

О.Г. ТИМОЩУК, С.П. ЛІСЕВИЧ
Хмельницький національний університет

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОГО РІВНЯ ДЕФОРМАЦІЇ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

На основі теорії стохастичних процесів розроблено метод ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень. Результатом є створення інженерного методу розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь поршневих металополімерних ущільнень, а також оцінка точності розробленого методу для застосування в інженерній практиці проектування поршневих ущільнень. В статті розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерної поверхні) з гладкою (металевою) поверхнею. Досліджено зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u на основі теорії стохастичних полів. Розрахований зв'язок ефективного рівня деформації з комплексом умов контактування і апроксимований на основі оригінальних програм Appr_E_1, Appr_E_2, Appr_E_3 [1]. Комплекс умов контактування (безрозмірна величина) K залежить від номінального напруження в контакті (σ_n), фізико-механічних властивостей матеріалів (зведеного модуля Юнга E та шорсткості контактуючих поверхонь (градієнта поверхні q). Виконано аналіз і оцінку точності розробленого методу розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень. Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою ефективного рівня деформації різняться не більше, ніж на 0,11 при $K \leq 0,7$, 0,065 – при $0,7 < K \leq 2$ та не більше, ніж на 0,15 при $2 < K \leq 5$.

Ключові слова: теорія стохастичних полів; ефективний рівень деформації контактуючих поверхонь; питома площа шорсткої поверхні контакту; герметичність циліндро-поршневих ущільнень; натікання газу; пружний контакт.

O. TYMOSHCHUK, S. LISEVYCH
Khmelnytsky National University

EVALUATION OF THE ACCURACY OF THE METHOD OF CALCULATING THE EFFECTIVE LEVEL OF DEFORMATION OF THE CONTACT SURFACES OF THE CYLINDER-PISTON SEALS

Based on the theory of stochastic processes, a method for the effective level of deformation of the contact surfaces of cylinder-piston seals has been developed. The result is the creation of an engineering method for calculating the effective level of deformation of the contact surfaces of the piston metal-polymer seals, as well as assessing the accuracy of the developed method for application in engineering practice of piston seals. The article considers the elastic contact of a strongly anisotropic rough surface (polymer surface) with a smooth (metal) surface.

In the process of contact loading there are two average planes of the rough surface - the average plane of the rough surface before deformation (the distance from the smooth surface to this average plane is called the deformation level h) and the average plane of the rough surface after deformation (the corresponding distance is called the effective deformation level u). The value of h characterizes the contact displacement of the surfaces and the normal contact stiffness of the joint. The value of u is important when calculating the flow of gas through the joint.

The relationship between the strain level h and the effective strain level u is investigated based on stochastic field theory. The connection of the effective level of deformation with a set of contact conditions is calculated and approximated on the basis of the original programs Appr_E_1, Appr_E_2, Appr_E_3 [1]. The set of contact conditions (dimensionless value) K depends on the nominal stress in the contact σ_n , physical and mechanical properties of materials (consolidated Young's modulus E and roughness of contact surfaces (surface gradient q). Values calculated by the exact and approximate formula of the effective level of deformation differ by no more than 0.11 at $K \leq 0,7$, 0.065 - at $0,7 < K \leq 2$ and no more than 0.15 at $2 < K \leq 5$.

Keywords: stochastic field theory; effective level of deformation of contact surfaces; specific area of the rough contact surface; tightness of cylinder-piston seals; gas leakage; elastic contact.

Формулювання цілі статті

Необхідно виконати аналіз і оцінку точності розробленого методу розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень.

Результати досліджень

В роботі розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металева поверхня).

З-за переформування матеріалу шорсткої поверхні в процесі контактного навантаження слід розрізнити дві середні площини шорсткої поверхні (рис.1) – середню площину шорсткої поверхні до деформування (відстань від гладкої поверхні до цієї середньої площини називається рівнем деформації h) і середню площину шорсткої поверхні після деформування (відповідна відстань називається ефективним рівнем деформації u). Величина h характеризує контактне зміщення поверхонь та нормальну контактну жорсткість стику. Величина

