

**Технологічний університет Поділля**

**На правах рукопису  
УДК 621.891**

**Терлецька Олена Вікторівна**

**Дослідження характеристик фрикційного  
пружного контакту шорстких ізотропних  
поверхонь**

Спеціальність 05.02.04 - Тертя та зношування в машинах

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Хмельницький, 1996**

#6 30, 270

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Технологічному університеті Поділля (м. Хмельницький).

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00752253 (0)

**Науковий керівник** - доктор технічних наук, докторинженер наук, професор Семенюк Микола Федорович

**Науковий консультант** - Doktoringenieur habilitierter, професор Діріх Петер

**Офіційні опоненти** - доктор технічних наук, професор Кислий Олександр Олександрович  
- кандидат технічних наук, доцент Сорокатий Руслан Володимирович

**Провідна організація** - ВАТ "Красилівський машинобудівний завод",  
Міністерство машинобудування, військово-промислового комплексу та конверсії України, м. Красилів

**Захист відбудеться "3" жовтня 1996 р. о 10 годині**

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 29.01.01 в Технологічному університеті Поділля за адресою : 280016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, 3-й учбовий корпус.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Технологічного університету Поділля (вул. Кам'янецька, 110/1).

Автореферат розіслано "1" 07 1996 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

Г.С. Калда

## Загальна характеристика роботи

### *Актуальність і ступінь дослідженості тематики*

Для сучасних машин і апаратів характерно те, що вони працюють в умовах високих швидкостей та температур. Внаслідок цього підвищуються вимоги до якості та надійності конструкцій машин. Всі ці показники в значній мірі залежать від процесів, що відбуваються в зоні контакту деталей машин. До таких процесів відноситься насамперед зовнішнє тертя та зношування деталей.

Оскільки поверхні деталей мають шорсткість, то контакт є дискретним і площа контакту складає незначну частину від номінальної площі. Взаємодія поверхонь відбувається на фактичній площі контакту, ця площа визначає величину сили тертя, інтенсивності зношування, температуру в зоні тертя, термічний та електричний опори в зоні контакту.

Розрахунок герметичності ущільнень може бути виконаний лише на основі точного знання фактичної площі контакту, міжконтактного об'єму та середньої висоти зазору. Похибка в 20 % при визначенні середньої висоти зазору приводить до похибки в 80 % при розрахунку величини натікання в ущільненні. Параметри фрикційного контакту є важливими факторами при вивченні пресових з'єднань, контактної міцності, контактної корозії, адгезії поверхонь і таке інше.

Високі температури, які виникають при роботі сучасних машин, вимагають брати до уваги термічний опір в зоні контакту. Контактний опір призводить до виникнення температурного градієнта між контактуючими поверхнями, величина якого може складати десятки і сотні градусів. Дослідження показують, що величина термічного опору залежить від площі фактичного контакту і міжконтактного об'єму сполучених поверхонь.

Завдяки широкому застосуванню автоматики, велике значення набуває теорія електричних контактів. Електричний контактний опір в значній мірі визначається величиною та структурою фактичної площі контакту.

Суттєвий вплив на якість роботи ряду машин та механізмів має контактна жорсткість. Так, наприклад, в балансі пружних переміщень супортів токарних верстатів, контактні деформації складають 80-90 % від загальних переміщень, в вертикально-фрезерних верстатах - до 70 %. Контактна жорсткість впливає на точність роботи приладів, на точність установки деталей в пристроях і на верстатах, на точність обробки та складання, тобто на якість машин і механізмів.

Розрахунок характеристик фрикційного контакту базується на

методах опису шорсткості поверхні. Довгий час в основі розрахунків лежав опис шорсткості за методом опорних кривих. Цей метод має невисоку точність, оскільки не бере уваги, що властивості профілю відрізняються від властивостей поверхні, з якої знято профіль. Одна з особливостей сучасного етапу розвитку механіки тертя полягає в застосуванні методів теорії ймовірності для розрахунку контактної взаємодії шорстких поверхонь. Принципово нові можливості для розвитку розрахункових методів тертя та зносу дає застосування теорії стохастичних процесів. Дослідження характеристик фрикційного контакту проведені в даний час лише для відносно невеликих навантажень.

В зв'язку з вищесказаним, дослідження та розробка на основі теорії стохастичних процесів методів розрахунку фрикційного контакту, які мали б застосування при будь-яких навантаженнях, є актуальною і важливою задачею.

### ***Мета роботи та основні завдання наукового дослідження.***

Основною метою роботи є дослідження характеристик фрикційного пружного контакту та розробка інженерних методів їх розрахунку на основі теорії стохастичних процесів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було сформулювати умови, при яких можливе моделювання шорсткості ізотропних поверхонь, розробити математичну модель фрикційного контакту та інженерні методи розрахунку, створити експериментальну установку та методику проведення експериментальних досліджень.

### ***Теоретична та практична цінність дослідження та його наукова новизна***

1. Розроблені методи моделювання шорстких ізотропних поверхонь. Основними етапами при вирішенні цієї задачі є :

1.1. Визначення умов, при яких можлива заміна шорсткої поверхні системою окремих виступів.

1.2. Визначення умов, при яких можлива апроксимація виступів шорсткої поверхні поверхнями другого порядку.

1.3. Формулювання необхідних умов моделювання.

2. Розроблена математична модель фрикційного контакту, яка включає :

2.1. Основне рівняння контактування, що пов'язує рівень деформації з номінальним напруженням в зоні контакту, параметрами шорсткості поверхонь та фізико-механічними характеристиками матеріалів.

2.2. Теоретичні дослідження міжконтактного об'єму, граничного рівня деформації, середньої висоти зазору, фактичної площі кон-

такту, контактних зміщень та контактної жорсткості.

3. Створені інженерні методи розрахунку вищеназваних характеристик фрикційного контакту.

4. Виконана експериментальна перевірка розроблених методів розрахунку, що включає :

4.1. Розробку експериментальної установки та методик проведення дослідів.

4.2. Співставлення результатів розрахунків за розробленими методиками з експериментальними даними, як власними, так і інших авторів, а також з результатами розрахунків за існуючими теоріями, якщо це виявляється можливим.

Розроблені методи розрахунку мають високу точність, справедливі в широкому діапазоні навантажень, містять лише стандартні характеристики шорсткості, розрахункові формули значно простіші за аналогічні існуючі.

#### ***Рівень реалізації, впровадження наукових розробок***

Методи розрахунку міжконтактного об'єму, граничного рівня деформації, середньої висоти зазору, фактичної площі контакту, контактних зміщень та контактної жорсткості доведені до інженерних методик. Результати роботи впроваджені на Красилівському машинобудівному заводі та Хмельницьких виробничих об'єднаннях "Укрелектроапарат", "Новатор".

