

ПУНДИК СЕРГІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5832-5527>e-mail: [sera88p@gmail.com](mailto:sera88p@gmail.com)

КАРМАЛІТА АНАТОЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4397-2988>e-mail: [akarmalita89@gmail.com](mailto:akarmalita89@gmail.com)

## ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМЕНІВ ПОВІТРЯ З РЕЛЬЄФОМ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ

У статті досліджується спосіб контролю положення плоских деталей взуття, які мають асиметрію шорсткості поверхонь, за допомогою струменів повітря. Різну топографію протилежних поверхонь мають більшість взуттєвих матеріалів. Запропонована типізація поверхонь за характером напрямків та профілів нерівностей створює певну модель топографії поверхні, що визначає тип обтікання струменями повітря поверхні та виступів нерівностей. Створена 3D модель пристрою в програмному середовищі SolidWorks та проведена симуляція процесу взаємодії струменів повітря з поверхнями деталей, що мають різні топографії в програмі SolidWorks Flow Simulation, яка дозволяє спостерігати процес обтікання струменями повітря поверхні та виступів нерівностей. Визначено зусилля лобового опору макронерівностей.

Ключові слова: типізація нерівностей, макронерівності, тиск, струмені повітря.

PUNDYK SERHII, KARMALITA ANATOLII

Khmelnitskyi National University

### PHYSICAL MODEL OF THE INTERACTION OF AIR STREAMS WITH A FLAT SURFACE RELIEF

The article examines the method of controlling the position of flat parts of shoes, which have asymmetry of surface roughness, with the help of air jets. Currently, a large number of natural and artificial materials are used in shoe production, the surfaces of which are not smooth, but have irregularities, the parameters of which are different on the front and back surfaces of these materials. All surfaces of parts, depending on the material, method and technological process of their production, have different roughness. Studying the possibility and conditions of determining the position of flat parts of shoes made of such materials according to the "front side - back side" feature using air jets is difficult, first of all, due to the great variety of irregularities, which, in turn, arises due to the variety of methods of obtaining them, different technological or operational purposes. In this connection, there is a need to typify these surfaces. Most shoe materials have a different topography of opposite surfaces. The proposed typification of surfaces by the nature of the directions and profiles of irregularities creates a certain model of the surface topography, which determines the type of air flow around the surface and protrusions of irregularities. To analyze the interaction of air jets with the surface of a flat part, it is considered as a stationary body placed in an air stream impinging on it. Air flow is characterized by a speed that can change from point to point when flowing around the body. The force acting on a flat part is formed due to the fact that it, slowing down the air flow, takes part of this energy. A 3D model of the device was created in the SolidWorks software environment and a simulation of the process of interaction of air jets with the surfaces of parts having different topographies was carried out in the SolidWorks Flow Simulation program.

Key words: typification of irregularities, macro-irregularities, pressure, air jets.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Усі поверхні деталей у залежності від матеріалу, способу та технологічного процесу їх виготовлення мають різну шорсткість. Шорсткість поверхні – це сукупність макро та мікронерівностей, виступів та впадин з відносно малими кроками на базовій довжині. Ці нерівності формують рельєф поверхні та визначають її якість. Шорсткість поверхні виникає головним чином в процесі виготовлення матеріалу для деталі, унаслідок пластичної деформації поверхневого шару заготовки при її обробці інструментом з нерівними різальними кромками, тертя, вивертання часток матеріалу з поверхні заготовки тощо.

Нами досліджується спосіб контролю положення плоских деталей взуття, які мають асиметрію шорсткості поверхонь, за допомогою струменів повітря, на який отримано патент на винахід [1]. Процес такого контролю необхідний для орієнтованої подачі деталей на технологічну обробку. І головною проблемою є вивчення процесу взаємодії струменів повітря з поверхнями деталі з метою забезпечення надійного контролю.

