

УДК 678.03

СУПРУН Н. П.¹, РЯБЧИКОВ М. Л.², ІВАНОВ І. О.¹

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна,

²Українська інженерно-педагогічна академія, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРТЯ В ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ

Мета. Створити модель визначення коефіцієнту тертя текстильних матеріалів для виявлення основних факторів, що впливають на процес тертя, з урахуванням структурних та механічних властивостей матеріалів.

Методика. Моделювання процесу тертя в текстильних матеріалах як комбінації адгезійних і пружних явищ.

Результати. Шорсткість твердих тіл та основні параметри шорсткості, такі, як висота мікронерівностей, їх крок, загострення та ін. описані в багатьох стандартах і наукових працях. Однак моделювання процесу тертя в таких системах дуже ускладнюється у зв'язку з нерівномірністю розподілу мікрощорсткостей. Аналіз літературних даних засвідчив, що шорсткість поверхні текстильних матеріалів - важливий та ефективний фактор прогнозування тактильних властивостей виробів різного призначення. Оцінювання шорсткості поверхні, як правило, здійснюється з використанням суб'єктивних та об'єктивних методів, причому останні можуть бути контактними та безконтактними. В роботі розроблена модель визначення коефіцієнту тертя текстильних матеріалів для виявлення основних факторів, що впливають на процес тертя з врахуванням структурних і механічних властивостей матеріалів. Сила тертя представлена, як комбінація двох основних факторів. Перший – пружний опір деформуванню, другий – адгезійний опір при стисканні структурних елементів матеріалу. Встановлено основні параметри, що впливають на коефіцієнт тертя текстильних полотен – модулі пружності структурних елементів, їх геометричні параметри – поверхнева густина текстильного матеріалу, лінійна густина структурних елементів.

Наукова новизна. Одержані результати дозволяють якісно передбачати зусилля тертя текстильного матеріалу з відомими параметрами його структурних елементів, а також нормувати ці параметри для створення матеріалів з заданими показниками тертя.

Практична значимість. Отримані результати надають можливість підбору ниток, що формують текстильний матеріал, за значеннями модуля пружності, товщини, щільності розташування для забезпечення мінімальної сили тертя.

Ключові слова: текстильні матеріали, тертя, адгезія, пружний опір, структурні параметри.

Вступ. Вибір текстильних матеріалів для конкретних виробів зумовлюється необхідним комплексом властивостей. У ряді випадків вирішальним фактором для вибору матеріалу є його гладкість, яка чисельно може визначатися коефіцієнтом тертя, а фізично - характеризує ступінь шорсткості поверхні. У різних виробках, у тому числі, медичного призначення, можуть висуватися різні вимоги до значень коефіцієнту тертя. Наприклад, матеріали простирадл для переміщення нерухомих лежачих хворих мають бути з низьким коефіцієнтом тертя і, відповідно, з підвищеним коефіцієнтом ковзання [1-3]. Інші вироби (текстильні фіксуєчі реміні, перев'язувальні медичні матеріали) вимагають збільшення коефіцієнту тертя. У загальному випадку можливі вимоги фіксованого коефіцієнту для виконання конкретних задач. Незважаючи на важливість оцінки показника тертя для текстильних матеріалів і виробів, фактори, що впливають на цей показник, для текстильних матеріалів досліджені недостатньо. Складність визначення коефіцієнту тертя полягає в багатофакторності його виникнення і тісним зв'язком із макро- та мікроструктурою матеріалу.

У ряді наукових робіт зроблено спробу визначити фактори, які впливають на коефіцієнт тертя та обґрунтувати методи його визначення. Перші прилади для визначення сил тертя текстильних матеріалів з'явилися досить давно [4]. На жаль, дані, отримані за їх допомогою, мають досить високий ступінь суб'єктивізму, бо ґрунтуються на характеристиці тактильних відчуттів людини при дотику до матеріалу. Визначення реальних характеристик проводилося із застосуванням методу парних порівнянь [5]. Деякі модифікації цього методу описані в роботі [6] - зокрема, зроблено спроби знизити вплив суб'єктивності оцінки шляхом виключення візуального контролю матеріалу оцінювачем.