***Апробація.*** Основні положення роботи і її окремі результати доповідались і обговорювались на студентській науково-технічній конференції Хмельницького технологічного інституту 1993 р. ; міжнародній науково-технічній конференції "Вдосконалення обладнання легкої промисловості та складної побутової техніки", м. Хмельницький, 1993 р. ; науково-практичній конференції "Наукові основи сучасних прогресивних технологій", м. Хмельницький, 1994 р. ; науково-технічних конференціях викладачів Вищої школи техніки, економіки та соціології Ціттау/Герліц (Федеративна Республіка Німеччина) в 1994-95 р.р. під час річного наукового стажування по лінії Німецької Академічної Служби Обміну (DAAD) ; III-ій науково-технічній конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва", м. Хмельницький, 1995 р. ; науково-технологічній конференції "Технологічний університет в системі реформування освітньої та наукової діяльності Подільського регіону", м. Хмельницький, 1995 р. ; науково-технічних конференціях викладачів Технологічного університету Поділля в 1994-96 р.р.; засіданнях наукових семінарів

факультету природничих наук Вищої школи техніки, економіки та соціології Циттау/Герлиць (ФРН) та кафедри основ конструювання машин ТУ Поділля.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку літератури. Робота виконана на 199 сторінках машинописного тексту, містить 34 рисунків, 50 таблиць, бібліографію із 279 найменувань.

**Декларація конкретного особистого внеску дисертанта у розробку наукових результатів, що виносяться на захист**  
Дисертація містить лише ті наукові результати, які отримані дисертантом особисто.

### **Характеристика методології, методу дослідження об'єкта**

Об'єктом дослідження є шорсткі ізотропні поверхні. При проведенні досліджень використовувались методи математичного моделювання, теорії стохастичних процесів, обчислювальної математики, теорії пружності, методи вимірювання фізико-механічних характеристик матеріалів та параметрів шорсткості поверхонь.

### **Зміст роботи**

**Вступ** містить обґрунтування актуальності теми та коротку анотацію змісту дисертації.

**В розділі 1** проаналізовані існуючі дослідження характеристик фрикційного пружного контакту, сформульовані завдання подальших досліджень.

**Розділ 2** присвячений розробці методів моделювання шорстких ізотропних поверхонь.

Вивчається процес контактування шорсткої поверхні з гладкою, оскільки задача про контактування двох шорстких поверхонь може бути замінена задачею, яка вивчається. Висоти точок шорсткої поверхні відмірюються відносно середньої площини.

Моделювання поверхонь, тобто заміна шорсткої поверхні системою окремих виступів, необхідне для того, щоб розраховуючи контактні характеристики окремих виступів і узагальнюючи отримані результати, можна було б отримати характеристику всієї поверхні.

Моделювання поверхні можливе лише при умові, що можна знехтувати процесом злиття поодиноких контактів. За числову характеристику процесу злиття прийняте відношення  $k$  кількості плям контакту до кількості виступів, що вступили в контакт. Для розрахунку величини  $k$  отримали формулу :

$$k = \left[ \frac{3}{\alpha} \left( \frac{3}{2\pi} \right)^{1/2} h \exp\left(-\frac{1}{2}h^2\right) \right] \bigg/ \int_h^{\infty} p(\epsilon_1') d\epsilon_1' \quad (1)$$

де  $\alpha$  - параметр ширини спектру шорсткої поверхні;  $h$  - рівень деформації (відстань від середньої площини шорсткої поверхні до контактуючої гладкої поверхні, поділена на середньоквадратичне відхилення точок шорсткої поверхні);  $p(\epsilon_1')$  - щільність ймовірності висот вершин.

Позначимо  $h_k$  - рівень деформації, що відповідає заданому значенню  $k$ . Залежність  $h_k(\alpha)$  зображена на рис. 1.

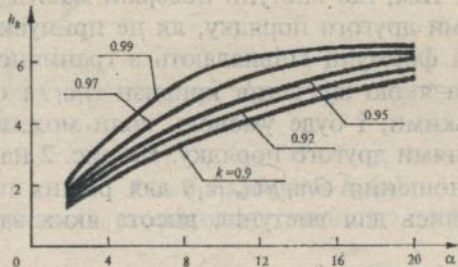


Рис. 1. Залежність  $h_k(\alpha)$ .

Прийнято, що при  $k \geq 0,9$  можна знехтувати взаємним впливом плям контакту і вважати, що виступи деформуються незалежно один від одного. Таким чином, умова, за якою можлива заміна шорсткої поверхні системою окремих виступів запишеться таким чином:

$$h \geq h_1 = h_{0,9} \quad (2)$$

Умова, за якою можлива апроксимація окремого виступу поверхнею другого порядку, може бути сформульована, якщо розглянути розрахунок кривизн виступів поверхні. З однієї сторони, повну кривизну в вершині виступу  $G(\epsilon_1')$  можна розрахувати не задаючись певною формою виступу і не використовуючи моделювання поверхні, відповідна формула отримана М.Ф. Семенюком.

З іншої сторони, повну кривизну можна розрахувати апроксимуючи виступи поверхнями другого порядку і виходячи з розподілу матеріалу в шорсткому шарі поверхні. При розривку розподілу матеріалу в шорсткому шарі не припускається певна форма виступу. Відповідна розрахункова формула має вигляд:

$$\left[ \frac{G_a(\varepsilon_1')}{m_4} \right]^{-1/2} = \frac{1}{2\alpha^{1/2}} \left( \varepsilon_1' - \frac{1}{\varepsilon_1'} \right) (1 + \operatorname{erf} \beta) + \frac{1}{(6\pi C_1)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{3\varepsilon_1'^2}{2(2\alpha - 3)} \right] + \frac{\alpha}{3\varepsilon_1' [3(\alpha - 1)]^{1/2}} \exp \left[ -\frac{\varepsilon_1'^2}{2(\alpha - 1)} \right] (1 + \operatorname{erf} \gamma) \quad (3)$$

Величини  $C_1$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  в формулі (3) є функціями параметру  $\alpha$ ;  $m_4$  - спектральний момент четвертого порядку;  $\operatorname{erf} \gamma$  - інтеграл ймовірності.

Величини  $G(\varepsilon_1')$  і  $G_a(\varepsilon_1')$  у загальному випадку не співпадають. Це пояснюється тим, що виступи поверхні мають випадкову форму і не є поверхнями другого порядку, як це припускалось при виводі формули (3). Ці формули співпадають в граничному випадку, при  $\varepsilon_1' \rightarrow \infty$ . Умова, за якою значення кривизн  $G(\varepsilon_1')$  і  $G_a(\varepsilon_1')$  виявляться достатньо близькими, і буде умовою, коли можлива апроксимація виступів поверхнями другого порядку. На рис. 2 наведені результати розрахунків відношення  $G(\varepsilon_1')/G_a(\varepsilon_1')$  для різних поверхонь. Розрахунки виконувались для виступів, висота яких задовольняє умові:  $\varepsilon_1' > h_1$ .

