем линейный элемент сети в деформированном состоянии:

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

где dx — ширина элементарной ячейки, мм; dy — высота элементарной ячейки, мм; φ — сетевой угол, град.

Линейный элемент сети в недеформированном состоянии описывается следующей формулой:

$$dS_0 = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

Путем масштабирования элементарной ячейки (рисунок 3б) установлена связь с коэффициентом драпируемости (в рамках элементарной ячейки):

$$Д = \frac{dS_0 - dS_1}{dS_0}$$

где dS_0 — линейный элемент сети в недеформированном состоянии, мм; dS_1 — линейный элемент сети в деформированном состоянии, мм.

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

$$\cos\varphi_{min} = \frac{(Д^2 - 2Д) \cdot (dx^2 + dy^2)}{2dxdy} \qquad (2)$$

Полученная формула позволяет рассчитывать минимально допустимый сетевой угол на основе коэффициента драпируемости.

Определим связь коэффициента драпируемости материала с геометрическими свойствами драпируемой поверхности. Для этого рассмотрим гауссову кривизну поверхности H в точке (x, y). Её можно определить как предел

$$K = \lim_{S \to 0} \frac{S^*}{S},$$

где S — площадь участка поверхности вокруг точки (x, y), ограниченного некоторой замкнутой кривой L, а S^* — площадь соответствующего участка поверхности

на единичной сфере. В формуле зависимость от точки (x, y) опущена для простоты.

Зависимость гауссовой кривизны от сетевого угла φ выражается дифференциальным уравнением [54]:

$$-K \sin \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \, \partial y}. \quad (3)$$

Критерий драпируемости поверхности H материалом с заданным коэффициентом драпируемости и размерами элементарной ячейки можно сформулировать как

$$\varphi(x, y) > \varphi_{min} \; \forall \, (x, y) \in H. \quad (4)$$

Обратим внимание, что каждое решение дифференциального уравнения (3) задает свою чебышевскую сеть для поверхности H.

На практике проверка неравенства (4) может быть сведена к решению задачи нахождения глобального минимума и проверки условия

$$\min_H \varphi(x, y) > \varphi_{min}. \quad (5)$$

Для примера рассмотрим множество поверхностей, имеющих в любой точке (кроме, может быть, конечного их множества) гауссову кривизну, равную нулю. Примерами таких поверхностей являются плоскости, цилиндры, конусы. Для них уравнение (3) почти всюду имеет вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \, \partial y} = 0$$

Решения этого уравнения образуют множество $\varphi(x, y) = C_1(x) + C_2(y)$, где $C_1(x)$ и $C_2(y)$ — некоторые дважды дифференцируемые функции одной переменной.

Выбор функций C_1 и C_2 соответствует выбору сети Чебышева, покрывающей поверхность. Очевидно, что в данном случае для любого φ_{min} можно выбрать функции таким образом, чтобы удовлетворялось условие (5), например, взяв $C_1 \equiv 0, C_2 \equiv \varphi_{min} + \varepsilon$, при $\varepsilon > 0$.

Пример. Рассмотрим сферу радиуса R. Гауссова кривизна этой поверхности в каждой точке равна $\frac{1}{R^2}$. В этом случае уравнение (3) приводится к форме

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \, \partial y} = -\frac{1}{R^2} \sin \varphi \quad (6)$$

Полученные соотношения позволяют сформулировать чёткий критерий драпируемости, переводящий интуитивную оценку в строгую математическую задачу поиска минимума функции. Это создаёт теоретическую основу для алгоритмизации и автоматизации процесса принятия решений на производстве.

Практическая значимость результатов заключается в том, что для поверхностей с нулевой кривизной драпируемость не ограничена, а для криволинейных поверхностей она жёстко зависит от свойств материала.

Необходимым следующим шагом, вытекающим из данного вывода, является разработка конкретного алгоритма, реализующего проверку сформулированного критерия.

Алгоритм определения драпируемости с учётом кривизны поверхности

Для реализации вычислительной процедуры необходимо решить задачу построения приближения функции гауссовой кривизны $K(x, y)$ и численного решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка.

В рамках данной работы рассматривается приближение функции кривизны с использованием многочленов. Задача аппроксимации функции двух переменных многочленами формулируется следующим образом. Пусть дана непрерывная функция $f(x, y)$, определённая на некоторой замкнутой области $D \subset \mathbb{R}^2$. Требуется найти многочлен $P_{m,n}(x, y)$ степени не выше m по x и не выше n по y вида:

$$P_{m,n}(x,y) = \sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n} a_{ij}x^i y^j,$$

где коэффициенты a_{ij} определяются из условия наилучшего приближения функции $f(x,y)$.