Однак до останніх часів запропоновані методи оцінки шорсткості або гладкості матеріалів залишалися без достатніх прикладних впроваджень. Поява в останні часи технологічних можливостей створення текстильних матеріалів із заданими структурними і механічними властивостями, підвищення гуманітарної складової при виробництві текстильних матеріалів і виробів з заданим рівнем тактильного комфорту, створили передумови для поглиблених досліджень в цій галузі. Процес визначення коефіцієнту тертя текстильних матеріалів, пов'язаний з нерівністю поверхні, досліджувався в [7, 8]. Перспективними для визначення шорсткості текстилю можна також вважати оптичні, у тому числі фотометричні, методи [9,10], в яких визначається яскравість відбивання світла. Однак у більшості випадків параметри гладкості, шорсткості і тертя визначаються на основі суб'єктивних, зокрема, тактильних методів [11-13].

Постановка завдання. Шорсткість твердих тіл описана в багатьох стандартах і наукових працях. Також визначені основні параметри шорсткості, такі, як висота мікронерівностей, їх крок, загострення та ін. Сухе тертя по цих тілах пов'язане з подвійним впливом двох процесів – адгезійного зчеплення по поверхні контакту і пружного опору деформування мікронерівностей. Моделювання цього процесу дуже ускладнюється у зв'язку з нерівномірністю мікрошорсткостей. На відміну від наявності досить розвиненої бази стандартів і методик визначення шорсткості металевих і інших твердих поверхонь, для текстильних матеріалів слід відзначити практичну відсутність на сьогоднішній день загального підходу як до фізики процесу тертя, так і до стандартних методик визначення шорсткості поверхні. У зв'язку з цим у деяких роботах пропонуються методи, аналогічні визначенню показників шорсткості для твердих тіл [14]. На наш погляд даний підхід є корисним, однак його використання вимагає обов'язкове врахування особливостей структури текстильних матеріалів. Крім того, безсумнівно, треба враховувати різницю в пружних характеристиках. Мета даної роботи – створити модель визначення коефіцієнту тертя текстильних матеріалів для виявлення основних факторів, що впливають на процес тертя з врахуванням структурних і механічних властивостей матеріалів.

Результати досліджень. Сухе тертя (без змащування) твердих матеріалів, як правило, пов'язують з їх шорсткістю. В стандартах з визначення шорсткості твердих суцільних матеріалів [14] наведений ряд параметрів, що визначає нерівномірну форму поверхні твердого тіла, наприклад, у вигляді, наведеному на (Рис.1).

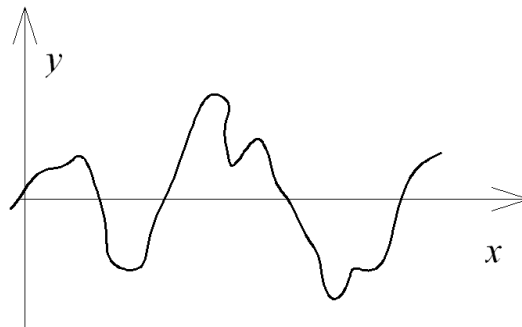


Рис.1. Шорсткість твердих матеріалів (x- довжина матеріалу, y – висота мікрошорсткостей)

У випадку зсувної дії при контакті з іншим матеріалом виникає сила тертя, що чинить опір цій дії. При цьому цей опір можна уявити у двох аспектах. Перший передбачає стискування вершин виступів шорсткості (Рис.2)

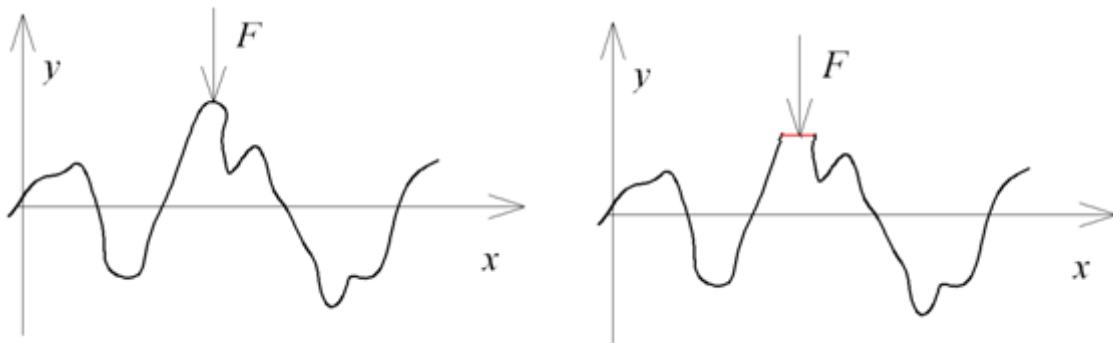


Рис.2. Стискування вершин шорсткості (x- довжина матеріалу, y – висота мікрошорсткостей)