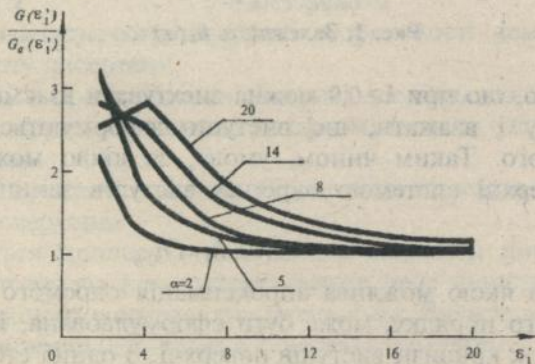


Рис. 2. Залежність відношення кривизн  $G(\varepsilon_1')/G_a(\varepsilon_1')$  від висоти виступів

Приймаємо, що апроксимація виступів можлива, якщо вона дає при розрахунках опорної площі похибку не більшу ніж 10%. Оскільки опорна площа залежить від кореня квадратного з кривизни, то апроксимація виступів можлива, коли відношення  $G(\varepsilon_1')/G_a(\varepsilon_1')$  буде меншим за  $1,1^2 = 1,21$ .

Позначимо  $h_{II}$  - рівень деформації, при якому відношення

$G(\epsilon_1)/G_a(\epsilon_1)$  дорівнює 1.2. Залежність  $h_{II}(\alpha)$  зображена на рис. 3.

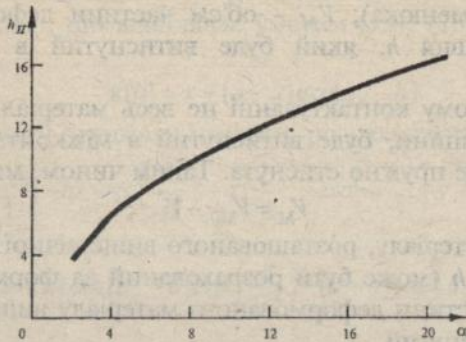


Рис. 3. Залежність  $h_{II}(\alpha)$

Для розрахунків  $h_{II}$  з високою точністю можна використати формулу :

$$h_{II} = 5,2 \ln \alpha - 0,1 . \quad (4)$$

Таким чином, апроксимація виступів поверхнями другого порядку можлива при виконанні умови :

$$h \geq h_{II} , \quad (5)$$

Необхідна умова моделювання може бути сформульована наступним чином :

$$h \geq \max(h_1, h_{II}) . \quad (6)$$

Аналіз рисунків 1 та 3 свідчить про те, що якщо виконується умова (5), то виконується не лише умова (2), але й більш сильна умова:  $h \geq h_{0,99}$ .

В підсумку приходимо до висновку, що моделювання поверхні можливе, якщо діюче навантаження, фізико-механічні характеристики матеріалів та параметри шорсткості контактуючих поверхонь є такими, що рівень деформації  $h$  задовольняє умові :

$$h \geq 5,2 \ln \alpha - 0,1 . \quad (7)$$

**Розділ 3** присвячений розрахунку характеристик пружного контакту. В процесі навантаження частина деформованого матеріалу буде пружно стиснута, а інша частина витиснута в міжконтактний простір, тому величина міжконтактного об'єму (тут і далі розглядаються об'єми, які припадають на одиницю номінальної площі, тому усі вони мають розмірність лінійних величин) може бути обчислена наступним чином :

$$V_{МП} = V_{П} - V_{М} , \quad (8)$$

де  $V_{П}$  - об'єм простору, обмеженого шорсткою поверхнею та січною площиною, проведеною на рівні  $h$  (може бути розрахований за формулою М.Ф. Семенюка);  $V_{М}$  - об'єм частини деформованого матеріалу вище рівня  $h$ , який буде витиснутий в міжконтактний простір.

При пружному контактуванні не весь матеріал, розташований вище січної площини, буде витиснутий в міжконтактний простір, частина його буде пружно стиснута. Таким чином, маємо :

$$V_{М} = V_{МО} - V' , \quad (9)$$

де  $V_{МО}$  - об'єм матеріалу, розташованого вище січної площини, проведеної на рівні  $h$  (може бути розрахований за формулою А.П. Хусу);  $V'$  - об'єм частини деформованого матеріалу вище рівня  $h$ , який буде пружно стиснутий.

Об'єм пружно стиснутого матеріалу можна обчислити за формулою :

$$V' = m_0^{1/2} \int_h^{\infty} \eta(\varepsilon_1') d\varepsilon_1' , \quad (10)$$

де  $m_0$  - спектральний момент нульового порядку.

Відносна фактична площа контакту  $\eta$  пов'язана з опорною площею  $\eta_c$  співвідношенням :

$$\eta = \kappa \eta_c = \frac{1}{2} \kappa \operatorname{erfc} \left( \frac{\varepsilon_1'}{\sqrt{2}} \right) . \quad (11)$$

Коефіцієнт  $\kappa$  приймають в даний час рівним 0,5, це виправдано лише при невеликих навантаженнях. Нами прийнято, що функція  $\kappa$  повинна задовольняти наступним граничним умовам :

- при невеликих навантаженнях ( $\sigma_n \rightarrow 0, h \rightarrow \infty$ )

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \kappa(h) = x , \quad (12)$$

де  $\sigma_n$  - номінальний тиск в зоні контакту;

У випадку апроксимації вершини виступу

конусом,  $x = (2/\pi)^2$ ,

параболоїдом другого ступеню,  $x = 1/2$ ,

параболоїдом третього ступеню,  $x = (4/(3\pi))^2/3$ ,

параболоїдом четвертого ступеню,  $x = (3/8)^{1/2}$ ;

- при великих навантаженнях відносна фактична площа контакту наближається за своєю величиною до 1 і тому, на підставі (11) маємо :

$$\lim_{h \rightarrow h_g} \kappa(h) = a , \quad (13)$$

де  $a = 2/\operatorname{erfc}(h_g/\sqrt{2})$ ;  $h_g$  - граничний рівень деформації (рівень деформації, при якому площа контакту дорівнює опорній площі, відповідно міжконтактний об'єм дорівнює нулю).

