

**КОМПРОМИССНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ
ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ПРОЦЕССА ДЕКОРИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЙЛОКА**

**A COMPROMISE APPROACH IN SELECTING
THE OPTIMUM TECHNOLOGICAL MODE
FOR THE DECORATION PROCESS OF FELT PRODUCTS**

*И.Н. ЛЕДЕНЕВА, Е.А. КИРСАНОВА, П.А. СЕВОСТЬЯНОВ,
К.Э. РАЗУМЕЕВ, В.С. БЕЛГОРОДСКИЙ*

*I.N. LEDENEVA, E.A. KIRSANOVA, P.A. SEVOSTYANOV,
K.E. RAZUMEEV, V.S. BELGORODSKY*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: ledeneva-in@rguk.ru, kirsanova-ea@rguk.ru, sevostyanov-pa@rguk.ru

Показана актуальность проводимых исследований. Указаны задачи, которые способна решать бесконтактная лазерная пирография как способ декорирования войлочной обуви. В качестве объекта исследования выбран обувной войлок. Получены регрессионные модели зависимости характеристик материала от варьировавшихся в экспериментах факторов. Показан способ выбора критерия оптимизации технологического режима. Приведен пример решения многокритериальной задачи с использованием системы Matlab. Приведены режимы получения образцов войлока для испытаний. Предложен подход к выбору оптимального технологического режима процесса декорирования изделий из войлока с помощью метода построения компромиссного множества. Показаны особенности предложенного подхода. Показаны линии уровней кодированных критериальных функций и отмечены точки Парето – точки компромиссных решений. Представлен альтернативный подход к поиску решения многокритериальной задачи, в основе которого лежит использование минимаксного правила выбора оптимального решения.

The relevance of the ongoing research is shown. Problems that can be solved by non-contact laser pyrography as a method of decorating felt shoes are indicated. Shoe felt was chosen as the object of study. Regression models of the dependence of material characteristics on factors varied in experiments were obtained. A method for selecting a criterion for optimizing a technological regime is shown. An example of solving a multicriteria problem using the Matlab system is given. The modes for obtaining felt samples for testing are given. An approach and methods for solving a multicriteria problem for choosing the optimal technological mode for the process of decorating felt products using the method of constructing a compromise set are proposed. The features of the proposed method are shown. Lines of levels of coded criterion functions are shown and Pareto points - com-

promise solutions - are marked. An alternative approach to finding a solution to a multicriteria problem is presented, which is based on the use of a minimax rule for selecting the optimal solution.

Ключевые слова: бесконтактная пирография, обувной войлок, регрессионная модель, компромиссный подход.

Keywords: non-contact pyrography, shoe felt, regression model, compromise approach.

Введение

Эстетические показатели являются важными и актуальными при оценке качества обуви. Особенно актуальны они для молодежного ассортимента, но и для детей и людей пожилого возраста эстетика занимает одно из ключевых мест при выборе обуви. Применение новых способов декорирования обуви из валяльно-войлочных материалов позволит расширить ассортимент выпускаемой отечественной продукции, повысив тем самым ее конкурентоспособность. Бесконтактная лазерная пирография способна решить обозначенные задачи [1].

Вопросами эстетики и исследования свойств обувных материалов, в том числе нетканых, занимаются не только отечественные, но и зарубежные ученые [2-5].

В качестве примера исследовали образцы обувного войлока (ОСТ 17-531-75), обработанные поверхностным способом лазерной пирографии. Варьируемыми факторами были площадь заполнения рабочей зоны образца пирографией (25, 50 и 75 %) и толщина материала от 2,5 до 6,0 мм. По результатам двухфакторного эксперимента по оценке теплозащитных свойств методами регрессионного анализа для переменных толщин войлока построены регрессионные модели 2-го порядка, описывающие зависимость этих переменных от факторов площади заполнения рабочей зоны образца [6].

Данные модели использованы для решения задачи оптимизации с применением метода компромиссного подхода к выбору технологического режима декорирования верха обуви методом бесконтактной лазерной пирографии.