При цьому площа контакту з тілом збільшується, виникають адгезійні міжмолекулярні сили, які утримують тіло, що переміщується.

Другий аспект передбачає опір шорсткості пружному деформуванню (Рис.3).

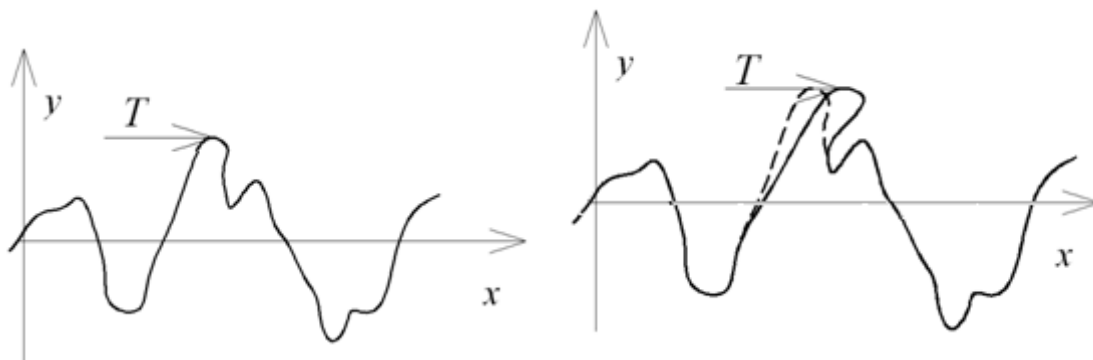


Рис.3. Пружне деформування шорсткості (x- довжина матеріалу, y – висота мікрошорсткостей)

Загальний процес є складним і взаємопов'язаним. Для твердих тіл з нерегулярними шорсткостями цей процес моделюється дуже складно. На відміну від твердих тіл, текстильні матеріали мають регулярну структуру (Рис.4), що дозволяє проводити моделювання процесу тертя.

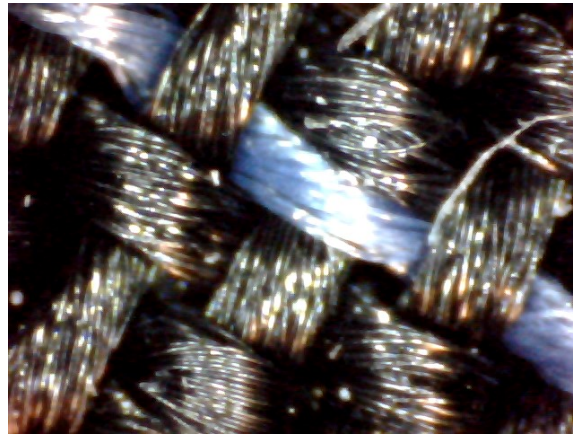


Рис.4. USB-фото поверхні текстильного матеріалу з регулярною структурою

Представимо такий матеріал, як ряд комірок, що мають вигляд періодично вигнутих структур. Властивості кожної комірки визначаються діаметром нитки d , щільністю ниток в матеріалі, що будемо визначати відстанню між нитками, у нашому означенні – радіус кривизни нитки у комірці R (Рис.5). Також нитки в комірці мають параметри жорсткості, що у загальному вигляді характеризуються модулем пружності E . У даному випадку поки будемо вважати модуль пружності ниток основи і утку однаковим. У подальшому модель може бути розширена на випадок різної їх жорсткості.