Функція  $\kappa(h)$ , що відповідає умовам (12), (13) вибрана нами у вигляді :

$$\kappa(h) = x + (a - x)\exp(h_g - h) \quad (14)$$

Це дало змогу отримати наступні розрахункові формули :

$$V' = \frac{1}{2}m_0^{1/2} \left[ -hx \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) + x\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) + \right. \quad (15)$$

$$\left. + (a - x)\exp(h_g - h)\operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) - (a - x)\exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right) \right]$$

$$V_M = \frac{1}{2}m_0^{1/2} \left[ (1 - x)\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) - (1 - x)h \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) - \right. \quad (16)$$

$$\left. - (a - x)\exp(h_g - h)\operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) + (a - x)\exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right) \right]$$

$$V_{MII} = \frac{1}{2}m_0^{1/2} \left[ x\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) + h \left[ 2 - x + \operatorname{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) \right] + \right. \quad (17)$$

$$\left. + (a - x)\exp(h_g - h)\operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) - (a - x)\exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right) \right]$$

Виходячи з умови  $V_{MII}(h=h_g)=0$ , на підставі формули (17) отримуємо рівняння для розрахунку граничного рівня деформації :

$$\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h_g^2}{2}\right) + h_g \left[ \frac{2}{x} - 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{h_g}{\sqrt{2}}\right) \right] + \frac{2}{x} - \operatorname{erfc}\left(\frac{h_g}{\sqrt{2}}\right) - \quad (18)$$

$$- \left(\frac{a}{x} - 1\right) \exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h_g+1}{\sqrt{2}}\right) = 0$$

Аналіз розв'язків рівняння (18) свідчить про те, що форма виступу незначно впливає на величину  $h_g$ . Оскільки в розділі 2 доведено, що за тих умов, коли можливе моделювання поверхні, виступ може бути апроксимований поверхнею другого порядку, в подальших дослідженнях приймаємо  $x=0,5$ .

Середня висота зазору  $H_S$  визначається як відношення міжконтактного об'єму до тієї частини номінальної площі контакту, яка

стикається з міжконтактним середовищем, тобто  $H_S = V_{MIV}/(1-\eta)$ .

Розрахункова формула має вигляд :

$$H_S = m_0^{1/2} h_s \quad (19)$$

де

$$h_s = \left\{ \left( \frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) + h \left[ 3 + \operatorname{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) \right] + (2a-1) \times \right. \\ \left. \times \exp(h_g - h) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) - (2a-1) \exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right) \right\} / \\ \left/ \left\{ 4 - \left[ 1 + (2a-1) \exp(h_g - h) \right] \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) \right\} \right. \quad (22)$$

Досліджена поведінка характеристик контакту для випадку малих (тобто при  $h \rightarrow \infty$ ) і випадку великих навантажень (при  $h \rightarrow h_g$ ).

У випадку малих навантажень величини  $V_{MIV}/m_0^{1/2}$  та  $h_s$  дорівнюють рівню деформації. Із збільшенням навантаження середня висота зазору прямує до нуля.

Оскільки усі контактні характеристики залежать від рівня деформації, то для того, щоб виразити їх через умови контактування (навантаження, фізико-механічні властивості матеріалів, параметри шорсткості поверхонь), необхідно насамперед встановити залежність рівня деформації від умов контактування. Залежність, яка пов'язує рівень деформації з умовами контактування, називається основним рівнянням контактування.

При виводі основного рівняння, а також в подальших дослідженнях виступи шорсткої ізотропної поверхні апроксимувались сферами, оскільки в роботі доведено, що при рівних навантаженнях контактні характеристики сфери і еліпсоїда, форма якого найбільш відповідає реальній формі виступу, відрізняються не більше ніж на 4%.

Для умов, коли можливе моделювання поверхні, отримали основне рівняння контактування :

$$\frac{\sigma_n}{E_q} = \frac{2\alpha^{1/4}}{3\pi^2} \int_h^\infty \epsilon_1' \exp(-\epsilon_1'^2/2) (\epsilon_1' - h)^{3/2} \left[ G_a(\epsilon_1')/m_4 \right]^{1/4} d\epsilon_1', \quad (21)$$

де  $E = \frac{1}{\left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}$  - зведений модуль Юнга ;  $\nu_1, \nu_2, E_1, E_2$ -

коефіцієнти Пуасона та модулі Юнга контактуючих матеріалів;  $q$  - градієнт поверхні (величина, що характеризує нахил нерівностей поверхні відносно середньої площини), може бути розрахований, якщо відомі стандартні параметри шорсткості - середньоарифме-

тичне відхилення точок поверхні  $Ra$  та крок профілю по середній лінії  $S_m$  :

$$q = \frac{\pi^2 Ra}{S_m} \quad (22)$$

Рівняння (21) дозволяє за заданими величинами номінального тиску ( $\sigma_n$ ), фізико-механічних властивостей матеріалів ( $E$ ) та параметрів шорсткості ( $q, \alpha$ ) розрахувати рівень деформації  $h$ . З основного рівняння випливає, що взаємне положення поверхонь визначається добутком модуля пружності на градієнт поверхні. Це означає, що взаємне положення поверхонь можна регулювати як шляхом зміни фізико-механічних властивостей матеріалів ( $E$ ), так і параметрів шорсткості ( $q$ ). Оскільки керувати зміною параметрів шорсткості поверхневого шару можна значно простіше, використовуючи для цього відповідні режими обробки, то на основі рівняння (21) можна дати важливу практичну рекомендацію - керувати контактними властивостями шорстких тіл доцільно, в першу чергу, шляхом зміни параметрів шорсткості, найбільш важливим з яких є  $q$ . Формула (22) відкриває можливості технологічного керування контактними властивостями поверхонь, оскільки є дослідження, як наші власні, так і інших авторів, насамперед А.Г. Суслова, що пов'язують параметри шорсткості з режимами механічної обробки.

Для розрахунку фактичної площі контакту отримано формулу :

$$\eta = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}(h/\sqrt{2}) \quad (27)$$

З формули (23) випливає, що в тому випадку, коли виконані умови моделювання поверхонь, фактична площа пружного контакту вдвічі менша за опорну площу.

За допомогою формул (21, 23) для різних ізотропних поверхонь розраховано відношення  $k = \eta / (\sigma_n / E_g)$ . Виявилось, що параметр  $k$  практично не залежить ні від  $h$ , ні від  $\alpha$  і може бути прийнятим рівним 2.22. Таким чином, при умові, що можливе моделювання поверхні, залежність відносної фактичної площі контакту від умов контактування описується формулою :

$$\eta = 2,22 \frac{\sigma_n}{Eq} \quad (24)$$

З формули (24) випливає, що у випадку пружного контактування при невеликих навантаженнях (саме для таких умов отримана ця формула), фактична площа контакту лінійно залежить від навантаження. Цей висновок повністю відповідає результатам експериментальних досліджень, виконаних різними вченими для різних матеріалів. Чисельні експериментальні дослідження показують, що в

загальному випадку залежність фактичної площі контакту від навантаження має вигляд :

$$\eta = 1 - \exp(-\gamma \sigma_n / E), \quad (25)$$

де  $\gamma$  - коефіцієнт, що залежить від шорсткості. Коефіцієнт  $\gamma$  в кожному окремому випадку знаходять емпіричним шляхом, оскільки методи його розрахунку не розроблені.