### Виклад основного матеріалу

Для аналізу взаємодії струменів повітря з поверхнею плоскої деталі будемо розглядати деталь як нерухоме тіло, розміщене в потоці повітря, що набігає на нього. Потік повітря характеризується швидкістю, яка може змінюватись від точки до точки при обтіканні тіла. Сила, що діє на плоску деталь, утворюється за рахунок того, що вона, пригальмовуючи повітряний потік, відбирає частину його енергії.

В статті [2] розглянуто характеристики поверхонь взуттєвих матеріалів, положення деталей з яких можна контролювати даним способом в процесі їх технологічної обробки.

Схематизуючи всі нерівності за ознаками, які є найбільш загальними, за напрямом і розташуванням їх на поверхні, можна звести все різноманіття цих напрямків і розташувань до семи типів (табл. 1).

Таблиця 1

**Типізація напрямків нерівностей**

№ типу	Тип напрямків нерівностей	Схематичне зображення	№ типу	Тип напрямків нерівностей	Схематичне зображення
1	Паралельне		5	Кругове	
2	Кутове		6	Радіальне	
3	Решітчасте		7	Концентричне	
4	Довільне				

Різноманіття всіх профілів також можна типізувати до 7, показаних в таблиці 2, де  $d$  - середня товщина нерівностей;  $c$  - середня ширина западин нерівностей;  $h$  - середня висота нерівностей;  $t$  - середній крок нерівностей;  $\alpha$  - середній кут нахилу нерівностей.

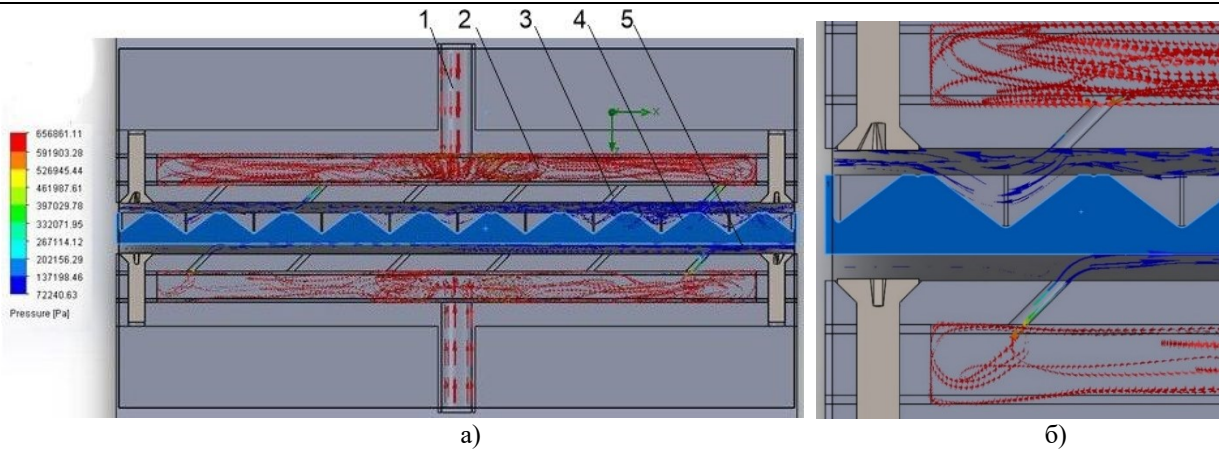
Таблиця 2

**Типізація профілів нерівностей**

№ типу	Схематичне зображення	№ типу	Схематичне зображення
1		5	
2		6	
3		7	
4			

Комбінація цих двох характеристик по таблиці 1 та таблиці 2 створює певну модель топографії поверхні, що визначає тип обтікання струменями повітря поверхні та виступів нерівностей.