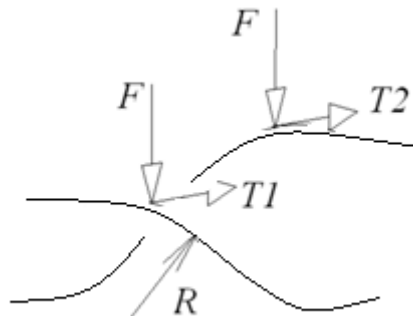


Рис.5. Параметри комірки текстильного матеріалу

У разі контакту твердої поверхні з ниткою тканини виникають контактні напруження, які призводять до деформування нитки (аналог – стискання шорсткості твердого матеріалу, Рис.2). У загальному вигляді площа контакту являє собою еліпс з напівосями [15]:

$$a = \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{3F}{E \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right)}} \quad (1)$$

$$b = \beta \cdot \sqrt[3]{\frac{3F}{E \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right)}} \quad (2)$$

де – $R1, R2, R3, R4$ - радіуси викривлення контактних поверхонь. Будемо вважати верхню контактну поверхню у вигляді площини з безкінцевими радіусами;

- E - модуль пружності;
- коефіцієнти α , β залежать від функції співвідношення радіусів.

З урахуванням безкінцевості радіусів верхнього контактного тіла функція співвідношення радіусів буде мати наступний вигляд:

$$\cos \psi = \frac{\left| \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right|}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}} = \frac{\left| \frac{2}{d} - \frac{1}{R} \right|}{\frac{2}{d} + \frac{1}{R}} = \frac{|1 - \zeta|}{1 + \zeta} \quad (3)$$

$$\text{де } \zeta = \frac{2R}{d}.$$

Для даної величини коефіцієнти α , β визначаються залежністю, наведеною на (Рис.6):

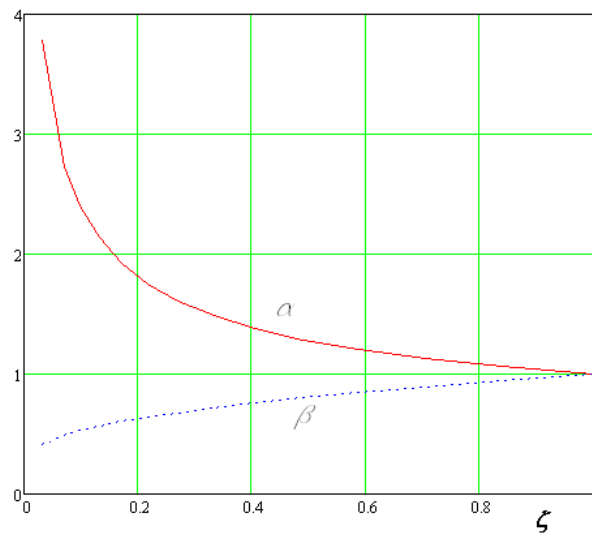


Рис.6. Коефіцієнти α , β в залежності від співвідношення розмірів комірок

Пошук апроксимаційних залежностей дає найбільш наближені функції у вигляді:

$$\alpha = \frac{1}{\zeta^{0,37}}, \quad \beta = \zeta^{0,29}. \quad (4)$$

Площа еліпса стискування визначається залежністю:

$$S = \pi \cdot a \cdot b = \frac{1}{\zeta^{0,08} (1 + \zeta)^{0,66}} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3F \cdot d}{2E} \right)^2} = \varphi \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3F \cdot d}{2E} \right)^2} \quad (5)$$

На поверхні контакту виникають дотичні напруження, викликані адгезійними властивостями матеріалу, що перешкоджають руху і викликають силу тертя. Сили, що підсумовують ці напруження, пропорційні площі контакту.

При ковзанні тіла по тканині спостерігається згинання ниток тканини. При цьому для різних напрямів схема згинання може бути представлена у двох видах (Рис.7). Дані схеми – аналоги пружного деформування шорсткості твердого матеріалу (Рис.3). У залежності від

розташування комірок відносно напрямку переміщення тіла, деформація комірок відбувається в площині колового сектору або в перпендикулярному до колового сектору напрямі.