Шляхом перетворення формули (25) для випадку малих навантажень і подальшого співставлення перетвореної формули з формулою (24), стало можливим отримати формулу розрахунку параметру  $\gamma$ . В кінцевому вигляді формула розрахунку фактичної площі контакту запишеться наступним чином :

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2,22\sigma_n}{Eq}\right). \quad (26)$$

Розробка інженерних методів розрахунку рівня деформації, міжконтактного об'єму, середньої висоти зазору проводилась в наступній послідовності. Введемо позначення :

$$K = \frac{2,22\sigma_n}{Eq}. \quad (27)$$

Величина  $K$  називається комплексом умов контактування, оскільки ця безрозмірна величина залежить від навантаження в зоні контакту, фізико-механічних властивостей матеріалів і шорсткості поверхонь. Для того, щоб встановити залежність контактних характеристик від комплексу  $K$  використовується наступний алгоритм - змінюючи рівень деформації  $h$  в діапазоні  $[h_g; 6]$ , розраховуємо величини: відносної фактичної площі контакту  $\eta$  (за формулою (11)), безрозмірного міжконтактного об'єму  $V_{МП} / m_0^{1/2}$  (за формулою (17)), середньої висоти зазору  $h_s$  (за формулою (20)) та комплексу умов контактування  $K$  за формулою, що впливає із співвідношень (26, 27):

$$K = -\ln(1-\eta). \quad (28)$$

Аналіз результатів розрахунків дозволив отримати наступні апроксимуючі залежності :

$$h = \begin{cases} 3,95 \ln(5,25 - \ln K) - 6,982, & K \leq 0,6827 \\ \frac{0,422}{\ln K + 1} - 0,845, & K > 0,6827 \end{cases} \quad (29)$$

$$h = 0,5724 - 0,32 \ln K, \quad 2 \cdot 10^{-3} \leq K \leq 3,5 \cdot 10^{-2} \quad (30)$$

$$V_{МП} / m_0^{1/2} = \begin{cases} 4,472 \ln(7,492 - \ln K) - 9,053, & K \leq 0,6827 \\ \frac{0,0425}{\ln K + 0,608}, & K > 0,6827 \end{cases} \quad (31)$$

$$h_s = \begin{cases} 4,816 \ln(9,06 - \ln K) - 10,46, & K \leq 0,6827 \\ \frac{0,208}{\ln K + 0,94}, & K > 0,6827 \end{cases} \quad (32)$$

Абсолютна похибка при розрахунках за наведеними вище формулами не перевищує: для формули (29) - 0,04, для формули (30) - 0,1, для формули (31) - 0,06, для формули (32) - 0,045. Таким чином, ці формули мають високу точність.

При зміні номінального тиску від  $\sigma_{n1}$  до  $\sigma_{n2}$  контактне переміщення складає :

$$\Delta H = m_0^{1/2} \Delta h. \quad (33)$$

Для розрахунку величини  $\Delta h$  на підставі формул (29, 30) отримані співвідношення :

- при  $\max(K_1, K_2) \leq 0,6827$

$$\Delta h = 3,95 \ln \frac{5,25 - \ln K_2}{5,25 - \ln K_1}; \quad (34)$$

- при  $\min(K_1, K_2) > 0,6827$

$$\Delta h = 0,422 \frac{\ln(\sigma_{n1}/\sigma_{n2})}{(\ln K_2 + 1)(\ln K_1 + 1)}; \quad (35)$$

- при  $K_1, K_2 \in [2 \cdot 10^{-5}; 3,5 \cdot 10^{-2}]$

$$\Delta h = 0,32 \ln \frac{\sigma_{n1}}{\sigma_{n2}}. \quad (36)$$

Формули (33-36) дозволяють зробити ряд важливих висновків.

1. В практично важливому діапазоні зміни комплексу умов контактування  $K$ , коли  $2 \cdot 10^{-5} \leq K \leq 3,5 \cdot 10^{-2}$  величина переміщення не залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів, а залежить лише від параметру шорсткості  $Ra$  і відношення номінальних тисків. При зміні навантаження в з'єднанні в геометричній прогресії, контактне переміщення змінюється в арифметичній прогресії.

2. Контактне переміщення прямо пропорційне  $Ra$ . Цей параметр найбільш сильно впливає на величину контактних переміщень.

Контактна жорсткість визначається як відношення зміни номінального тиску до переміщення, викликаного цією зміною :

$$S = - \frac{d\sigma_n}{dH}. \quad (37)$$

Виходячи з визначення (37) і використовуючи залежності (11, 14, 26), отримуємо співвідношення :

$$\frac{2,22m_0^{1/2}}{Eq} S = \frac{1}{1-\eta} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) + \eta \sqrt{\left[1 + \frac{1}{2a-1} \exp(h-h_g)\right]} + \frac{2a-1}{2\sqrt{2\pi}} \exp\left[h_g - \frac{1}{2}h(h+2)\right] \right\} \quad (38)$$

Поєднання формули (38) з формулами (11, 26, 28) дозволяє отримати залежність контактної жорсткості від комплексу умов контактування. Ця залежність з високою точністю (відносна похибка не перевищує 5%) може бути апроксимована формулою :

$$S = \begin{cases} 0,941 \frac{Eq}{Ra} K^{0,9582}, & K \leq 2,835 \cdot 10^{-4} \\ 0,515 \frac{Eq}{Ra} K^{0,866}, & 2,835 \cdot 10^{-4} < K \leq 0,3985 \end{cases} \quad (39)$$

Показник степені при  $K$  в формулі (39) досить близький до 1. Це добре узгоджується з результатами експериментів різних авторів, згідно з якими, контактна жорсткість приблизно пропорційна номінальному тиску. З формули (39) випливає, що контактна жорсткість обернено пропорційна величині  $Ra$ . Це також знаходиться у відповідності з експериментальними даними, які вказують на те, що контактна жорсткість зменшується із збільшенням шорсткості.

Аналіз впливу різних факторів на контактну жорсткість приводить до висновку, що найбільш сильно на величину контактної жорсткості впливає параметр шорсткості  $Ra$ , трохи менший вплив має номінальний тиск  $\sigma_n$ . Зміни зведеного модуля Юнга  $E$  та нахилу нерівностей  $q$  слабко впливають на контактну жорсткість. Таким чином, виявляється, що найбільш ефективно впливати на величину контактної жорсткості можна шляхом зміни параметру шорсткості  $Ra$ , що досягається відповідним призначенням режимів механічної обробки. Мікроприємства, які забезпечують зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, є менш ефективними, з точки зору їх впливу на контактну жорсткість.