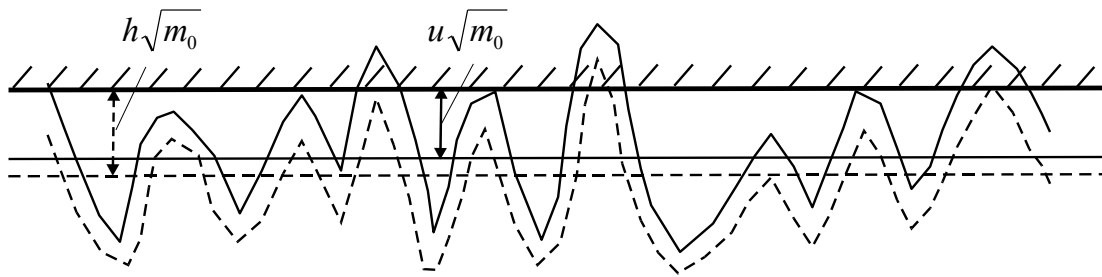


Рис. 1. Схема контактування спряжених поверхонь

u важлива при розрахунках натікання рідини чи газу через стик. Зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u описується рівнянням [1]:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) + h \left[3 + \operatorname{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right)\right] + \\ & + (2a - 1) \left[\exp(h_g - h) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) - \exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right)\right] \\ & = 2 \left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) + u \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right], \end{aligned} \quad (1)$$

де $a = 2/\operatorname{erfc}(h_g/\sqrt{2})$;

$h_g = -0,845$ – граничний рівень деформації (рівень деформації, при якому площа контакту рівна площі перерізу).

Об'єм простору, обмеженого шорсткою поверхнею і площиною, що перетинає поверхню на рівні u [2]:

$$V_S(u) = \frac{m_0^{1/2}}{2} \left[\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) + u \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)\right]. \quad (2)$$

Було отримано формулу міжконтактного об'єму [1]:

$$\begin{aligned} V = & \frac{m_0^{1/2}}{4} \left\{ \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) + h \left[3 + \operatorname{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right)\right] + \right. \\ & \left. + (2a - 1) \left[\exp(h_g - h) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{2}}\right) - \exp\left(h_g + \frac{1}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h+1}{\sqrt{2}}\right)\right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

При нескінченно великих навантаженнях, коли $h \rightarrow h_g = -0,845$, міжконтактний об'єм V прямує до нуля. При малих навантаженнях, коли $h \rightarrow \infty$, маємо:

$$\begin{aligned} V & \rightarrow h m_0^{1/2}, \\ m_0 & = \frac{\pi}{2} R a^2, \end{aligned} \quad (4)$$

де m_0 – спектральний момент нульового порядку.

При малих навантаженнях значення рівня деформації h і ефективного рівня деформації u рівні.

Зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u , розрахований на підставі рівняння (1), представлений на рис. 2. Розрахунки виконані за допомогою програми Niveau [1], написаної з вико-ристанням програмного продукту Mathcad Professional.

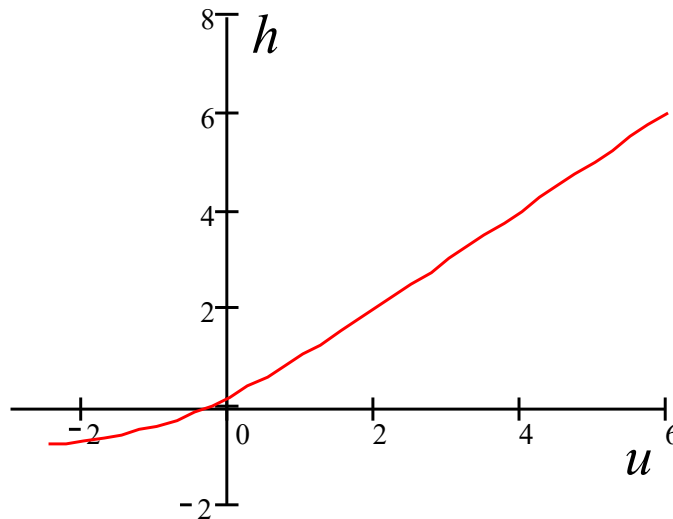


Рис. 2. Зв'язок між рівнем деформації h і ефективним рівнем деформації u

Опорна площа поверхні, що відповідає рівню u , може бути розрахована за формулою [3]:

$$\eta_c(u) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right). \quad (5)$$

Зв'язок ефективного рівня деформації з комплексом умов контактування можна отримати наступним чином. Фактичну площу контакту η можна визначити як опорну площу шорсткої деформованої поверхні, що відповідає рівню u . Тоді, згідно з (5), маємо:

$$\eta = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right). \quad (6)$$

В той же час, в [4] отримано наступний зв'язок фактичної площі контакту з комплексом умов контактування:

$$\eta = 1 - \exp(-K). \quad (7)$$

Таким чином, отримано наступне рівняння для визначення ефективного рівня деформації за заданою величиною комплексу умов контактування:

$$1 - \exp(-K) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0, \quad (8)$$

$$K = \frac{1,83\sigma_n}{E q}.$$

На підставі (8) за допомогою програми Effectiv [1], написаної з використанням програмного продукту Mathcad Professional, розрахований зв'язок ефективного рівня деформації з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 3.