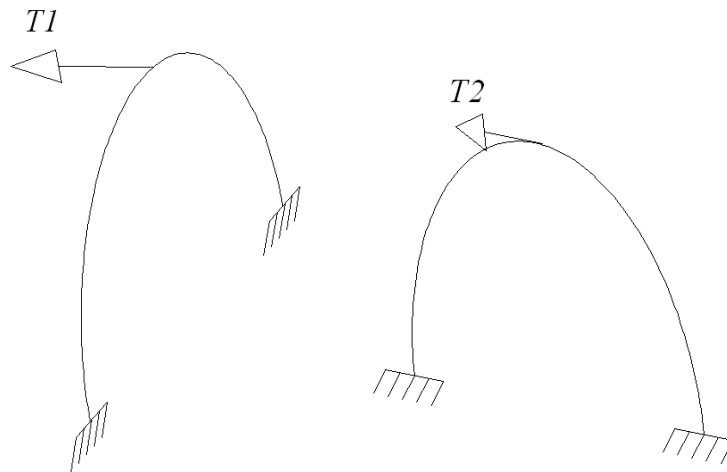


Рис.7. Деформація ниток основи і утку в точках переплетення

Величини прогинів можуть бути визначені при розв'язанні статично невизначеної задачі згину колового сектору. Розв'язання цих задач дає вирази:

$$w = \frac{8 \cdot T \cdot R^3}{\pi \cdot E \cdot d^4} \left(\pi^2 \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2}} + 4 - 2\pi \right), \quad v = \frac{4 \cdot T \cdot R^3}{\pi \cdot E \cdot d^4} (4 - \pi). \quad (6)$$

У загальному випадку, таким чином, сила тертя визначається з одного боку, пружним опором ниток тканини при їх деформуванні, з іншого – адгезійним опором стиснутих поверхонь.

Перше зусилля визначається виразом:

$$T1 = z1 \cdot \frac{Ed^4}{R^3} \quad (7)$$

Друге зусилля визначається виразом:

$$T2 = z2 \cdot \sqrt[3]{\frac{d^2}{E^2} \cdot \frac{R^{0,74}}{d^{0,08} (2R + d)^{0,66}}} \quad (8)$$

де $z1, z2$ – коефіцієнти.

Тоді сумарна сила тертя визначається сумою:

$$T = T1 + T2 \quad (9)$$

Відповідно, означивши f – коефіцієнт тертя, можна знайти:

$$f = f1 + f2 \quad (10)$$

Таким чином, сила тертя визначається сумісною дією пружного опору текстильних ниток і адгезійним опором при стисканні ниток.

Висновки: Визначено фактори, що впливають на процес тертя у текстильних матеріалах. До них відносяться пружні опори деформаціям текстильних ниток сумісно з опором при стисканні. Залежність включає показники жорсткості текстильних ниток, параметри

структури текстильного матеріалу, які виражаються поверхневою густиною матеріалу та діаметром ниток, що визначається їх лінійною густиною. Одержані залежності можуть бути використані для прогнозування властивостей гладкості та показників тертя текстильних матеріалів з метою забезпечення функціональних властивостей текстильних виробів.

Література

1. Bartnik L.M., Rice M.S. Comparison of caregiver forces required for sliding a patient up in bed using an array of slide sheets. *Workplace Health Saf.* 2013. Vol. 61. p.393-400.
2. Lloyd J.D., Baptiste A. Friction-reducing devices for lateral patient transfers. A biomechanical evaluation. *AAOHN Journal*. 2006. VOL. 54, No. 3. p. 113-119.
3. Coman R.L., Caponecchia C., McIntosh A.S. Manual Handling in aged care: impact of environment-related interventions on mobility. *Safety and Health at Work*. 2018. №9. p.372-380.
4. Dreby E.C. A friction meter for determining the coefficient of kinetic friction of fabrics. *Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1943. V. 31. October. p.237-246.
5. Stockbridge H.C. The subjective assessment of the roughness of fabrics. *J. Text. Inst.* 1957. N 48, p 26-34.
6. Bertaux E., Lewandowski M., Derler S. Relationship between friction and tactile properties for woven and knitted fabrics. *Textile Res. J.* 2007. V. 77 (6). p. 387-396.
7. Parmar M.S., Sisodia N., Maheshwar S., Vasundhara V. Development of smoothness tester for finished fabrics. *Proceedings of 57th Joint Technological Conference*. February 2017.
8. Mooneghi S. A., Saharkhiz S., Varkiani S. Surface roughness evaluation of textile fabrics: a literature review. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2014. V.9. N 2. p. 1-18.
9. Kang T. J., Cho D. H., Kim S. M. New objective evaluation of fabric smoothness appearance. *Textile Res. J.* 2001, V. 71 (5), p.446-453.
10. Xin B. X., Hu J. L., Baci G. Visualization of textile surface roughness based on silhouette image analysis. *Text. Res. J.* 2010. V. 80(2). p. 166-176.
11. Tadesse M.G., Nagy L., Nierstras V., Loghin C., Chen Y., Wang L. Low-stress mechanical property study of various functional fabrics for tactile property evaluation. *Materials (Basel)*. 2018. 11(12). p. 2466 – 2472.
12. Tadesse M.G., Loghin E., Pislaru M., Wang L., Chen Ya. Prediction of functional fabric