В случае известных значений функции в наборе узлов (x_i, y_j) функцию можно аппроксимировать многочленом, проходящим через эти узлы. Рассмотрим основные подходы.

Многочлен Лагранжа двух переменных:

$$L(x,y) = \sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n} f(x_i, y_j)\, l_i(x)\, l_j(y),$$

где $l_i(x) = \prod_{k=0,\, k\neq i}^{m} \frac{x-x_k}{x_i-x_k}$,

$l_j(y) = \prod_{l=0,\, l\neq j}^{n} \frac{y-y_l}{y_j-y_l}$.

Многочлен Ньютона:

$$N(x,y) = \sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n} c_{ij}(x-x_0)\dots(x-x_{i-1})(y-y_0)\dots(y-y_{j-1}).$$

Коэффициенты c_{ij} определяются через разделённые разности — обобщение конечных разностей.

Сплайны и кусочные многочлены

Сплайн — это кусочно-гладкая многочленная функция, которая аппроксимирует исходную функцию, совпадает с ней (или с её значениями в узлах интерполяции) и обладает определённой степенью гладкости на стыках между кусками. В двумерном случае на области $D \subset \mathbb{R}^2$ обычно используют сетки узлов (x_i, y_j), разбивая область на прямоугольники или треугольники.

Например, бикубический сплайн на прямоугольной сетке определяется следующим образом. На каждом прямоугольном элементе $([x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}])$:

$$S_{ij}(x,y) = \sum_{k=0}^{3}\sum_{l=0}^{3} a_{kl}^{(ij)}(x-x_i)^k (y-y_j)^l$$

Коэффициенты $a_{kl}^{(ij)}$ определяются из условий интерполяции (значения функции в узлах, значения производных и/или смешанных производных) и условий гладкости (непрерывность производных до второго порядка).

Важным аспектом при решении задачи интерполяции является выбор сетки. В случае с интерполяцией многочленами высокой степени равномерная сетка (такая, где точки (x_i, y_j) равномерно распределены по поверхности, на которой производится приближение) может привести к расходимости и осцилляциям на краях области (в одномерном случае это называется явлением Рунге). Для того чтобы этого избежать, рекомендуется использовать чебышевские узлы, которые более плотно распределены на краях области. В рамках данной работы использовались адаптивные сетки, в которых при приближении к множеству особенностей функции плотность узлов сетки увеличивается.

Если значения функции заданы с ошибками или только в отдельных точках (x_k, y_k, f_k), то используется полиномиальная регрессия. Необходимо подобрать коэффициенты многочлена $P_{m,n}(x,y) = \sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n} a_{ij}x_k^i y_k^j$, минимизируя сумму квадратов отклонений:

$$S = \sum_{k=1}^{N}\left[f_k - P_{m,n}(x_k, y_k)\right]^2 \to min.$$

Задача сводится к решению системы уравнений:

$$\frac{\partial S}{\partial a_{pq}} = -2\sum_{k=1}^{N}\left[f_k - P_{m,n}(x_k, y_k)\right]x_k^p y_k^q = 0$$

для всех $p = 0,\dots,m;\ q = 0,\dots,n$.

Сформулируем подходы для численного решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка. Пусть функция $\varphi(x,y)$ удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x\,\partial y} = f\left(x, y, \varphi, \frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)$$

с заданными начальными или граничными условиями. Для нахождения численного

решения такой задачи область дискретизуется равномерной или неравномерной сеткой с шагами h_x и h_y. В узлах сетки функция $\varphi(x, y)$ аппроксимируется набором значений $\varphi_{i,j}$.

Вторая производная по x и по y может аппроксимироваться разностными схемами, например, центральной разностью второго порядка:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \mathrm{x}\ \partial \mathrm{y}} \approx \frac{\varphi_{\mathrm{i+1,j+1}} - \varphi_{\mathrm{i+1,j-1}} - \varphi_{\mathrm{i-1,j+1}} + \varphi_{\mathrm{i-1,j-1}}}{4\ \mathrm{h_x}\ \mathrm{h_y}}$$

В результате исходное уравнение преобразуется к системе нелинейных алгебраических уравнений относительно узловых значений функции $\varphi_{i,j}$:

$$\frac{\varphi_{i+1,j+1} - \varphi_{i+1,j-1} - \varphi_{i-1,j+1} + \varphi_{i-1,j-1}}{4\ h_x\ h_y} = f\left(x_i, y_j, \varphi_{i,j}, D_x\varphi_{i,j}, D_y\varphi_{i,j}\right)$$

где $D_x\varphi_{i,j}$ и $D_y\varphi_{i,j}$ — разностные аппроксимации первых производных.

