УДК 677.024
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_284

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗУБЬЕВ БЕРДА ПРИ МНОГОРАПИРНОМ ФОРМИРОВАНИИ 3D-ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ *

CALCULATION OF THE TRAJECTORY OF REED TEETH MOVEMENT IN MULTI- RAPIER FORMATION OF 3D ORTHOGONAL FABRIC

И.В. СТАРИНЕЦ[1], А.П. ГРЕЧУХИН[1,2], А.С. РАЗИНА[2], П.Н. РУДОВСКИЙ[1], А.В. КУЛИКОВ[1,2]

I.V. STARINETS[1], A.P. GRECHUKHIN[1,2], A.S. RAZINA[2], P.N. RUDOVSKY[1], A.V. KULIKOV[1,2]

([1]Костромской государственный университет,
[2]АО «Композит», Россия)

([1]Kostroma State University,
[2]JSC «Kompozit», Russia)

E-mail: niskstu@yandex.ru; 02421@kompozit-mv.ru

В статье представлены зависимости для расчета траектории движения зубьев берда прибойного механизма при создании 3D-ортогональной ткани с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования. Формиро-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00164, https://rscf.ru/project/25-29-00164/

вание ткани осуществляется на многорапирном ткацком станке с одновременным прокладыванием нитей одной системы.

В работе использованы расчетные методы исследования. Выбор траектории производится из условия минимизации трения между нитями вертикального утка и элементами технологической оснастки. Отличительной особенностью технологии является перемещение берда в двух плоскостях – горизонтальной и вертикальной. Разработан новый подход к формированию траектории движения берда при производстве 3D-тканей, что позволяет обоснованно подойти к созданию методики проектирования программируемого привода прибойного механизма.

Полученные результаты имеют существенное значение для развития технологии текстильного производства и повышения эффективности оборудования.

This article presents dependencies for calculating the reed tooth trajectory of a beater-up machine during the formation of 3D orthogonal fabric bound with a single yarn system in the formation zone. Fabric formation is performed on a multi-rapier weaving machine with the simultaneous insertion of yarns of a single system.

Computational research methods are used in this study. The trajectory is selected to minimize friction between the vertical weft yarns and the production tooling elements. A distinctive feature of this technology is the reed movement in two planes – horizontal and vertical. As a result, a new approach to reed trajectory generation in 3D fabric production has been developed, enabling a well-founded approach to the development of a design methodology for a programmable beater-up machine drive.

These results are of significant importance for the development of textile production technology and the improvement of equipment efficiency.

Ключевые слова: трехмерная ортогональная ткань, уточная нить, многорапирный ткацкий станок, трение нитей.

Keywords: three-dimensional orthogonal fabric, weft thread, multi-rapier loom, thread friction.

Введение

Трехмерное ортогональное ткачество находит все более широкое применение в производстве технических тканей различной функциональности [1…3]. Основными их видами являются баллистические ткани [4…11] и тканые армирующие наполнители композитов [12, 13].

Основным преимуществом таких тканей является высокая степень заполнения объема изделия нитями. Она может составлять 0,4...0,6 и соперничать с армирующими наполнителями, полученными намоткой [14…17].

Общим недостатком технологии 3D ткачества является низкая производительность, связанная с необходимостью прокладывания уточных нитей в двух плоскостях – горизонтальной и вертикальной [18…21].

Использование многоуточных технологий позволяет увеличить производительность трехмерного ткачества. Одним из вариантов такой технологии является 3D ортогональное ткачество с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [22…26]. Бердо в такой технологии является не только прибойным механизмом, но и механизмом, прокладывающим нити вертикальной системы уточных нитей. Для осуществления такой функции бердо должно перемещаться по сложному закону в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Закон движения берда в двух плоскостях ранее не рассматривался, подобная задача решается впервые. Целью настоящей работы является определение закона движения берда в цикле формирования ткани, обеспечивающего минимальное трение нитей о зубья берда.