Залежність, представлена на рис. 3, була апроксимована формулою (9), яка отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_E_1, Appr_E_2, Appr_E_3 [1], написаними з використанням програмного продукту Mathcad Professional:

$$u = \begin{cases} -7,890 + 4,453 \ln(5,562 - C), & (K \leq 0,7); \\ -2,089 \exp[-(0,620 + C)^{-1,302}], & (0,7 < K \leq 2); \\ -4,522 \exp[-(-0,062 + C)^{-0,967}], & (2 < K \leq 5) \end{cases} \quad (9)$$

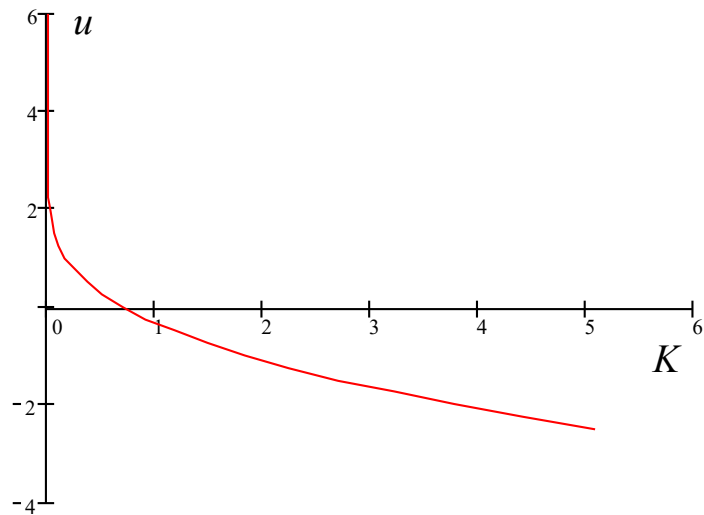


Рис. 3. Залежність ефективного рівня деформації від комплексу умов контактування

На рис. 4 співставлені задані та розраховані значення ефективного рівня деформації. Під заданими слід розуміти значення, визначені з рівняння (8). Під розрахованими – визначені за формулою (9). Оскільки задані та розраховані значення практично збігаються, то для того, щоб оцінити похибку, яка виникає при заміні розрахункового рівняння наближеною формулою (9), на рис. 5 представлена залежність різниці заданих та розрахованих значень ефективного рівня деформації (вона позначена як δ) від комплексу умов контактування.

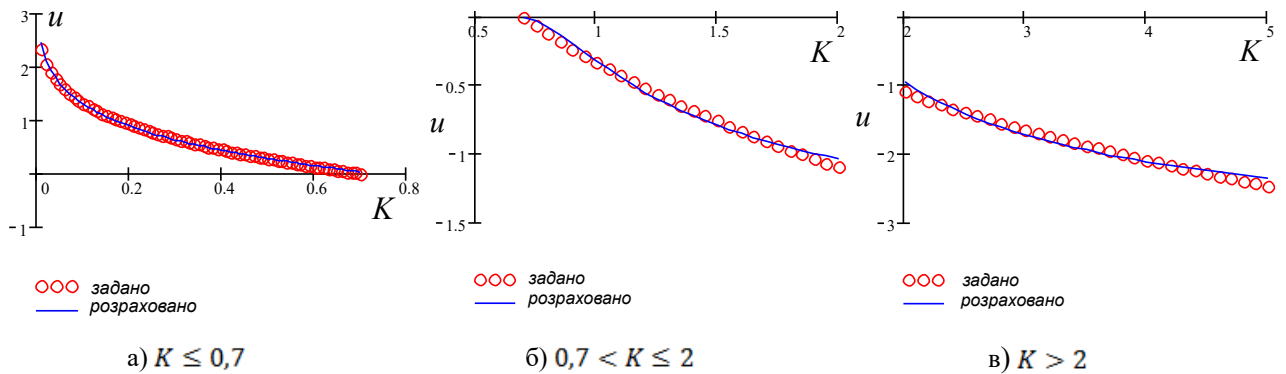


Рис. 4. Співставлення заданих та розрахованих значень ефективного рівня деформації