Якщо виходити з формул (29, 30), то можна отримати ще дві формули розрахунку контактної жорсткості :

$$S = \frac{0,2\sigma_n(5,25 - \ln K)}{Ra} \quad (4,96 \cdot 10^{-10} \leq K \leq 0,619) \quad , \quad (40)$$

$$S = 2,5 \frac{\sigma_n}{Ra} \quad (3,63 \cdot 10^{-4} \leq K \leq 3,55 \cdot 10^{-3}) \quad , \quad (41)$$

Формули (40, 41) підтверджують ті висновки, які були зроблені раніше відносно впливу різних факторів на контактну жорсткість. Цікаво те, що при зміні комплексу умов контактування  $K$  в тому

діапазоні, в якому може бути застосована формула (41), контактна жорсткість взагалі не залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів і нахилу нерівностей шорсткої поверхні.

**Розділ 4** присвячений експериментальній перевірці розроблених розрахункових методів. Характеристики контакту, які вивчаються, пов'язані між собою. Відомо, що не всі характеристики можна виміряти однаково точно, тому експериментально визначались саме ті характеристики, які можна виміряти достатньо точно, а саме - фактична площа контакту, контактні переміщення, контактна жорсткість. Для всебічної перевірки розробленої теорії, результати розрахунків співставлялись не лише з власними експериментальними даними, але й з даними інших авторів, а також результатами розрахунків за існуючими теоріями, якщо це виявлялось можливим. Перевірка того, що експеримент відбувався в режимі пружного контактування, проводилась на основі модифікованого критерію Грінвуда.

Фактична площа контакту вимірювалась оптико-акустичним методом. Вимірювання підготовлених нами зразків проводились в Інституті механіки металополімерних систем АН Білорусії Т.Ф. Калмиковою. Досліджувались зразки, виготовлені з фторопласту-4, флубону-20, графелону-20, фенілону С2, поліетілену низького тиску, полікапроаміду, капролону В. Результати експериментів співставлялись з результатами розрахунків за нашою формулою (26), за методикою Я.А. Рудзита та методикою М.Б. Дьомкіна. В середньому відхилення експериментальних значень від розрахункових склали: для розробленої методики - 18,5%, для методики Я.А. Рудзита - 64,5%, для методики М.Б. Дьомкіна - 34,9%.

Розрахунок за методикою Я.А. Рудзита проводився не в усіх випадках, оскільки ця методика, як це доведено в роботі, може бути використана лише за умови:  $\sigma_n/(Eq) \leq 0,03$ . Аналіз результатів досліджень приводить до висновків, що розроблений метод розрахунку фактичної площі контакту має суттєві переваги в порівнянні з іншими методами, а саме:

а) розроблений метод є більш точним, ніж існуючі; значення, розраховані за цим методом, задовільно узгоджуються з експериментальними даними;

б) на відміну від існуючих, метод може застосовуватись при будь-яких навантаженнях, як малих, так і великих;

в) на відміну від метода М.Б. Дьомкіна, розроблений метод містить лише стандартні параметри шорсткості ( середньоарифметичне відхилення  $Ra$  та градієнт поверхні  $q$ , який згідно з (22), залежить від стандартних параметрів  $Ra$  та  $S_m$  );

г) розроблений метод значно простіший за існуючі.

Для дослідження контактних переміщень та контактної жорсткості була сконструйована установка, конструкція якої наведена в дисертації. Були досліджені зразки, виготовлені з вініпласту, капролону, поліетілену високого тиску та флубону. Результати експериментів співставлялися з результатами розрахунків за нашими формулами (33, 34, 36) та з результатами розрахунків за методиками Я.А. Рудзита та М.Б. Дьомкіна. В середньому відхилення розрахункових значень від експериментальних склало: для формул (33, 34) - 6,8%, для формул - (33, 36) - 9,3%, для методики Я.А. Рудзита - 22,6%, для методики М.Б. Дьомкіна - 42,3%.

Результати експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок про те, що розроблені методи розрахунку контактних переміщень мають ряд переваг в порівнянні з методами інших авторів, а саме :

а) розрахунок ведеться за більш простими і, водночас, більш точними формулами, які містять лише стандартні параметри шорсткості;

б) методика, заснована на формулах (33, 34), може застосовуватись в більш широкому діапазоні зміни навантажень, ніж існуючі методики.

Додаткова можливість перевірки розроблених методів розрахунку контактних переміщень полягає у використанні експериментальних досліджень Г.С. Калди. Результати експериментів Г.С. Калди (досліджувались зразки, виготовлені з сталі ХВГ, сталі 12ХН9Т, сталі 45, чавуну СЧ15, бронзи Бр. С30) порівнювались з результатами розрахунків за вказаними вище методиками. Висновки щодо порівняльної точності різних методик, зроблені на підставі експериментальних досліджень Г.С. Калди, виявились такими ж, як і висновки за результатами наших власних експериментальних досліджень.

Результати експериментальних досліджень, як власних, так і Г.С. Калди, підтверджують висновок, зроблений на підставі формули (36) - якщо комплекс умов контактування знаходиться в інтервалі  $[2 \cdot 10^{-5}; 3,5 \cdot 10^{-2}]$ , то можна вважати, що при зміні навантаження в геометричній прогресії, величина контактного переміщення змінюється в арифметичній прогресії.

Оскільки методи розрахунку контактної жорсткості до даного часу були практично відсутні, то результати експериментальних досліджень порівнювались лише з результатами розрахунків за власними формулами. Експерименти проводились на тих самих зразках, які використовувались при дослідженні контактних пе-

реміщень. Розрахунок контактної жорсткості проводився за формулами (39, 41). Експериментальні значення контактної жорсткості визначались за формулою :

$$S_{\sigma,i} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{n,i} - \sigma_{n,i-1}}{\Delta H_{\sigma,i} - \Delta H_{\sigma,i-1}} + \frac{\sigma_{n,i+1} - \sigma_{n,i}}{\Delta H_{\sigma,i+1} - \Delta H_{\sigma,i}} \right), \quad (42)$$

де  $\sigma_{ni}$ ,  $\Delta H_{\sigma i}$  - відповідно номінальний тиск та експериментально визначене контактне переміщення для  $i$ -го дослід. Відхилення розрахункових значень від експериментальних складо: для формули (39) - 8,7%, формули (40) - 11%, для формули (41) - 9,1%.

Таким чином, розроблені методи розрахунку контактної жорсткості добре узгоджуються з експериментальними даними. Співставляючи формули (39) та (40), слід відзначити, що вони мають приблизно однакову точність, але перевагу слід віддати формулі (39), оскільки вона має більш широку область застосування. Формула (41) є найбільш простою, але область її застосування значно вузья, ніж для інших формул.

Розроблені методи розрахунку контактної жорсткості були перевірені додатково шляхом співставлення з результатами Т.Р. Томаса, Р.С. Сейлса, які досліджували жорсткість контакту станини токарного верстату з супортом. Результати розрахунків, проведених за формулами (39) та (40), відрізняються від величини, вказаної Т.Р.Томасом, Р.С. Сейлсом, відповідно на 14% та 17,5%. Таку відповідність слід вважати доброю.