Результаты и их обсуждение

Схема перемещения берда представлена на рис. 1. Бердо при прокладывании горизонтального утка находится в положении 1. После прокладывания уточных нитей бердо перемещается в положение 2, осуществляя процесс прибоя. Для минимизации трения нитей вертикального утка о глазки зубьев берда бердо отходит назад в положение 3, а затем перемещается по окружности вверх в положение 4. В этот момент осуществляется прокладывание кромочной нити, фиксирующей нити вертикального утка. Минимизация трения достигается выбором траектории движения зуба берда. Действительно сила трения при огибании цилиндра нитью обращается в ноль в двух случаях:

1) если угол огибания равен нулю;
2) отсутствует скольжение нити по цилиндру.

Первый из указанных случаев реализован при движении зуба берда из положения 1 в положение 2, а также из положения 2 в положение 3, второй – при движении зуба берда из положения 3 в положение 4 и обратно.

Параметры *Hk* и *Lk* определяют размеры пространства, в которое осуществляется прокладывание кромочной нити.

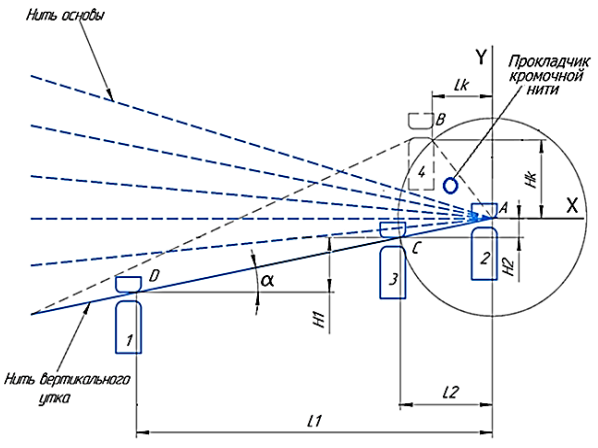

Рис. 1

На рис. 1 показаны положения берда в различных зонах станка, а также представлены следующие обозначения: *A* – точка касания вертикального утка и зуба берда в момент прибоя; *B, C, D* – точки контакта нити вертикального утка с зубом берда в различных зонах станка; *H1, H2* – расстояния между точками *CD* и *AC* по вертикали соответственно; *L1, L2* – расстояния, на которые перемещается бердо по горизонтали; *Lk, Hk* – параметры, определяющие положение берда при прокладывании кромочной нити вертикального утка.

Из рис. 1

$$L_{AB} = \sqrt{(Lk^2 + Hk^2)}\,. \qquad (1)$$

Учитывая, что $L_{AB} = L_{AC}$, получим

$$H1 = L_{AB}\sin\alpha, \qquad (2)$$

$$L2 = L_{AB}\cos\alpha. \qquad (3)$$

Перемещение берда из положения 1 в положение 2 определится следующим образом:

$$L1 = (H2 + H1)/tg\ \alpha. \qquad (4)$$

Примем декартову систему координат с центром в точке *A*.

Для управления перемещением берда имеем 4 точки с известными координатами: *A (0; 0), B (–Lk; Hk), C (–L2; –H2); D (–L1; –(H2+H1)).*

Тогда перемещение берда между положениями будет определяться уравнением прямой для движения между положениями 1–2, 2–3, 3–1 и уравнением окружности при движении между положениями 3–4, 4–3.

Уравнение окружности, определяющее перемещение берда:

$$x = -\sqrt{{L_{AB}}^2 - y^2}. \qquad (5)$$

При этом y принадлежит диапазону $[-H2; Hk]$. Вертикальная координата y принята в качестве аргумента, так как это позволяет обеспечить однозначность функции

управления. График перемещения берда из положения 3 в положение 4 представлен на рис. 2 (входные параметры для расчета: Lk = 40 мм, Hk = 70 мм, α = 20°).