Для решения полученной системы нелинейных уравнений могут использоваться итерационные методы:

- метод Ньютона: на каждом шаге решается линейная система, возникающая из разложения функции в ряд Тейлора;
- методы простых итераций (метод Якоби, метод Зейделя): применяются обычно для слабой нелинейности;
- методы релаксации: эффективны для больших задач на сетках высокой размерности.

Для временной эволюции (например, задачи Коши для уравнений в частных производных) используются схемы типа «явная» и «неявная» Эйлера, схемы Кранка — Николсона, а также разностные схемы высокого порядка.

Для определения драпируемости материала в зависимости от поверхности на практике предлагается следующий алгоритм (рисунок 4).

Описание алгоритма

Вход: поверхность H, значение минимального сетевого угла для материала φ_{min}.

Выход: булевое значение, показывающее возможность драпируемости.

Выбрать разбиение поверхности $P(H) = \{(x_i, y_j)\} \subset H$.

По значениям $\left\{K\left((x_i, y_j)\right|_{((x_i,y_j)\in P(H)}\right\}$ найти коэффициенты интерполяции многочленом $K(x, y) \approx \sum_{(m,n)\in A} C_{m,n} x^m y^n$. Для этого можно воспользоваться полиномиальной регрессией или другим алгоритмом машинного обучения.

Подставив интерполяционный многочлен в уравнение 3, решить его, получив приближенное значение $\tilde{\varphi}(x, y)$.

Если $\min\limits_{P(H)} \tilde{\varphi}\left(x_i, y_j\right) > \varphi_{min}$, то возврат Истина, иначе возврат Ложь.

Заключение

Параметризованные геометрические модели драпируемости не учитывают механические свойства материала и сложны для внедрения на производстве. В качестве универсального механического параметра введён коэффициент драпируемости, который позволяет учитывать деформационные свойства тканей и препрегов.

Для построения математической модели драпируемости применена чебышевская сеть, что позволяет удобно описывать элементарные ячейки материала при деформации. Введено соотношение между коэффициентом драпируемости, размерами элементарной ячейки и минимально допустимым сетевым углом, обеспечивающее физическую реализуемость драпировки. Драпируемость поверхности определяется её гауссовой кривизной и находится путём анализа решения нелинейного дифференциального уравнения для сетевого угла Чебышева на поверхности.

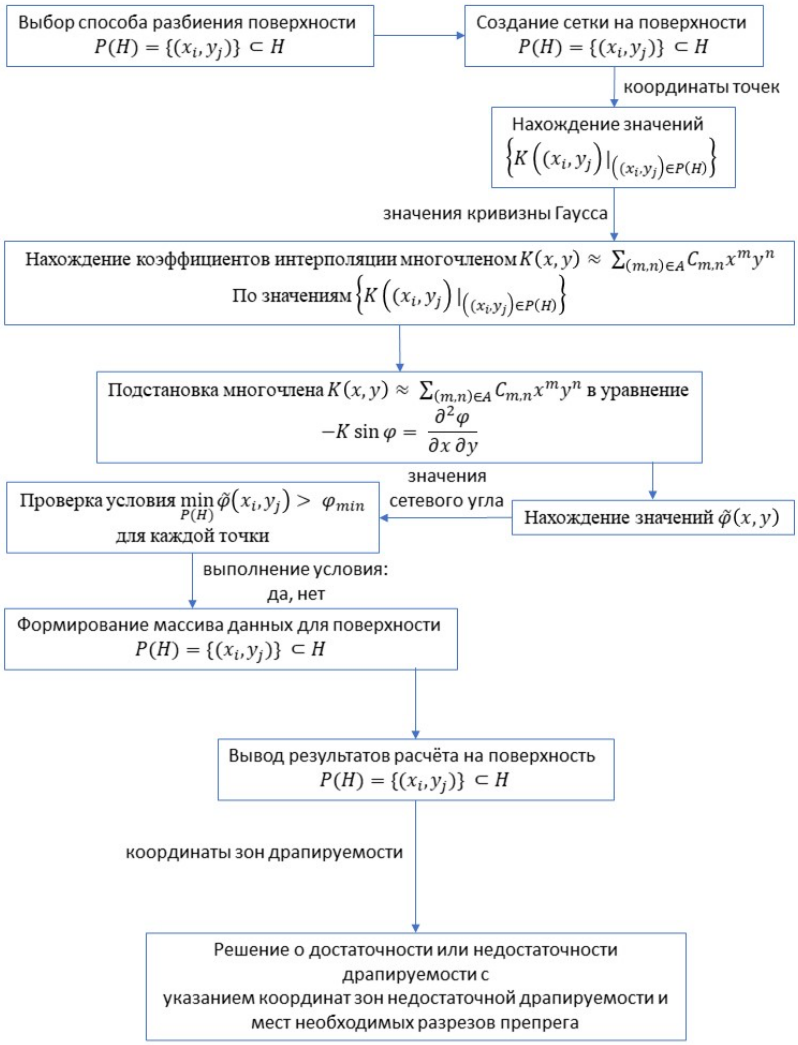

Рисунок 3 — Графическое представление алгоритма драпируемости материала в зависимости от поверхности

