

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 685.343.2

EDN GQNOCA

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-23-28>

Людмила Раймантовна Сницар¹

Ирина Николаевна Леденева²

Петр Алексеевич Севостьянов³

Татьяна Алексеевна Самойлова⁴

^{1,2,3,4}Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

¹snitsar-lr@rguk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0053-2691>

²ledeneva-in@rguk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5074-5186>

³petrsev46@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9919-5551>

⁴tasamo89@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-0011>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕКОРИРОВАНИЯ ВОЙЛОЧНОЙ ОБУВИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПИРОГРАФИЕЙ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос влияния воздействия лазерной пирогравией на образцы войлока с целью декорирования верха обуви. Представлены результаты математического моделирования процесса лазерного декорирования деталей верха обуви из войлока. Особое внимание в статье уделено оценке коэффициентов регрессионной модели, для нахождения которых использовали метод наименьших квадратов. Описываются характерные особенности проверки значимости оценок коэффициентов, выполненной по стандартной методике линейного многофакторного регрессионного анализа. Адекватность модели проверили по квадрату коэффициента детерминации. Проведенные исследования и расчеты доказали, что в войлочной обуви следует использовать контурное выжигание, так как для ее декорирования будет применен сложный рисунок, который создается с использованием специального программного обеспечения.

Ключевые слова: войлок, лазерная поверхностная пирогравия, регрессионная модель, коэффициент детерминации, функции отклика, контурное выжигание, методика многофакторного регрессионного анализа

Для цитирования. Математическое моделирование процесса декорирования войлочной обуви поверхностной пирогравией / Л. Р. Сницар, И. Н. Леденева, П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова // Технологии и качество. 2025. № 2(68). С. 23–28. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-23-28>.

Original article

Lyudmila R. Snitsar¹

Irina N. Ledeneva²

Petr A. Sevostyanov³

Tatiana A. Samoilova⁴

^{1,2,3,4} Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

MATHEMATICAL MODELLING OF THE PROCESS OF DECORATION OF FELT SHOES BY SURFACE PYROGRAPHY

Abstract. The article considers the issue of the effect of laser pyrography on felt samples for the purpose of decorating the upper of shoes. The results of mathematical modelling of the process of laser decoration of upper parts of felt shoes are presented. Particular attention is paid to the assessment of the coefficients of the

© Сницар Л. Р., Леденева И. Н., Севостьянов П. А., Самойлова Т. А., 2025

regression model for finding which, the least squares method was used. The characteristic features of checking the significance of coefficient estimates, performed according to the standard method of linear multivariate regression analysis, are described. The adequacy of the model was checked by the square of the determination coefficient. The conducted research and calculations proved that contour burning should be used in felt shoes, since a complex pattern will be used for its decoration, which is created using special software.

Keywords: felt, laser surface pyrography, regression model, determination coefficient, response functions, contour burning, multivariate regression analysis technique

For citation: Snitsar L. R., Ledeneva I. N., Sevostyanov P. A., Samoilova T. A. Mathematical modelling of the felt shoe decoration process by surface pyrography. Technologies & Quality. 2025. No 2(68). P. 23–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-23-28>.

Эстетические показатели занимают особое место при оценке качества обуви. Эстетические свойства особенно актуальны для молодежного ассортимента, так как помогают в популяризации потребления предметов с определенными, заданными параметрами. Вопросами декорирования изделий и применения методов математического моделирования занимаются не только российские, но и зарубежные ученые, в работах которых уделяется особое внимание эстетическим свойствам изделий и методам их оценки [1–4].

Бесконтактная лазерная пирогRAFия относится к группе физико-механических способов декорирования обуви, в том числе из валяльно-войлочных материалов. Для оценки физико-механических свойств войлока для верха обуви, декорированного поверхностной пирогRAFией, в работе применили разрывную машину Инстرون 4411. Для оценки коэффициентов регрессионной модели использовали метод наименьших квадратов. Проверку значимости оценок коэффициентов выполнили по стандартной методике линейного многофакторного регрессионного анализа. Адекватность модели проверили по квадрату коэффициента детерминации [5].