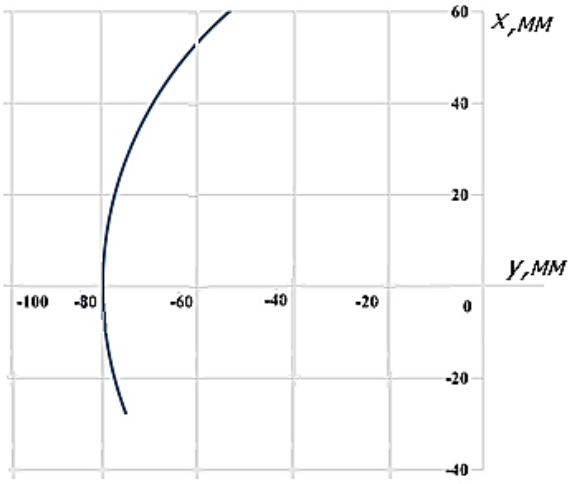

Рис. 2

Уравнение для расчета перемещений берда по прямой линии (1–2, 2–3, 3–1) имеет вид:

$$x = \frac{y}{tg\alpha}. \qquad (6)$$

С помощью предложенных зависимостей осуществляется программирование исполнительных механизмов горизонтального и вертикального перемещения берда.

Кусочно-непрерывная функция, которая определяет координаты перемещения берда для двух прибоев:

$$f(y) = \begin{cases} \frac{y}{tg\,\alpha}, -H2 - H1 < y < 0 \\ \frac{y}{tg\,\alpha}, 0 > y > -H2 \\ -\sqrt{L_{AB}{}^2 - y^2}, \ -H2 < y < Hk \\ -\sqrt{L_{AB}{}^2 - y^2}, \ Hk > y > -H2 \\ \frac{y}{tg\,\alpha}, -L2 < y < 0 \\ \frac{y}{tg\,\alpha}, 0 > y > -L1 \end{cases} \qquad (7)$$

Полученные уравнения являются основой для программирования движения привода и минимизации трения нитей.

ВЫВОДЫ

1. В работе впервые рассмотрено движение прибойного механизма в двух плоскостях для 3D ткачества с перевязкой одной системой нитей.

2. Разработана математическая модель, позволяющая провести анализ движения прибойного механизма.

3. Расчетные эксперименты с использованием математической модели позволили установить оптимальную траекторию перемещения прибойного механизма при формировании 3D ортогональной ткани с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования для обеспечения наименьших истирающих воздействий на нити вертикального утка.

4. Полученные зависимости могут быть использованы для программирования движения приводов при создании ткацкого оборудования нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Xin Wang, Lan Yao, Fujun Xu etc.* Design and Characterization of Conformal Microstrip Antennas Integrated into 3D Orthoonal Woven Fabrics // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2012. Vol. 7, Issue 2.

2. *Bilisik K., Karaduman N.S., Bilisik N.E.* 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. Non-woven Fabrics. Intec. 2016. P. 81...141.

3. WO Patent WO2015182923A1. Threedimensional orthogonal fabric for thermoelectricity // Sang-gu Park – 03.12.2015.

4. *Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W.* Ballistic impact of 3D orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation // International Journal of Engineering and Applied Sciences. 2009. Vol. 1. P. 1…18.

5. *Shi W., Hu H., Sun B., Gu B.* Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // Journal of the Textile Institute. 2011. Vol. 110.P. 875…889.

6. *Yang C., Tran P., Ngo T., Mendis P., Humphries W.* Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 553, P. 757...762.

7. *Lee B., Kim C.-G.* Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts // Advanced composite materials. 2012. Vol. 21. P. 177…192.

8. *Bandaru Aswani Kumar, Vikrant V. Chavan, Suhail Ahmad etc.* Ballistic impact response of Kevlar® rein-forced thermoplastic composite armors. International Journal of Impact Engineering 89 (2016): 1-13.