**Розділ 5** висвітлює питання практичного використання результатів теоретичних досліджень. Вказані найважливіші області застосування результатів досліджень - теорія тертя та зношування, герметологія, розрахунок теплових та електричних явищ, адгезії в зоні контакту, проектування верстатних пристроїв, черв'ячних редукторів. На практичному прикладі показано, що в черв'ячних редукторах контактні переміщення в стиках, викликані несталістю навантаження на редуктор, призводять до зміщення середньої площини колеса відносно осі черв'яка. Доведено, що в реальних випадках це зміщення перевищує допустиму величину, наслідком чого є неправильне зачеплення і скорочення строку служби передач.

Гарантувати потрібну величину зміщення можна шляхом правильного призначення параметрів шорсткості контактуючих поверхонь. Необхідні значення параметрів шорсткості в свою чергу можна отримати, призначивши відповідні режими обробки поверхонь. Для різних видів обробки та різних матеріалів чисельні залежності, що пов'язують параметри шорсткості з режимами обробки, отримані А.Г.Сусловим.

В дисертаційній роботі, застосовуючи відомі методи планування експерименту (використовувалась чвертьрепліка від повного факторного експерименту  $2^5$ ), отримане рівняння, яке адекватно описує плоске чистове шліфування чавуну СЧ15.

### **Викладення основних результатів дисертації та формулювання підсумкових висновків**

1. Доведено, що моделювання шорсткої ізотропної поверхні з апроксимацією виступів поверхнями другого порядку можливе, якщо діюче навантаження, фізико-механічні характеристики матеріалів та параметри шорсткості контактуючих поверхонь є такими, що рівень деформації задовольняє умові (7)

2. Показано, що в залежності від висоти виступу повна кривизна в вершинах модельної поверхні визначається за формулою (3).

3. Отримані співвідношення, що пов'язують міжконтактний об'єм (формула (17)), відносну фактичну площу контакту (формули (11,14)), середню висоту зазору (формула (19)), безрозмірну середню висоту зазору (формула (20)), контактне переміщення (формула (33)) та контактну жорсткість (формула (38)) з рівнем деформації.

4. Для розрахунку граничного рівня деформації отримано рівняння (18). Форма виступу незначно впливає на величину  $h_g$ . При апроксимації виступів поверхнями другого порядку, маємо:  $h_g = -0,8451$ .

5. Доведено, що для ізотропної поверхні доцільно апроксимувати виступи сферами, оскільки це значно спрощує розрахункові рівняння і похибка, яка при цьому виникає, не перевищує 4%.

6. Отримано основне рівняння контактування (21), яке пов'язує рівень деформації з умовами контактування - номінальним тиском в зоні контакту, фізико-механічними властивостями матеріалів та параметрами шорсткості поверхонь. З основного рівняння контактування випливає, що керувати контактними властивостями шорстких тіл доцільно в першу чергу шляхом зміни параметрів шорсткості, найбільш важливим з яких є нахил нерівностей. Міроприємства, які забезпечують зміну фізико-механічних властивостей матеріалів є менш ефективними, з точки зору їх впливу на контактні характеристики.

7. Розроблені інженерні методики розрахунку наступних контактних характеристик:

- відносної фактичної площі контакту (формула (26)), рівень деформації (формули (29,30)), міжконтактного об'єму (формула

(31)), безрозмірної середньої висоти зазору (формула (32)), безрозмірного контактного переміщення (формули (34,36)), контактної жорсткості (формули (39-41)).

Інженерні методи розрахунку контактної жорсткості розроблені практично вперше.

8. Проведені експериментальні дослідження, в тому числі на спеціально сконструйованій установці, довели високу точність розроблених розрахункових методів. В порівнянні з існуючими, розроблені методи мають ряд переваг, а саме:

а) розрахунок ведеться за більш простими і, водночас, більш точними формулами, які містять лише стандартні параметри шорсткості;

б) значно розширюється діапазон застосування розрахункових методів.

9. За результатами досліджень встановлено, що контактні характеристики практично не залежать від параметру ширини спектру  $\alpha$ .

- При невеликих навантаженнях фактична площа контакту лінійно залежить від навантаження.

- В практично важливому діапазоні зміни комплексу умов контактування ( $2 \cdot 10^{-5} \leq K \leq 3,5 \cdot 10^{-2}$ ) величина контактного переміщення не залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів, а залежить лише від параметру шорсткості  $Ra$  і відношення номінальних тисків. При зміні навантаження в з'єднанні в геометричній прогресії, контактне переміщення змінюється в арифметичній прогресії.

- Контактна жорсткість приблизно пропорційна номінальному тиску і обернено пропорційна величині  $Ra$ .

- Зміни зведеного модуля Юнга та нахилу нерівностей  $q$  слабко впливають на величини контактних переміщень та контактної жорсткості.

- При зміні комплексу умов контактування  $K$  в діапазоні  $[3,63 \cdot 10^{-4}; 3,55 \cdot 10^{-3}]$  контактна жорсткість практично не залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів і нахилів нерівностей шорсткої поверхні.

10. Практична цінність розрахункових методів доведена їх застосуванням до проектування черв'ячних редукторів та верстатних пристроїв.

Основні положення дисертації викладені у наступних роботах:

1. Терлецкая Е.В. Контактная жесткость плоских поверхностей и ее технологическое обеспечение. - Сборник трудов молодых ученых ХТИ. Хмельницкий, 1993. - С. 148-149.

2. Терлецкая Е.В., Семенюк Н.Ф. Исследование зависимости контактных перемещений от режимов резания при плоском чистовом шлифовании. - Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції "Вдосконалення обладнання легкої промисловості та складної побутової техніки". Хмельницький, 1993. - С. 79.

3. Терлецкая Е.В., Семенюк Н.Ф. Технологическое обеспечение функциональных свойств плоских соединений. - Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції "Вдосконалення обладнання легкої промисловості та складної побутової техніки". Хмельницький, 1993. - С. 80.

4. Терлецька О.В. Критерій режиму плину газу в ущільнені. - Тези доповідей науково-практичної конференції "Наукові основи сучасних прогресивних технологій". Хмельницький, 1994. - С. 149.

5. Лук'янюк М.В., Семенюк М.Ф., Терлецька О.В. Методика експериментальних досліджень герметичності торцьових ущільнень. - Тези доповідей III-ої науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва". Хмельницький, 1995. - С.231.

6. Лук'янюк М.В., Семенюк М.Ф., Терлецька О.В. Експериментальне дослідження контактних переміщень торцьових ущільнень. - Тези доповідей III-ої науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва". Хмельницький, 1995. - С.232.

7. Терлецька О.В. Механіка контактування шорстких ізотропних поверхонь. - Тези доповідей науково-практичної конференції "Технологічний університет в системі реформування освітньої та наукової діяльності Подільського регіону". Хмельницький, 1995. - С.338.