Перед началом испытаний вырубали образец обувного войлока размером 200×50 мм. Размеры образца соответствуют стандартной методике испытания нетканых анизотропных материалов. Учитывая хаотическую анизотропную структуру исследуемого войлока, для получения достоверных результатов выполняли измерение в 10 повторностях с последующим нахождением среднего значения. При этом направление вырубания образцов – вдоль рулона войлока. Для обработки образцов лазерной пирогRAFией применили лазерно-гравировальное оборудование серии (C) Laser Line (B-1306 (C-120)). Подготовку образцов для исследования выполняли, используя следующие технологические режимы бесконтактной пирогRAFии: луч лазера – сфокусированный; метод нанесения – векторный; установленная мощность лазера 40 Вт; скорость

резки 15 мм/с; шаг резки 0,005 м. Для обработки пирогRAFией отметили рабочую зону образца, которая составила 100×40 мм. Обработку выполняли из расчета заполнения поверхностной пирогRAFией 25, 50 и 75 % от площади рабочей зоны образца [6–9].

Результаты исследования физико-механических свойств войлока для верха обуви толщиной от 2,5 до 6,0 мм представлены в работе [7].

Полученные в работе [7] данные являются результатами эксперимента по изучению пяти физико-механических свойств обувного войлока. Применение метода математического моделирования [10–15] приведено на примере одного из показателей физико-механических свойств материала – предела прочности при растяжении δ , МПа.

Варьируемыми факторами выбрали толщину h и площадь обработки образца S . Первый фактор варьировался на трех уровнях, второй фактор варьировался на четырех уровнях. В качестве плана варьирования использован план полного факторного эксперимента. Повторные опыты для каждой комбинации уровней факторов не проводились. В эксперименте в качестве функций отклика одновременно измеряли значения пяти показателей. После завершения эксперимента построены регрессионные модели для каждой из функций отклика в виде

$$Y(X_1, X_2) = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_1 X_2 + C_4 X_1^2 + C_5 X_2^2.$$

Модель записана и построена в кодированных переменных. Кодирование выполнено по стандартной методике:

$$X_1 = \frac{h - \frac{\min(h) + \max(h)}{2}}{\frac{\min(h) - \max(h)}{2}};$$

$$X_2 = \frac{S - \frac{\min(S) + \max(S)}{2}}{\frac{\min(S) - \max(S)}{2}}.$$

Уровни факторов в размерных и кодированных переменных для всех 12 опытов эксперимента приведены в таблице 1.

Количество опытов позволяет не только оценить 6 коэффициентов регрессии, но и про-

верить качество модели по коэффициенту детерминации и оценить значимость найденных коэффициентов.

Поверхностная пирография характеризуется воздействием лазерного луча на материал на 1/3 его толщины. В таблице 2 приведены точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии при доверительной вероятности 0,95 для предела прочности при растяжении образцов войлока (δ , МПа).

Т а б л и ц а 1

Матрица кодированных факторов

№ опыта	h	X_1	S	X_2
1	2,5000	-1,0000	0	-1,0000
2	2,5000	-1,0000	25	-0,3333
3	2,5000	-1,0000	50	0,3333
4	2,5000	-1,0000	75	1,0000
5	5,0000	0,4286	0	-1,0000
6	5,0000	0,4286	25	-0,3333
7	5,0000	0,4286	50	0,3333
8	5,0000	0,4286	75	1,0000
9	6,0000	1,0000	0	-1,0000
10	6,0000	1,0000	25	-0,3333
11	6,0000	1,0000	50	0,3333
12	6,0000	1,0000	75	1,0000

Т а б л и ц а 2

Точечные и интервальные оценки функции отклика

Коэффициент	Точечная оценка	Интервальная оценка
C_0	4,6879	4,1874; 5,1884
C_1	0,6300	0,3906; 0,8694
C_2	-1,4311	-1,6971; -1,1650
C_3^*	0,2001	-0,1117; 0,5119
C_4^*	0,0398	-0,4835; 0,5632
C_5	-0,6619	-1,1018; -0,2220

Незначимые коэффициенты отмечены в таблице звездочкой *.