9. *Tran P., Ngo T., Yang E.C., Mendis P., Humphries W.* Effects of architecture on ballistic resistance of tex-tile fabrics: Numerical study // International Journal of Damage Mechanics. 2014. Vol. 23. P. 359…376.

10. *Kudryavtsev O.A., Sapozhnikov S.B.* Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact // PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. Vol. 3. P. 108…119.

11. *Tan V.B.C., Zeng X.S., Shim V.P.W.* Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2008. Vol. 35. P. 1303…1313. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010.

12. *Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А. и др.* Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 9. С. 75...83.

13. *Рудовский П.Н., Гречухин А.П., Палочкин С.В.* Рациональное армирование деталей из композиционных материалов тканями с переменной плотностью по утку // Вестник Костромского государственного технологического университета. 2015. № 2(35). С. 21…23.

14. *Панин М.И., Капустин В.М., Цимбалюк А.Е., Хакимов Р.В.* Об использовании комплексных нитей для армирования волокнистых композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6 (396). С. 103…106.

15. *Николаев С.Д., Панин М.И., Кащеева М.М., Николаева Н.А.* Исследование влияния натяжения нити при перематывании на удельную плотность бобин сомкнутой намотки // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2009. № 4 (318). С. 55…58.

16. *Николаев С.Д., Панин М.И., Панин И.Н.* Исследование прочностных характеристик мотальных паковок специального назначения с помощью разверток // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2010. № 8. С. 40…44.

17. *Панин М.И., Гареев А.Р., Карпов А.П. и др.* Анализ текстильных структур армирующих компонентов композиционных материалов и выбор областей их применения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2023. № 2 (145). С. 15…28.

18. US Patent US3834424. Three-dimensional fabric, and method and loom construction for the production thereof

19. Patent US4526026. Method and apparatus of producing continuous three-dimensional fabrics.

20. US Patent № US5085252. Method of forming variable cross-sectional shaped three-dimensional fab-rics.

21. Patent WO2013179037. Method and apparatus for weaving a three-dimensional fabric.

22. Патент РФ 2643659, 02.02.18. Способ формирования трехмерной ортогональной ткани.

23. *Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Хабибуллоев А. и др.* Разработка новых пространственно-армированных материалов на базе технологии многоуточного 3D-ортогонального ткачества // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 2 (404). С. 243…247.

24. *Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Рудовский П.Н., Палочкин С.В.* Определение рациональных параметров системы заправки нитей при формировании трехмерного ортогонального тканого волокнистого материала // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 5 (377). С. 111…115.

25. *Ушаков С.Н., Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Палочкин С.В.* Влияние величины смещения слоя горизонтального утка на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 96…100.

26. *Grechukhin A.P., Seliverstov V.Y., Rudovskiy P.N.* The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers. The Journal of the Textile Institute. 2017. Т. 108. № 12. С. 2067…2072.

REFERENCES

1. *Xin Wang, Lan Yao, Fujun Xu, Dongchun Zhou1, Yiping Qiu.* Design and Characterization of Conformal Microstrip Antennas Integrated into 3D Orthoonal Woven Fabrics // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. –Vol. 7, Issue 2, 2012.

2. *Bilisik K., Karaduman N.S., Bilisik N.E.* 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. Non-woven Fabrics. Intec. – 2016. P. 81...141.

3. WO Patent No. WO2015182923A1. Three-dimensional orthogonal fabric for thermoelectricity// *Sang-gu Park*– 03.12.2015)

4. *Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W.* Ballistic impact of 3D orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation // International Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2009. Vol. 1. P. 1…18.

5. *Shi W., Hu H., Sun B., Gu B.* Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // Journal of the Textile Institute. – 2011. Vol. 110. P. 875…889.

6. *Yang C., Tran P., Ngo T.,* Mendis P., Humphries W. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subject to ballistic impact // Applied Mechanics and Materials. – 2014 Vol. 553, P. 757...762.