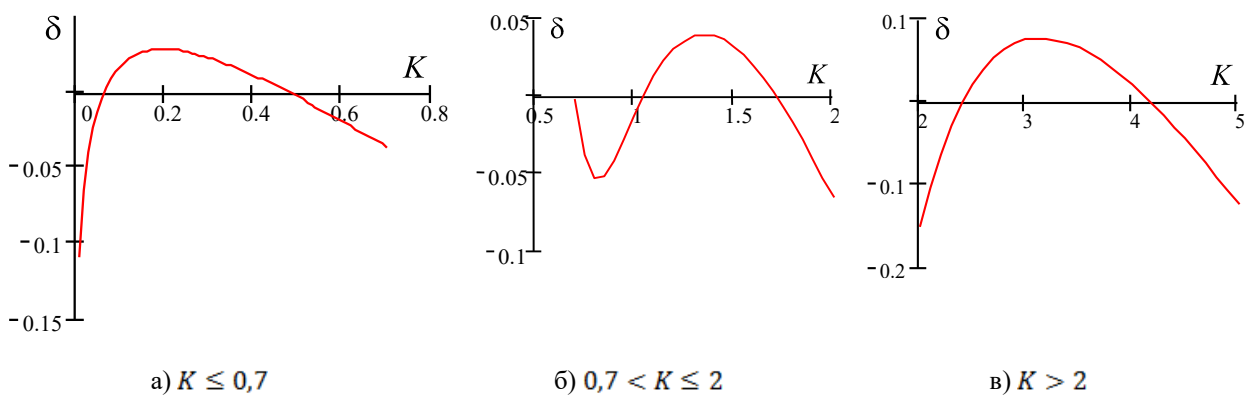


Рис. 5. Оцінка похибки, яка виникає при заміні точного рівняння розрахунку ефективного рівня деформації наближеною формулою (9)

Висновки

Із використанням моделювання шорстких спряжених поверхонь ущільнення стохастичним полем було розроблено метод розрахунку ефективного рівня деформації контактуючих поверхонь циліндро-поршневих ущільнень [1].

Для розрахунку ефективного рівня деформації отримано рівняння

$$1 - \exp(-K) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0, \quad (10)$$

на підставі якого виведена розрахункова формула:

$$u = \begin{cases} -7,890 + 4,453 \ln(5,562 - C), & (K \leq 0,7); \\ -2,089 \exp[-(0,620 + C)^{-1,302}], & (0,7 < K \leq 2); \\ -4,522 \exp[-(-0,062 + C)^{-0,967}], & (2 < K \leq 5) \end{cases} \quad (11)$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою ефективного рівня деформації різняться не більше, ніж на 0,11 при $K \leq 0,7$, 0,065 - при $0,7 < K \leq 2$ та не більше, ніж на 0,15 при $2 < K \leq 5$.

Література

1. Тимошук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмасувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. ... канд. техн. наук / О.Г.Тимошук – Хмельницький, 2003. – 386 с.
2. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. Полная кривизна, главные кривизны и отношение главных кривизн в вершинах микронеровностей. Удельная площадь гауссовской поверхности и удельный объем зазора // Трение и износ. – 1980. – № 5. – С. 815 – 823.
3. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей / теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
4. Соколан К.С. Розробка на основі теорії стохастичних процесів методу розрахунку коефіцієнту тертя ковзання беззмасувальних поршневих ущільнень. Дис. ... канд. техн. наук. – Хмельницький, 2001. – 204 с.

References

1. Timoshchuk O.G. Development of methods for calculation and experimental study of the tightness of non-lubricating cylinder-piston seals: dis. ... Cand. tech. Sciences / O.G. Timoshchuk – Khmelnytsky, 2003. – 386 p.
2. Semenyuk N.F., Sirenko G.A. Description of the topography of anisotropic rough friction surfaces using a random field model. Total curvature, principal curvatures, and ratio of principal curvatures at the vertices of microroughnesses. Specific area of the Gaussian surface and the specific volume of the gap // Friction and wear. – 1980. – № 5. – P. 815 – 823.
3. Husu A.P., Wittenberg J.R., Palmov V.A. Surface roughness / theoretical-probabilistic approach. – M.: Nauka, 1975. – 344 p.
4. Sokolan K.S. Development on the basis of the theory of stochastic processes of a method of calculation of coefficient of sliding friction of non-lubricating piston consolidations. Dis. ... cand. tech. Science. – Khmelnytsky, 2001. – 204 p.

Надійшла / Paper received : 12.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.