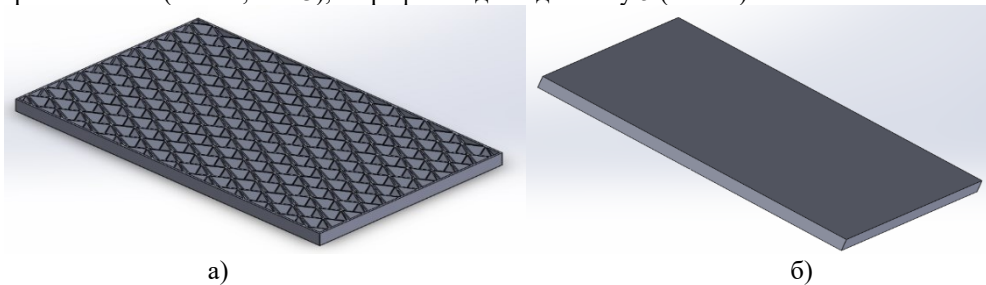
Нами було створена 3D модель нашого пристрою [1] в програмному середовищі SolidWorks та проведена симуляція процесу взаємодії струменів повітря з поверхнями деталей, що мають різні топографії в програмі SolidWorks Flow Simulation (рис.1).



**Рис.1. Процес взаємодії струменів повітря з поверхнями деталей, що мають різні топографії поверхонь в програмі SolidWorks Flow Simulation: а) загальний вид; б) наближений вид**

Пристрій орієнтованої подачі на обробку плоских деталей з різною шорсткістю поверхонь містить: патрубки 1 для приєднання до системи подачі стисненого повітря, дві пневматичні камери 2, розташовані паралельно одна одній, сопла 3, виконані під кутом в стінках кожної камери, а також деталь з поверхнею з нерівностями 4 та гладкою поверхнею 5.

Дослідження проводилось із зразком, виготовленим із матеріалу EVA, що застосовується для деталей низу взуття (рис.2). Зразок має одну поверхню з явно вираженими макронерівностями (рис.2, а), а протилежну гладку (рис.2, б). У відповідності з вище приведеною систематизацією нерівностей, тип макронерівностей на поверхні зразка решітчастий (табл.1, тип 3), а профіль відповідає типу 5 (табл.2).



**Рис.2. Зразок виготовлений із матеріалу EVA: а) поверхня з макронерівностями; б) гладка поверхня**

Процес взаємодії струменів повітря з поверхнями деталей, що мають різні топографії поверхонь відбувається наступним чином: стиснене повітря через патрубки 1 подається в камери 2 і виходить звідти через отвори 3, виконанні під кутом до поверхонь камер, діючи на поверхню з нерівностями 4 та гладку поверхню 5, виштовхують деталь вліво чи вправо, в залежності від шорсткості її поверхні (в даному випадку вліво).

При обтіканні потоком повітря поверхні з нерівностями спостерігається лобовий опір нерівностей. Очевидно векторна сума нормальних і дотичних напружень по всій поверхні нерівності дасть вектор сумарної сили, компоненти якого в напрямі відносної швидкості потоку, що обтікає тіло, характеризують лобовий опір[3]. Повний лобовий опір складається з сил тертя і тиску, тобто:

$$\vec{F}_{onip} = \vec{F}_{терт} + \vec{F}_{тиск} \quad (1)$$

де сили тертя характеризуються як  $F_{терт} = \int_S \tau_0 \sin \varphi dS$ , а опір тиску  $F_{тиск} = - \int_S p \cos \varphi dS$  (де  $S$  - площа поверхні;  $\varphi$  - кут між нормаллю до елемента поверхні і напрямом руху,  $\tau_0$  - дотичні напруження,  $p$  - тиск повітря).

Зробимо допущення, що сили тертя з обох сторін деталі однакові, вони направлені в протилежні сторони, тому нейтралізують одна одну і в подальших розрахунках їх не враховуєм.

У зв'язку з тим, що  $F_{тиск}$  є величиною пропорційною  $\left(\frac{\rho u^2}{2}\right)$ , тобто  $F_{тиск} = \int_S p ds$ , або  $F_{тиск} = C_{тиск} \frac{\rho u^2}{2} S_T$ , можна для сил опору  $F_{onip}$  записати залежність

$$F_{onip} = C_{on} \frac{\rho u^2}{2} S, \quad (2)$$

де  $C_{on} = C_{тиск}$ ;

$\rho$  - густина повітря;

$S$  - площа проекції тіла на площину, що перпендикулярна вектору швидкості  $u$ .