7. *Lee B., Kim C.-G.* Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subject to balllistic impacts // Advanced composite materials. – Vol. 21, 2012. P.177…192.

8. *Bandaru Aswani Kumar, Vikrant V. Chavan, Suhail Ahmad etc.* Ballistic impact response of Kevlar® rein-forced thermoplastic armor composites. International Journal of Impact Engineering 89 (2016): 1-13.

9. *Tran P., Ngo T., Yang E.C., Mendis P., Humphries W.* Effects of architecture on ballistic resistance of textile fabrics: Numerical study // International Journal of Damage Mechanics. 2014. Vol. 23. P. 359…376.

10. *Kudryavtsev O.A., Sapozhnikov S.B.* Yarn-level modeling of woven and unidirectional thermo-plastic composite materials under ballistic impact // PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. 3. P. 108…119.

11. *Tan V.B.C., Zeng X.S., Shim V.P.W.* Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2008. Vol. 35. P. 1303…1313. - DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010.

12. *Donetskyi K.I., Raskutin A.E., Khilov P.A., Lukyanenko Yu.V., Belinis P.G., Korotygin A.A.* Volumetric textile preforms used in the manufacture of polymer composite materials (review) // Proceedings of VIAM. - 2015, No. 9. P. 75 ... 83.

13. *Rudovsky P.N., Grechukhin A.P., Palochkin S.V.* Rational reinforcement of parts made of composite materials with fabrics with variable weft density. Bulletin of the Kostroma State Technological University. 2015. No. 2 (35). P. 21…23.

14. *Panin M.I., Kapustin V.M., Tsymbalyuk A.E., Khakimov R.V.* The use of complex filaments for reinforcement of fibrous composite materials used in the oil and gas industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 6 (396). P. 103…106.

15. *Nikolaev S.D., Panin M.I., Kashcheyeva M.M., Nikolaeva N.A.* Study of the influence of thread tension during rewinding on the specific density of close-wound bobbins // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2009. No. 4 (318). P. 55…58.

16. *Nikolaev S.D., Panin M.I., Panin I.N.* Study of strength characteristics of special-purpose winding packages using reamers // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti 2010. No. 8. P. 40…44.

17. *Panin M.I., Gareev A.R., Karpov A.P. etc.* Analysis of textile structures of reinforcing components of composite materials and selection of areas of their application. Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. 2023. No. 2 (145). P. 15…28.

18. US Patent US3834424. Three-dimensional fabric, and method and loom construction for the production thereof.

19. Patent US4526026. Method and apparatus of producing continuous three-dimensional fabrics.

20. US Patent US5085252. Method of forming variable cross-sectional shaped three-dimensional fabrics.

21. Patent WO2013179037. Method and apparatus for weaving a three-dimensional fabric.

22. Patent of the Russian Federation 2643659, 02.02.18. Method of forming a three-dimensional orthogonal fabric.

23. *Grechukhin A.P., Rudovsky P.N., Khabibulloev A. etc.* Development of new spatially reinforced materials based on 3D orthogonal fabric technology // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti 2023. No. 2 (404). P. 243…247.

24. *Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Rudovsky P.N., Palochkin S.V.* Determination of rational parameters of the system of filling yarns in the formation of three-dimensional orthogonal woven fibrous material // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. No. 5 (377). P. 111…115.

25. *Ushakov S.N., Grechukhin A.P., Rudovsky P.N., Palochkin S.V.* Influence of the value of displacement of the layer of the horizontal duck on the density of the orientation of vertical layers of threads during formation of 3-D orthhogonal tissues // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. No. 6 (378). P. 96…100.

26. *Grechukhin A.P., Seliverstov V.Y., Rudovskiy P.N.* The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers. The Journal of the Textile Institute. 2017. T. 108. No. 12. P. 2067…2072.

Рекомендована кафедрами ТММ, ДМ и ПТМ Костромского государственного университета. Поступила 09.09.25.