Для практической реализации предлагается аппроксимировать функцию кривизны поверхности многочленами двух переменных с использованием различных методов (многочлены Лагранжа, Ньютона, сплайны, полиномиальная регрессия). Для численного решения нелинейного дифференциального уравнения используются разностные схемы и итеративные методы (метод Ньютона, релаксация и др.) на выбранной сетке. Предложен алгоритм определения возможности драпировки поверхности заданным материалом.

Материал подготовлен в рамках Международного научно-технического симпозиума «Современные технологии создания и модифицирования полимерных и волокнистых материалов» (XVII Роговинские чтения) в рамках V Международного Косыгинского Форума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Ян Чэнь, Городецкий М. А., Нелюб В. А., Малышева Г. В. Алгоритм оптимизации технологических режимов формования композитов на основе эпоксидной матрицы. *Технология металлов*, 2019, № 2, с. 18–22.

DOI: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-18-22

[2]. Бородулин А. С. и др. Прочность границы раздела полимер-волокно в

конструкционных композиционных материалах. *Технология металлов*, 2022, № 9, с. 6–11.

DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-9-6-11

[3]. Терешков А. Г. и др. Методика оптимизации технологии изготовления препрега на основе термопластичного полимера. *Химическая промышленность сегодня*, 2022, № 5, с. 34–41.

DOI: 10.53884/27132854_2022_5_34

[4]. Рыклин Д. Б., Тан С. Разработка методики оценки драпируемости тканей. В кн.: *Материалы докладов 52-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов*: в 2 т. Т. 2. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2019, с. 255–257.

[5]. Тан С., Рыклин Д. Б., Крушевич К. А. Разработка математической модели поверхности драпированного образца ткани. В кн.: *Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь: материалы Международного научно-практического симпозиума.* Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2020, с. 114–116.

[6]. Привалов А. А. и др. Математическое моделирование сетей Чебышева на поверхности конуса. *Дизайн и технологии*, 2021, № 83-84(125-126), с. 105–115.

[7]. Степанов С. Е. О кройке одежды по Чебышёву. *Соросовский образовательный журнал*, 1998, № 7, с. 122–127.

[8]. Терешков А. Г. и др. Исследование показателей драпируемости технических тканей и термопластичных полимерных композиционных материалов на их основе. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2024, № 2(410), с. 69–75.

DOI: 10.47367/0021-3497_2024_2_69

[9]. Терешков А. Г. и др. Исследование зависимости сетевого угла от коэффициента драпируемости технических тканей и термопластичных препрегов на их основе. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2024, № 5(413), с. 240–245.

DOI: 10.47367/0021-3497_2024_5_240

Терешков Александр Геннадьевич — ведущий инженер, аспирант кафедры СМ-12, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Нелюб Владимир Александрович — д–р техн. наук, доцент, проректор по научной работе, Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10), профессор, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Бородулин Алексей Сергеевич — канд. техн. наук, директор НОЦ ФНС России и МГТУ им. Н. Э. Баумана, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

A combined approach to modeling the drapeability of technical fabrics and thermoplastic prepregs based on them

A. G. Tereshkov[*,1], **V. A. Nelyub**[*,**], **A. S. Borodulin**[*]

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*
***Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

Abstract

A combined approach to assessing the drapeability of technical fabrics and prepregs has been developed, taking into account both the mechanical properties of the material (drapeability coefficient) and the surface geometry (Gaussian curvature). Based on Chebyshev networks, a model has been created that relates the drapeability coefficient to the minimum permissible network angle. The relationship between the network angle and the geometric characteristics of the surface has been established. An algorithm for assessing the possibility of draping has been proposed and tested on complex-shaped rigs. The proposed approach allows for assessing the drapeability of fabrics and prepregs before laying out, reducing time and material costs.

Keywords

Drapeability, structural fabrics, thermoplastic prepregs, Chebyshev networks, Gaussian curvature, drapeability coefficient, mathematical modeling, polymer composite materials.