Аналізуючи фактори, які можуть впливати на збереження пропорційної залежності, авторами книги «Механіка жидкості» Дж. Дейли і Д. Харманом [4] було відмічено, що цей коефіцієнт суттєво залежить від геометричних особливостей тіла, критеріїв Рейнольдса, Фруда і Маха, тобто:

$$C_{on} = f(\text{геометрія тіла}, Re, Fr, M)$$

Цікавою є залежність  $C_{on}$  від числа Рейнольдса при обтіканні циліндра. Коли число  $Re$  стає більше 5 можна спостерігати відрив ламінарного прилежого шару від поверхні циліндра, який обумовлений зворотним перепадом тиску і кривизною поверхні. Якщо  $5 < Re < 50$  в зоні, що знаходиться всередині області відриву, з'являються два вихорі. При числах Рейнольдса, що знаходяться в межах  $60 \div 5000$ , з'являються хвилі, які зростають за амплітудою та згортаються у дискретні вихорі. Ці вихорі вже нестабільні і відриваються по черзі то з одного, то з іншого боку тіла. Це явище відомо як вихрова доріжка Кармана. Частота зриву вихорів може бути описана критерієм Струхалія:

$$St = \frac{nd}{u} \tag{3}$$

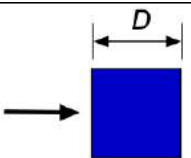
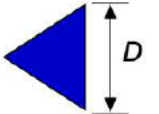
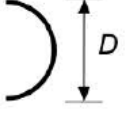
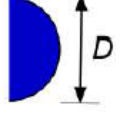
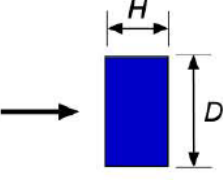
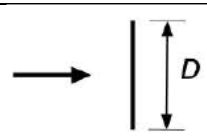
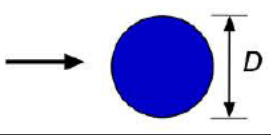
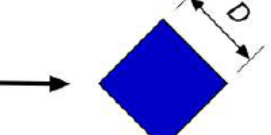
де  $n$  – частота зриву вихорів;  
 $d$  – діаметр циліндра.

При числах Рейнольдса  $Re=10^3$  частота зриву досягає величини  $St=0,21$ .

В роботі [5] наведені значення коефіцієнтів лобового опору для різних тіл (табл.3).

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів лобового опору для різних тіл

Загальний вигляд тіла	Назва	Контрольна область, $A$ ( $b$ =довжина)	Коефіцієнт опору, $C_{on}$	Число Рейнольдса, $Re$														
	Квадрат	$A=bD$	1.05	$10^5$														
	Рівносторонній трикутник	$A=bD$	0.5 → ← 2.2	$10^5$														
	Напівсфера	$A=bD$	2.3 → ← 1.1	$10^4-10^5$														
	Напівкруглий циліндр	$A=bD$	2,15 → ← 1.15	$>10^4$														
	Прямокутник	$A=bD$	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>H/D</math></th> <th><math>C_D</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.1</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>0.65</td><td>2.9</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>1.6</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>1.3</td></tr> </tbody> </table>	$H/D$	$C_D$	0.1	1.9	0.5	2.5	0.65	2.9	1.0	2.2	2.0	1.6	3.0	1.3	$>10^5$
$H/D$	$C_D$																	
0.1	1.9																	
0.5	2.5																	
0.65	2.9																	
1.0	2.2																	
2.0	1.6																	
3.0	1.3																	
	Пластина	$A=bD$	1.7	$>10^4$														
	Круглий циліндр	$A=bD$	0.47 0.12	$<200,000$ $>400,000$														
	Кутовий квадрат	$A=bD$	0.8	$10^5$														

### Висновки

1. У взуттєвому виробництві використовується велика кількість натуральних та штучних матеріалів, поверхні яких не є гладкими, а мають нерівності, параметри яких різні на лицьовій та виворітній поверхнях цих матеріалів. Вивчення можливості та умов визначення положення плоских деталей взуття з таких матеріалів за ознакою "лицьова сторона - виворітна сторона" за допомогою струменів повітря утруднено насамперед через велику різноманітність нерівностей. У зв'язку з цим виникає потреба типізації цих поверхонь.