Поскольку при выборе оптимального режима важны все контролируемые переменные, необходимо решить задачу многокритериального выбора. Такого рода задачи решаются различными методами, одним из наиболее подходящих в нашем случае является метод компромиссных решений. При его использовании получают не единственное «оптимальное» решение, а множество компромиссных вариантов, более предпочтительных, чем другие решения, не принадлежащие компромиссному множеству.

Методы

Исследовали образцы обувного войлока (ОСТ 17-531-75), обработанные поверхностным способом лазерной пирографии. Перед началом испытаний вырубали образцы обувного войлока размером 200 x 50 мм. Размеры образца соответствуют стандартной методике испытания нетканых анизотропных материалов. Учитывая хаотическую анизотропную структуру исследуемого войлока, для получения достоверных результатов выполняли измерение 10 параллельных образцов с последующим нахождением среднего значения. При этом направление вырубания образцов – вдоль рулона войлока. Для обработки образцов лазерной пирографией применяли лазерно-гравировальное оборудование серии (С) Laser Line (В-1306 (С-120)). Подготовку образцов для исследования выполняли, используя следующие технологические режимы бесконтактной пирографии: луч лазера – сфокусированный, метод нанесения – точечный, установленная мощность лазера – 40 Вт, скорость резки – 15 мм/с, шаг резки – 0,005 Мк. Для обработки пирографией отметили рабочую зону образца, которая составила 100 x 40 мм [1]. По-

верхностная пирография характеризуется воздействием лазерного луча на 1/3 толщины материала. Исследование проводилось по плану полного двухфакторного эксперимента. Фактор x_1 – площадь заполнения рабочей зоны образца пирографией – варьировался на трех уровнях: 25%, 50% и 75 %, фактор x_2 – толщина материала – на уровнях 2,5 мм, 4,5 мм и 6,0 мм. В качестве контролируемых переменных – критериев оптимизации режима поверхностной пирографии – использованы: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; R – тепловое сопротивление, м²·К/Вт; Q – потери тепла, %. По результатам двухфакторного эксперимента построены регрессионные модели 2-го порядка, описывающие зависимость этих переменных от факторов площади заполнения рабочей зоны образца.

Результаты и обсуждения

При построении регрессионных моделей значения каждого из факторов были преобразованы в безразмерные переменные по формуле

$$X_j = \frac{x_j - \frac{\min\{x_j\} + \max\{x_j\}}{2}}{\frac{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}}{2}}, \quad j = 1, 2.$$

После проверки значимости коэффициентов и адекватности моделей на уровне значимости 5% регрессионные зависимости имеют вид

$$\lambda = 0,0572 + 0,0012X_1 - 0,0104X_2 - 0,0039X_1X_2 + 0,0005X_1^2 - 0,0043X_2^2, \quad (1)$$

$$R = 0,5371 - 0,0052X_1 + 0,123X_2 + 0,0066X_1X_2 - 0,0217X_1^2 - 0,0259X_2^2, \quad (2)$$

$$Q = 16,5520 + 8,8712X_1 + 3,4561X_2 + 3,3914X_1X_2 - 5,3201X_1^2 - 4,2791X_2^2. \quad (3)$$

Модели использованы для выбора оптимального технологического режима декорирования верха обуви способом бесконтактной лазерной пирографии.

Поскольку важными являются все три критерия: λ , R и Q , то был выбран метод компромиссных решений [7, 8]. Описываемый эксперимент, в котором контролиру-

емые переменные измерялись одновременно на одних и тех же образцах материала при одинаково варьируемых факторах, позволяет решать задачу компромисса с применением автоматизированных процедур решения в программной системе Matlab:

$$\begin{aligned} \lambda(X_1, X_2) &\rightarrow \min_{X_1, X_2}, \\ R(X_1, X_2) &\rightarrow \max_{X_1, X_2}, \\ Q(X_1, X_2) &\rightarrow \min_{X_1, X_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Критерии имеют разные единицы измерения, разные масштабы значений и разную направленность: по первому и третьему критериям следует найти решение, минимизирующее в рассматриваемых границах факторов эти критерии, второй критерий следует максимизировать. Поэтому преобразуем масштаб всех функций, начало отсчета и знак функции R таким образом, чтобы все функции были минимизируемыми и равными 1 в начале координат. Преобразованные описанным образом критериальные функции равны