References

1. Bartnik L.M., Rice M.S. Comparison of caregiver forces required for sliding a patient up in bed using an array of slide sheets. *Workplace Health Saf.* 2013. Vol. 61. p.393-400. [in English].
2. Lloyd J.D., Baptiste A. Friction-reducing devices for lateral patient transfers. A biomechanical evaluation. *AAOHN Journal*. 2006. VOL. 54, No. 3. p. 113-119. [in English].
3. Coman R.L., Caponecchia C., McIntosh A.S. Manual Handling in aged care: impact of environment-related interventions on mobility. *Safety and Health at Work*. 2018. №9. p.372-380. [in English].
4. Dreby E.C. A friction meter for determining the coefficient of kinetic friction of fabrics. *Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1943. V. 31. October. p.237-246. [in English].
5. Stockbridge H.C. The subjective assessment of the roughness of fabrics. *J. Text. Inst.* 1957. N 48, p 26-34. [in English].
6. Bertaux E., Lewandowski M., Derler S. Relationship between friction and tactile properties for woven and knitted fabrics. *Textile Res. J.* 2007. V. 77 (6). p. 387-396. [in English].
7. Parmar M.S., Sisodia N., Maheshwar S., Vasundhara V. Development of smoothness tester for finished fabrics. *Proceedings of 57th Joint Technological Conference*. February 2017. [in English].
8. Mooneghi S. A., Saharkhiz S., Varkiani S. Surface roughness evaluation of textile fabrics: a literature review. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2014. V.9. N 2. p. 1-18. [in English].
9. Kang T. J., Cho D. H., Kim S. M. New objective evaluation of fabric smoothness appearance. *Textile Res. J.* 2001, V. 71 (5), p.446-453. [in English].
10. Xin B. X., Hu J. L., Baci G. Visualization of textile surface roughness based on silhouette image analysis. *Text. Res. J.* 2010. V. 80(2). p. 166-176. [in English].
11. Tadesse M.G., Nagy L., Nierstras V., Loghin C., Chen Y., Wang L. Low-stress mechanical property study of various functional fabrics for tactile property evaluation. *Materials (Basel)*. 2018. 11(12). p. 2466 – 2472. [in English].
12. Tadesse M.G., Loghin E., Pislaru M., Wang L., Chen Ya. Prediction of functional fabric comfort using fuzzy logic and artificial neural-network from finishing

comfort using fuzzy logic and artificial neural network from finishing parameters. *Textile Research Journal*. 2019. Vol. 89. Issue 19-20. p. 4083-4094.

13. Liao X., Hu J., Li Y., Li Q., Wu X. A review on fabric smoothness-roughness sensation studies. *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics*. 2011. V.4:2. p. 105-114

14. ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структур. Видання офіційне. Київ, Мінекономрозвитку України. 2013. 16 с.

15. Popov Valentin L. Contact mechanics and friction. Physical principles and applications. 2010. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 362 p.

parameters. *Textile Research Journal*. 2019. Vol. 89. Issue 19-20. p. 4083-4094. [in English].

13. Liao X., Hu J., Li Y., Li Q., Wu X. A review on fabric smoothness-roughness sensation studies. *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics*. 2011. V.4:2. p. 105-114. [in English].

14. DSTU ISO 4287:2012. Tekhnichni vymohy do heometriyi vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profil'nyy metod. Terminy, vyznachennya ponyat' i parametry struktur. [Technical requirements for product geometry (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions and parameters of structures]. Vydannya ofitsiyne. Kyiv, Minekonomrozvytku Ukrayiny, 2013. 16 p. [in Ukrainian].