2. Запропоновано типізацію поверхонь за характером напрямків та профілів нерівностей, яка створює певну модель топографії поверхні, що визначає тип обтікання струменями повітря поверхні та виступів нерівностей.

3. Головною проблемою способу контролю положення плоских деталей взуття, які мають асиметрію шорсткості поверхонь, за допомогою струменів повітря є вивчення процесу взаємодії струменів повітря з поверхнями деталі з метою забезпечення надійного контролю.

4. Створена 3D модель пристрою в програмному середовищі SolidWorks та проведена симуляція процесу взаємодії струменів повітря з поверхнями деталей, що мають різні топографії в програмі SolidWorks Flow Simulation, яка дозволяє спостерігати процес обтікання струменями повітря поверхні та виступів нерівностей.

4. Визначено зусилля лобового опору макронерівностей, в залежності від їх профілю та розмірів.

### Література

1. Спосіб орієнтованої подачі на обробку плоских деталей з різною шорсткістю поверхонь : пат. 154403 Україна : МПК В65Н 3/08 (2006.01) / Кармаліта А.К., Пундик С.І.;– № 2023 02942; заявл. 16.06.2023; опуб. 08.11.2023, Бюл. № 1.- 3 с.

2. Кармаліта А. К., Пундик С. І. Взаємодія струменів повітря з поверхнею плоскої деталі в процесі організації середовища для роботи промислових роботів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2024. №24.

3. Яхно О. М. Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка : підручник / О. М. Яхно, О. В. Узунов, О. Ф. Лугоський та ін. ; за ред. О. М. Яхна. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 711 с.

4. Губарев О. П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Програмовані контролери в системах керування гідро пневмоавтоматики». (Частина 2). Студентам, що навчаються за фахом «Гідравлічні і пневматичні машини» / О. П. Губарев, О. В. Левченко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2006. – 52 с.

5. Leishman, J. G. Introduction to Aerospace Flight Vehicles / J. Gordon Leishman. – Embry-Riddle Aeronautical University, 2023.

### References

1. Sposib oriientovanoi podachi na obrobku ploskykh detalei z riznoiu shorstkistiю poverkhon : pat. 154403 Ukraina : MPK V65N 3/08 (2006.01) / Karmalita A.K., Pundyk S.I.;– № 2023 02942; zaiavl. 16.06.2023; opub. 08.11.2023, Biul. № 1.- 3 s.2.

2. Karmalita A. K., Pundyk S. I. Vzaiemodiia strumeniv povitria z poverkhneiю ploskoi detali v protsesi orhanizatsii seredovysheha dlia roboty promyslovykh robotiv. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*. Lutsk, 2024. №24.

3. Yakhno O. M. Prykladna hidroaeromekhanika i mekhanotronika : pidruchnyk / O. M. Yakhno, O. V. Uzunov, O. F. Luhovskyi ta in. ; za red. O. M. Yakhna. – Vinnytsia: VNTU, 2017. – 711 s.

4. Hubarev O. P. Metodychni vказivky do laboratornykh robіt z kursu «Prohramovani kontrolery v systemakh keruvannia hidro pnevmoavtomatyky». (Chastyna 2). Studentam, shcho navchaiutsia za fakhom «Hidravlichni i pnevmatychni mashyny» / O. P. Hubarev, O. V. Levchenko. – Kyiv : NTUU «KPI», 2006. – 52 s.

5. Leishman, J. G. Introduction to Aerospace Flight Vehicles / J. Gordon Leishman. – Embry-Riddle Aeronautical University, 2023.