Таким образом, после исключения эффектов с незначимыми коэффициентами модель зависимости δ , МПа от факторов в кодированных переменных имеет вид:

$$Y(X_1, X_2) = 4,69 + 0,63 X_1 - 1,43 X_2 - 66 X_2^2. \quad (1)$$

На рисунке 1 показаны экспериментальные значения переменной δ , МПа и поверхность регрессионной модели в кодированных значениях факторов (видны 10 из 12 точек). На рисунке 2 показаны линии уровня этой поверхности в плоскости. Регрессионная модель показывает, что отклик δ линейно и прямо пропорционально зависит от фактора h и квадратично – от фактора S , причем с ростом его значений отклик убывает. Эффект взаимодействия факторов оказался незначимым, что говорит о независимом друг от друга влиянии факторов на отклик.

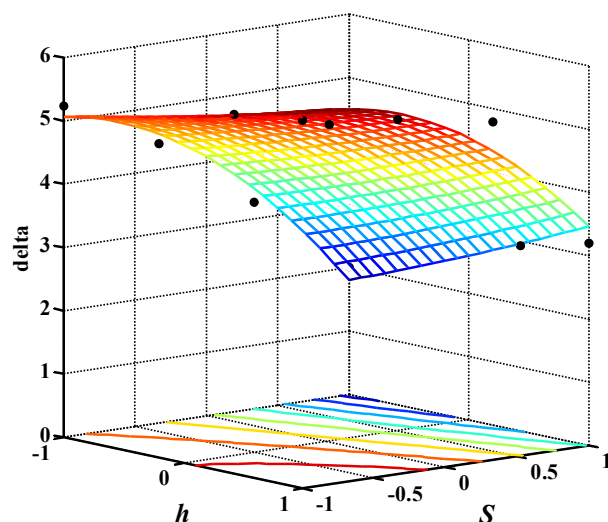


Рис. 1. Поверхность модельной функции отклика от кодированных уровней факторов

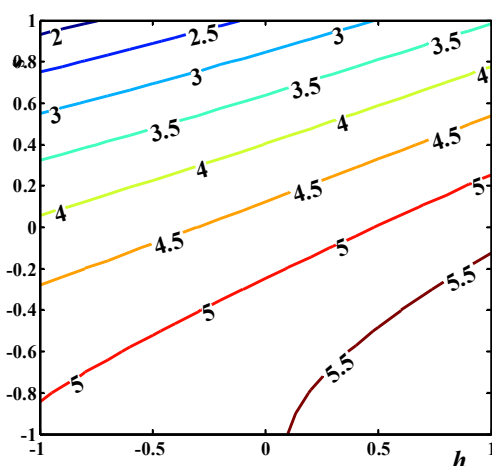


Рис. 2. Линии уровня модельной функции отклика от кодированных уровней факторов

О качестве регрессионной модели говорят интервальные оценки остатков, показанные на рисунке 3. Как видно, все они, кроме одного, являются незначимыми.

В таблице 3 приведены наблюдавшиеся и модельные значения отклика, которые говорят об адекватности модели.

Квадрат коэффициента конкордации

$$Q = 1 - \frac{\left(\frac{\sum_{j=1}^{12} r_j^2}{(12-6)} \right)}{\left(\frac{\sum_{j=1}^{12} \delta_j^2}{(12-1)} \right)} = 0,9535,$$

что также говорит о хорошем качестве прогнозной способности модели.

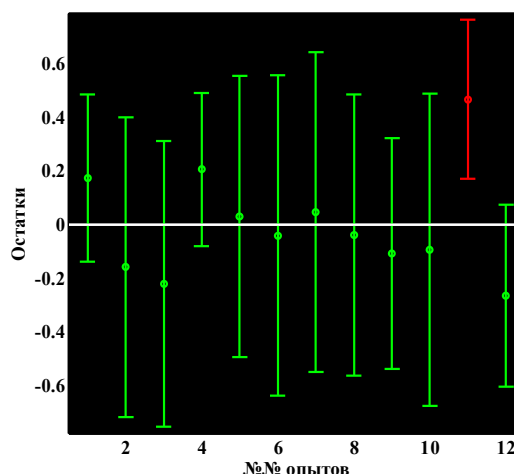


Рис. 3. Интервальные оценки остатков

Проведенные исследования и расчеты доказали, что в войлочной обуви следует использовать контурное выжигание, так как для ее декорирования будет применен сложный рисунок, который создается с использованием специального программного обеспечения. Элементы главного рисунка должны компоноваться между собой так, чтобы композиция в целом выглядела гармонично и сочеталась с основной идеей самого рисунка [6, 8, 9].