$$\lambda_c = (0,0572 + 0,0012X_1 - 0,0104X_2 - 0,0039X_1X_2 + 0,0005X_1^2 - 0,0043X_2^2) / 0,0572, \quad (5)$$

$$R_c = -(0,5371 - 0,0052X_1 + 0,123X_2 + 0,0066X_1X_2 - 0,0217X_1^2 - 0,0259X_2^2) / 0,5371 + 2, \quad (6)$$

$$Q_c = (16,5520 + 8,8712X_1 + 3,4561X_2 + 3,3914X_1X_2 - 5,3201X_1^2 - 4,2791X_2^2) / 16,5520. \quad (7)$$

Метод построения компромиссного множества состоит в том, что выделяется не одна «оптимальная» точка X^* , а небольшое по размерам подмножество значений факторов $S_{X^*} = \{X_1, X_2\}$ – так называемое компромиссное множество, которое объединяет в себе наиболее предпочтительные по каждому из частных критериев значения факторов. Затем окончательное решение выбирает исследователь неформальным образом с учетом других

факторов, влияющих на оптимальность технологического режима.

Для поиска компромиссного множества решений использована процедура построения оптимального по Парето компромиссного множества, реализованная в математическом программном пакете Matlab.

В табл. 1 приведены номера компромиссного множества, значения частных критериальных функций для этих точек (функция Q с обратным знаком) и значения факторов в этих точках. Из этих значений и следует выбирать квазиоптимальное значение для факторов, обеспечивающее величины критериев – не оптимальные, но близкие к ним.

Т а б л и ц а 1

№№	λ_c	R_c	Q_c	X_1	X_2
1	0,7435	0,8195	0,9565	0,0074	0,9973
2	0,7059	0,8572	1,3697	0,9964	0,9966
3	0,7398	0,8208	1,0480	0,1365	0,9908
4	0,7888	0,8479	0,1679	-0,7912	0,9889
5	0,7676	0,8285	0,6144	-0,3940	0,9845
6	0,7949	0,8564	-0,0043	-0,9221	0,9962
7	0,7558	0,8225	0,7536	-0,2414	0,9970
8	0,7534	0,8218	0,8391	-0,1455	0,9893
9	0,8009	0,8618	-0,0737	-0,9769	0,9870
10	0,8002	0,8625	-0,1023	-0,9953	0,9937
11	0,7934	0,8458	0,3303	-0,6716	0,9475

При таких условиях наиболее предпочтительными значениями факторов будут: $X_1 = -0.145\dots$, $X_2 = +1$ (в кодированных единицах).

Подход, альтернативный методу применения компромиссного множества, заключается в поиске решения многокритериальной задачи (4) на основе использования минимаксного правила выбора оптимального решения. Это правило формально можно представить в виде

$$\begin{cases} \lambda_c (X_1, X_2) \rightarrow \min_{X_1, X_2}, \\ R_c (X_1, X_2) \rightarrow \min_{X_1, X_2}, \\ Q_c (X_1, X_2) \rightarrow \min_{X_1, X_2}. \end{cases} \quad (8)$$

Согласно этому правилу оптимальным считается решение X^* , при котором наибольшее значение минимизируемых частных критериальных функций достигнет наименьшего значения. Очевидно, что

при этом остальные критериальные функции примут еще меньшие значения.

Для решения задачи (8) использован инструментарий, используемый при решении задач глобальной оптимизации системы Matlab.

Из результатов полученного решения следует, что оптимальным является решение удерживать фактор X_2 на уровне +1. Для фактора X_1 предлагается значение – 0,1633 (в кодированных величинах). При этом оптимальные значения кодированных критериальных функций равны $\lambda_c^* = 0,751$; $R_c^* = 0,821$; $Q^* = 0,821$.