8. Терлецька О.В. Вплив форми виступу шорсткої поверхні на граничний рівень деформації. - Тези доповідей науково-практичної конференції "Технологічний університет в системі реформування освітньої та наукової діяльності Подільського регіону". Хмельницький, 1995. - С.339.

9. Terletzka, Semenjuk, Dierich. Modellierung des Kontaktes zweier rauher Körper. Wissenschaftliche Berichte Hochschule

Zittau/Görlitz, 1995. - Heft 39. - S. 1-15.

10. Терлецкая Е.В., Семенюк Н.Ф., Дирих П. Моделирование изотропных шероховатых поверхностей при решении контактной задачи. // Проблемы сучасного машинобудування. Збірник наукових праць. - Хмельницький, 1996. - С. 99-101.

11. Терлецкая Е.В. Расчет объема межконтактного пространства и граничного уровня деформации плоских шероховатых стыков. // Проблемы сучасного машинобудування. Збірник наукових праць. - Хмельницький, 1996. - С. 107-109.

### **Аннотация**

Терлецкая Е.В. Исследование характеристик фрикционного упругого контакта шероховатых изотропных поверхностей.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 - Трение и износ в машинах, Технологический университет Подолья, Хмельницкий, 1996.

Защищается 11 публикаций, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования контактных характеристик шероховатых изотропных поверхностей. Установлены условия, при которых возможно моделирование шероховатых поверхностей. Разработана математическая модель процесса контактирования, на основе которой созданы инженерные методы расчета фактической площади контакта, уровня деформации, граничного уровня деформации, объема межконтактного пространства, средней высоты зазора, контактных перемещений, контактной жесткости. Разработана установка для экспериментального исследования характеристик контакта. Проведенные экспериментальные исследования доказали высокую точность разработанных расчетных методов и их преимущество по сравнению с аналогичными существующими. Разработанные методы расчета нашли практическое применение.

### **Summary**

Terletskaia E.V. Investigation of characteristics of friction elastic contact of rough isotropic surfaces.

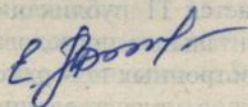
The thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in speciality 05.02.04 - Friction and wear in machines, Technological University of Podillia, Khmelnytsky, 1996.

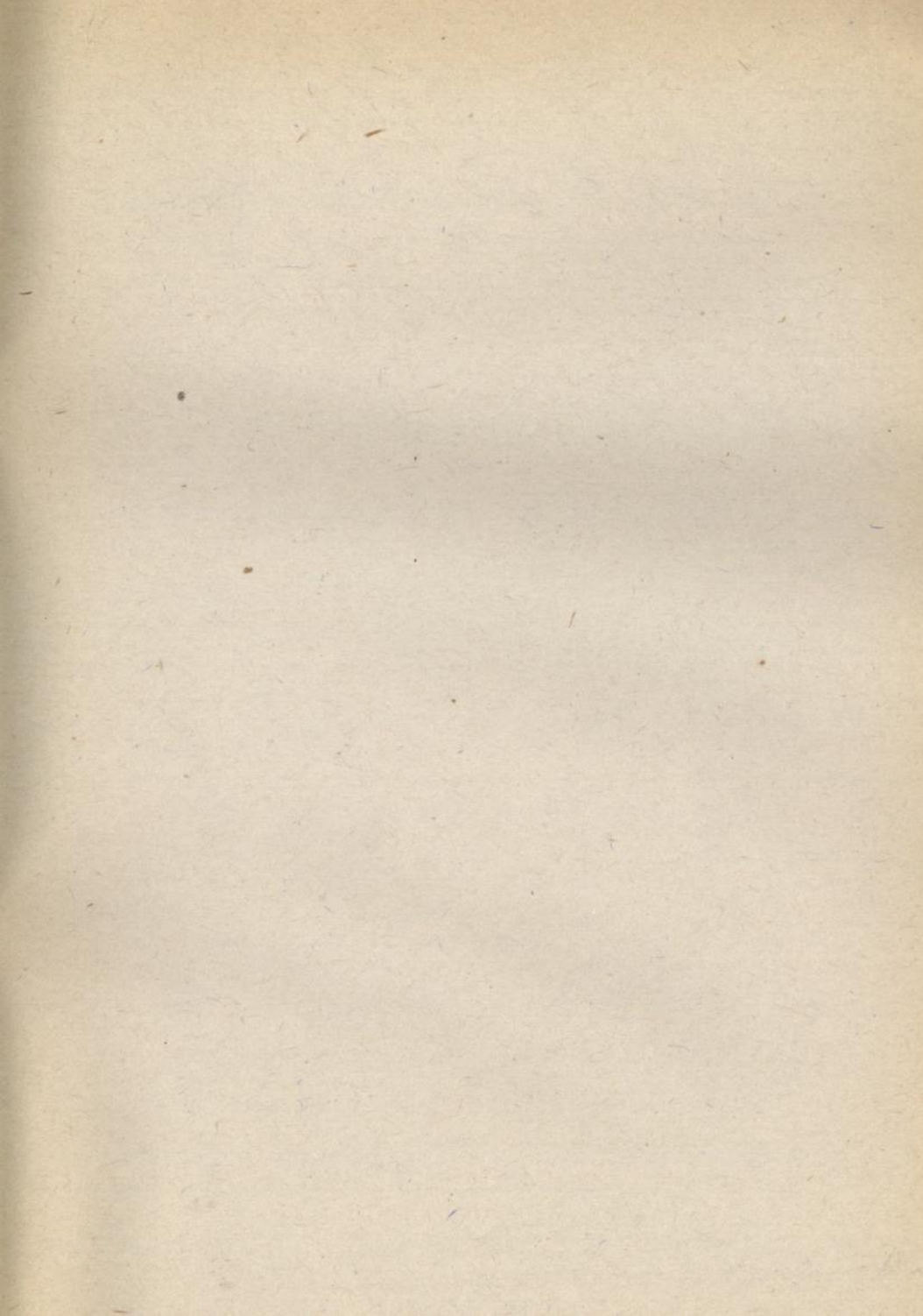
11 publication are submitted. They contain theoretical and experimental investigations of contact characteristics of rough isotropic surfaces. The conditions under which modelling of rough surfaces is

possible have been determined. The mathematical model of contacting process has been developed. On the basis of this model engineering methods for calculation of real contact area, deformation level, ultimate deformation level, volume of intercontact space, mean clearance contact displacements and contact stiffness have been worked out. The installation for experimental investigation of contact characteristics has been developed. The conducted experimental studies have proved a high accuracy of the calculation methods, which were worked out and showed their advantage over the existing analogs. The developed calculation methods have found practical application.

### **Ключові слова**

Фрикційний контакт, шорсткість, моделювання, поверхня, пружний контакт, фактична площа контакту, рівень деформації, граничний рівень деформації, міжконтактний об'єм, середня висота зазору, контактні переміщення, контактна жорсткість.









**AB 35.276**