ВЫВОД

Примененный метод однофакторного регрессионного анализа и построенные многофакторные регрессионные модели 2-го порядка позволяют целесообразно подойти к процессу прогнозирования свойств обуви с верхом из войлока с рисунком, нанесенным методом лазерной пирографии.

Т а б л и ц а 3

Наблюдавшиеся и модельные значения отклика

№ опыта	Экспериментальные значения	Модель	Остатки	95%-й интервал для остатков
1	5,2400	5,0670	0,1730	-0,1371; 0,4830
2	4,4100	4,5679	-0,1579	-0,7155; 0,3997
3	3,2600	3,4804	-0,2204	-0,7521; 0,3112
4	2,0100	1,8046	0,2054	-0,0800; 0,4908
5	5,6800	5,6487	0,0313	-0,4918; 0,5545
6	5,3000	5,3401	-0,0401	-0,6357; 0,5555
7	4,4900	4,4432	0,0468	-0,5483; 0,6418
8	2,9200	2,9580	-0,0380	-0,5606; 0,4846
9	5,8200	5,9268	-0,1068	-0,5369; 0,3233
10	5,6000	5,6945	-0,0945	-0,6755; 0,4865
11	5,3400	4,8738	0,4662	0,1695; 0,7628
12	3,2000	3,4649	-0,2649	-0,6034; 0,0737

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dobson J. Aesthetic Style as a Postructural Business Ethic // Journal of Business Ethics. 2010. Vol. 93, No 3. P. 393–400.
2. Whiting D. Aesthetic Reasons and the Demands They (Do Not) Make // The Philosophical Quarterly. 2021. Vol. 71, Is. 2. P. 407–427.

3. Influence of Upper Footwear Material Properties on Foot Skin Temperature, Humidity and Perceived Comfort of Older Individuals / Pui-Ling Li, Kit-Lun Yick, Joanne Yip, Sun-Pui Ng // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. No. 19(17). P. 10861.
4. Lafortune M. A., Hennig E. M. Cushioning properties of footwear during walking: accelerometer and force platform measurements // *Clinical Biomechanics*. 1992. Vol. 7, Is. 3. P. 181–184.
5. Леденева И. Н., Сницар Л. Р. Бесконтактная пирография – как способ улучшения эстетических свойств обуви с верхом из войлока. *Дизайн и технологии*. 2020. № 75(117). С 19–24.
6. Математическое моделирование процесса бесконтактной поверхностной пирографии на обувных нетканых материалах / И. Н. Леденева, П. А. Севостьянов, Л. Р. Сницар, В. С. Белгородский // *Вестник технологического университета*. 2023. Т. 26, № 10. С. 136–142.
7. Сницар Л. Р., Леденева И. Н. Влияние пирографии на деформационно-прочностные свойства заготовок верха из обувного войлока // *Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации-2020) : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2020. С. 123–125.*
8. Сницар Л. Р., Леденева И. Н. Выбор технологических режимов декорирования деталей обуви из войлока пирографией // *Дизайн и технологии*. 2024. № 102(144). С. 21–27.
9. Леденева И. Н., Авдонина М. А. О применении цифровых технологий для повышения эстетических характеристик войлочной обуви // *Современные инновационные технологии в легкой промышленности: проблемы и решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. Бухара : БИТИ, 2021. С. 36–42.*
10. Севостьянов А. Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. М. : МГТУ им. А. Н. Косыгина : СовъязБево, 2007. 646 с.
11. Севостьянов П. А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов. М. : Тисо Принт, 2013. 253 с.
12. Севостьянов П. А. Компьютерное моделирование технологических систем и продуктов прядения. М. : Информ-Знание, 2006. 447 с.
13. Севостьянов П. А., Ордов К. В. Основы анализа и моделирования данных в технике и экономике. М. : Тисо Принт, 2015. 409 с.
14. Севостьянов П. А., Игонина М. А. Разработка автоматизированной системы моделирования трикотажных полотен из новых видов пряжи : труды 4-й Междунар. науч.-техн. конф. «Компьютерное моделирование – 2003». СПб. : СПбГПУ, 2003. С. 285.
15. Севостьянов П. А., Серякова Т. В. Компьютерное моделирование методом конечных элементов взаимодействия нетканого материала с иглами в процессе иглопрокалывания // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2008. № 4(309). С. 107–109.