15. Popov Valentin L. Contact mechanics and friction. Physical principles and applications. 2010. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 362 p. [in English].

RYABCHIKOV N.

Department of Technology and Design,
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy,
Ukraine

IVANOV I.

postgraduate
Kyiv National University of Technologies and Design

SUPRUN NATALIYA

Dr. Sc., professor

suprun.knutd@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3937-8399>

Researcher ID: 6701785670

Kyiv National University of Technologies & Design

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ В ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

СУПРУН Н. П.¹, РЯБЧИКОВ Н. Л.², ИВАНОВ И. А.¹

¹Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

²Украинская инженерно-педагогическая академия, Украина

Цель. Создать модель определения коэффициента трения текстильных материалов для выявления основных факторов, влияющих на процесс трения, с учетом структурных и механических свойств.

Методика. Моделирование процесса трения в текстильных материалах как комбинации адгезионных и упругих явлений.

Результаты. Шероховатость твердых тел и основные параметры шероховатости, такие, как высота микронеровностей, их шаг, острота и др. описаны во многих стандартах и научных трудах. Однако моделирование процесса трения в таких системах очень усложняется в связи с неравномерностью распределения микрошероховатостей. Анализ литературных данных показал, что шероховатость поверхности текстильных материалов - важный и эффективный фактор прогнозирования тактильных свойств изделий различного назначения. Оценка шероховатости поверхности, как правило, осуществляется с использованием субъективных и объективных методов, причем последние могут быть контактными и бесконтактными. В работе разработана модель определения коэффициента трения текстильных материалов для выявления основных факторов, влияющих на процесс трения с учетом структурных и механических свойств. Сила трения представлена как комбинация двух основных факторов. Первый - упругое сопротивление деформированию, второй - адгезионное сопротивление при сжатии структурных элементов материала. Установлены основные параметры, влияющие на коэффициент трения текстильных

полотен - модули упругости структурных элементов, их геометрические параметры - поверхностная плотность текстильного материала, линейная плотность структурных элементов.

Научная новизна. Полученные результаты позволяют качественно предусматривать усилие трения текстильного материала с известными параметрами его структурных элементов, а также нормировать эти параметры для создания материалов с заданными показателями трения.

Практическая значимость. Полученные результаты дают возможность подбора нитей, формирующих текстильный материал, по значениям модуля упругости, толщины, плотности расположения для обеспечения минимальной силы трения.

Ключевые слова: текстильные материалы, трение, адгезия, упругое сопротивление, структурные параметры.

SIMULATION OF THE FRICTION PROCESS IN TEXTILE MATERIALS

SUPRUN N. P.¹, RYABCHIKOV N. L.², IVANOV I. O.¹

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Ukraine

Goal. Create a model for determining the coefficient of friction of textile materials to identify the main factors influencing the process of friction, taking into account the structural and mechanical properties of materials.

Method. Modeling of friction process in textile materials as a combination of adhesive and elastic phenomena.

Results. Roughness of solid bodies and the main parameters of roughness, such as the height of micro-irregularities, their pitch, sharpening, etc. described in many standards and scientific papers. However, the modeling of the friction process in such systems is very complicated due to the irregularity of distribution of microroughness. The analysis of literature data showed that the surface roughness of textile materials is an important and effective factor in predicting the tactile properties of products for various purposes. Estimation of surface roughness is usually carried out using subjective and objective methods, and the latter can be contact and non-contact. The paper develops a model for determining the coefficient of friction of textile materials to identify the main factors influencing the friction process, taking into account the structural and mechanical properties of materials. Friction force is presented as a combination of two main factors. The first is the elastic resistance to deformation, the second is the adhesive resistance to compression of the structural elements of the material. The main parameters influencing the coefficient of friction of textile fabrics - modulus of elasticity of structural elements, their geometrical parameters - surface density of textile material, linear density of structural elements are established.

Scientific novelty. The obtained results allow to qualitatively predict the friction forces of a textile material with known parameters of its structural elements, as well as to normalize these parameters to create materials with specified friction indices.

Practical significance. The obtained results make it possible to select the threads that form the textile material, according to the values of the modulus of elasticity, thickness, location density to ensure the minimum friction force.

Keywords: textile materials, friction, adhesion, elastic resistance, structural parameters.