В Ы В О Д Ы

Предложен подход и методы решения многокритериальной задачи для выбора оптимального технологического режима. Они основаны на Парето – компромиссных множествах и минимаксном методе оптимизации. Приведен пример решения многокритериальной задачи с использованием средств автоматизации решения системы Matlab. Аналогичный анализ предложенными методами (компромиссным и минимаксным) можно применить и к другим регрессионным моделям, которые были получены для других материалов и описаны ранее [11].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Леденева И.Н., Сницар Л.Р. Бесконтактная пирография – как способ улучшения эстетических свойств обуви с верхом из войлока // Дизайн и технологии. 2020. № 75. С. 19...24.
2. Dobson J. Aesthetic Style as a Poststructural Business Ethic // Journal of Business Ethics. 2010, vol. 93, № 3. P. 393...400.
3. Whiting D. Aesthetic Reasons and the Demands They (Do Not) Make // The Philosophical Quarterly. 2021, vol. 71, № 2. P. 407...427.
4. Li Pui-Ling, Yick Kit-Lun, Yip Joanne, Sun-Pui Ng. Influence of upper footwear material properties on foot skin temperature, humidity and perceived comfort of older individuals // Res. Public Health. 2022. № 19 (17).
5. Lafortune M.A, Hennig E.M. Cushioning properties of footwear during walking: accelerometer and force platform measurements // Clinical Biomechanics. 1992, vol. 7, № 3. P. 181...184.

6. *Сницар Л.Р., Леденева И.Н.* Комплексная оценка потерь тепла обувным войлоком, обработанным бесконтактной лазерной пирографией // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2022): сб. к материалов междунар. науч.-техн. конф. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. Ч. 1. С. 199...202.

7. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит, 2005. 176 с.

8. *Подиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач: монография. М.: Физматлит, 2007. 255 с.

9. *Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М.* Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 352 с.

10. *Соболь И.М., Статников Р.Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука. 1982. 110 с.

11. *Леденева И.Н., Гинзбург Л.И.* Методика прогнозирования гигиенических свойств обуви с верхом из войлока // Дизайн и технологии. 2015. № 49. С. 32...41.

REFERENCES

1. *Ledeneva I.N., Snitsar L.R.* Non-contact pyrography - as a way to improve the aesthetic properties of shoes with felt uppers // Design and technology. 2020, No. 75. P. 19...24.

2. *Dobson J.* Aesthetic Style as a Postructural Business Ethic // Journal of Business Ethics. 2010, vol. 93, № 3. P. 393...400.

3. *Whiting D.* Aesthetic Reasons and the Demands They (Do Not) Make // The Philosophical Quarterly. 2021, vol. 71, № 2. P. 407...427.

4. *Li Pui-Ling, Yick Kit-Lun, Yip Joanne, Sun-Pui Ng.* Influence of upper footwear material properties on foot skin temperature, humidity and perceived comfort of older individuals // Res. Public Health. 2022. № 19 (17).

5. *Lafortune M.A, Hennig E.M.* Cushioning properties of footwear during walking: accelerometer and force platform measurements // Clinical Biomechanics. 1992, vol. 7, № 3. P. 181...184.

6. *Snitsar L.R., Ledeneva I.N.* Comprehensive assessment of heat loss by shoe felt processed by non-contact laser pyrography // Intern. sci.-tech. conf. "Design, technology and innovation in the textile and light industry" (INNOVATION-2022). М.: RSU im. A.N. Kosygina, 2022. Part 1. P. 199...202.

7. *Nogin V.D.* Decision making in a multicriteria environment. Quantitative approach. Ed. 2nd, corrected. and additional. Moscow: Fizmatlit, 2005. 176 p.

8. *Podinovsky V.V., Nogin V.D.* Pareto-optimal solutions of multiobjective problems: monograph. Moscow: Fizmatlit, 2007. 255 p.

9. *Moiseev N.N., Ivanilov Yu.P., Stolyarova E.M.* Optimization methods. М.: Science, 1978. 352 p.

10. *Sobol I.M., Statnikov R.B.* Choice of optimal parameters in problems with many criteria. М.: Science, 1982. 110 p.

11. *Ledeneva I.N., Ginzburg L.I.* A method for predicting the hygienic properties of shoes with a felt top // Design and technology. 2015. No. 49. P. 32...41.

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи РГУ имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство). Поступила 27.11.23.