REFERENCES

1. Dobson J. Aesthetic Style as a Postructural Business Ethic. *Journal of Business Ethics*. 2010;93(3):393–400.
2. Whiting D. Aesthetic Reasons and the Demands They (Do Not) Make. *The Philosophical Quarterly*, 2021;71(2):407–427.
3. Pui-Ling Li, Kit-Lun Yick, Joanne Yip, Sun-Pui Ng. Influence of Upper Footwear Material Properties on Foot Skin Temperature, Humidity and Perceived Comfort of Older Individuals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(17):10861.
4. Lafortune M. A., Hennig E. M. Cushioning properties of footwear during walking: accelerometer and force platform measurements. *Clinical Biomechanics*. 1992;7(3):181–184.
5. Ledeneva I. N., Snitsar L. R. Non contact pyrography – as a way to improve the aesthetic properties of shoes with felt top. *Dizajn i tekhnologii* [Design and technology]. 2020;75(117):19–24. (In Russ.)
6. Ledeneva I. N., Sevostyanov P. A., Snitsar L. R., Belgorodsky V. S. Mathematical modeling of the process of contactless surface pyrography on shoe non-woven materials. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin Technological University]. 2023;26(10):136–142. (In Russ.)
7. Snitsar L. R., Ledeneva I. N. Influence of pyrography on the deformation and strength properties of upper blanks made of shoe felt. *Dizajn, tekhnologii i innovacii v tekstil'noj i legkoj promyshlennosti (Innovacii-2020)* [Design, technology and innovations in the textile and light industry (Innovations-2020)]. Int. scientific-technical. conf. Moscow, Rus. St. Technol. Univ. im. Publ. 2020. Part 1. P. 123–125. (In Russ.)
8. Snitsar L. R., Ledeneva I. N. Option of the technological modes for decorating felt footwear parts with pyrography. *Dizajn i tekhnologii* [Design and Technology]. 2024;102(144):21–27. (In Russ.)

9. Ledeneva I. N., Avdonina M. A. On the use of digital technologies to improve the aesthetic characteristics of felt shoes. *Sovremennye innovacionnye tekhnologii v legkoj promyshlennosti: problemy i resheniya* [Modern innovative technologies in light industry: problems and solutions]. Materials Int. scientific-practical conf. Part 1. Bukhara, BITI Publ., 2021. P. 36–42. (In Russ.)
10. Sevostyanov A. G. Methods and means for studying mechanical and technological processes in the textile industry. Moscow, Moscow St. Technol. Univ. im. A. N. Kosygina Publ., Sovyazh Bevo Publ., 2007. 646 p. (In Russ.)
11. Sevostyanov P. A. Computer models in the mechanics of fibrous materials. Moscow, Tiso Print Publ., 2013. 253 p. (In Russ.)
12. Sevostyanov P. A. Computer modeling of technological systems and spinning products. Moscow, Inform-Znanie Publ., 2006. 447 p. (In Russ.)
13. Sevostyanov P. A., Ordov K. V. Fundamentals of data analysis and modeling in engineering and economics. Moscow, Tiso Print Publ., 2015. 409 p. (In Russ.)
14. Sevostyanov P. A., Igonina M. A. Development of an automated system for modeling knitted fabrics from new types of yarn. *Komp'yuternoe modelirovanie – 2003* [Computer Modeling-2003], Proceedings of the 4th international scientific and technical. conf. Saint Petersburg, Saint Petersburg St. Polytech. Univ. Publ. 2003. P. 285. (In Russ.)
15. Sevostyanov P. A., Seryakova T. V. Computer modeling by the finite element method of interaction of nonwoven material with needles during needle-puncture. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Textile Industry Technology (Series Proceedings of Higher Educational Institutions)]. 2008;4(309):107–109. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.03.2025
Принята к публикации 20.05.2025