REFERENCES

[1]. Yan Chen, Gorodetskiy M. A., Nelyub V. A., Malysheva G. V. Algoritm optimizatsii tekhnologicheskikh rezhimov formovaniya kompozitov na osnove epoksidnoy matritsy [Algorithm for optimizing technological modes for molding composites based on an epoxy matrix]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals], 2019, no. 2, pp. 18–22. (In Russ.)

DOI: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-18-22

[2]. Borodulin A. S. et al. Prochnost' granitsy razdela polimer-volokno v konstruktsionnykh kompozitsionnykh materialakh [Strength of the polymer-fiber interface in structural composite materials]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals], 2022, no. 9, pp. 6–11. (In Russ.)

DOI: 10.31044/1684-2499-2022-0-9-6-11

[3]. Tereshkov A. G. et al. Metodika optimizatsii tekhnologii izgotovleniya preprega na osnove termoplasticheskogo polimera [Methodology for optimizing the manufacturing technology of prepreg based on thermoplastic polymer]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical Industry Today], 2022, no. 5, pp. 34–41. (In Russ.)

DOI: 10.53884/27132854_2022_5_34

[4]. Ryklind D. B., Tan S. Razrabotka metodiki otsenki drapiruemosti tkaney [Development of a methodology for assessing the drapeability of fabrics]. Materialy dokladov

[1] *Corresponding author:*
Email: atereshkov@emtc.ru

52-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov: v 2 [Proceedings of the 52nd International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students: in 2 vols. Vol. 2]. Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet [Vitebsk State Technological University], 2019, pp. 255-257. (In Russ.)

[5]. Tan S., Ryklind D. B., Krushevich K. A. Razrabotka matematicheskoy modeli poverkhnosti drapirovannogo obraztsa tkani [Development of a mathematical model of the surface of a draped fabric sample]. *Progressivnye tekhnologii i oborudovanie: tekstil', odezhda, obuv: materiały Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma* [Progressive Technologies and Equipment: Textiles, Clothing, Footwear: Proceedings of the International Scientific and Practical Symposium]. Vitebsk: Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet [Vitebsk State Technological University], 2020, pp. 114–116. (In Russ.)

[6]. Privalov A. A. et al. Matematicheskoe modelirovanie setey Chebysheva na poverkhnosti konusa [Mathematical modeling of Chebyshev networks on the surface of a cone]. *Dizain i tekhnologii* [Design and Technologies], 2021, no. 83-84(125-126), pp. 105–115. (In Russ.)

[7]. Stepanov S. E. O kroyke odezhdy po Chebyshyovu [About Chebyshev's clothing cutting]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1998, no. 7, pp. 122-127. (In Russ.)

[8]. Tereshkov A. G. et al. Issledovanie pokazateley drapiruemosti tekhnicheskikh tkaney i termoplasticheskikh polimernykh kompozitsionnykh materialov na ikh osnove [Study of drapeability indicators of technical fabrics and thermoplastic polymer composite materials based on them]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Technology of Textile Industry], 2024, no. 2(410), pp. 69–75. (In Russ.)

DOI: 10.47367/0021-3497_2024_2_69

[9]. Tereshkov A. G. et al. Issledovanie zavisimosti setevogo ugla ot koeffitsienta drapiruemosti tekhnicheskikh tkaney i termoplasticheskikh prepregov na ikh osnove [Study of the dependence of the network angle on the drape coefficient of technical fabrics and thermoplastic prepregs based on them]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Technology of Textile Industry], 2024, no. 5(413), pp. 240–245. (In Russ.)

DOI: 10.47367/0021-3497_2024_5_240

Tereshkov A. G. — Leading Engineer, Postgraduate Student of the SM-12 Department, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation).

Nelyub V. A. — Dr. Sc. (Eng.), Vice-Rector for Research, Far Eastern Federal University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation), Professor, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation).

Borodulin A. S. — Cand. Sc. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center of the Federal Tax Service of Russia and Bauman Moscow State Technical University, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Комбинированный подход к моделированию драпируемости технических тканей и термопластичных препрегов на их основе / А. Г. Терешков, В. А. Нелюб, А. С. Бородулин // Промышленные процессы и технологии. 2025. Т. 5. № 4(18). С. 74 – 86.

DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-4(18)-74-86

Please cite this article as:

Tereshkov A. G., Nelyub V. A., Borodulin A. S.A combined approach to modeling the drapeability of technical fabrics and thermoplastic prepregs based on them. Industrial Processes and Technologies, 2025, vol. 5, no. 4(18), pp. 74 – 86.

DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-4(18)-74-86