

## ПРОЦЕСИ

---

УДК 681.62

### АНАЛІЗ ЯВИЩ У ЗОНІ КОНТАКТУ ФРИКЦІЙНОЇ ПАРИ КОЧЕННЯ

Я. І. Чехман, А. І. Шустикевич

Українська академія друкарства  
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

*Розглянуто явища, які виникають у процесі перекочування фрикційної пари і проілюстровано їх вплив на експлуатаційні характеристики виробничих систем. Проаналізовано процес створення напружено-деформованого стану у матеріалі облицювання валика та його трансформацію у процесі обертання пари. Наведено методику розрахунку передаточного відношення фрикційної пари.*

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, фрикційна пара, передаточне відношення, крутний момент, відносне ковзання, погонне навантаження, сила тертя, зони ковзання і зчеплення, деформація оболонки валика.

**Постановка проблеми.** Розглядається фрикційна пара кочення, в якій облицювання веденого валика практично не стискується. Такі пари широко використовуються у поліграфічних машинах – фарбових апаратах друкарських машин, друкарських апаратах машин глибокого друку, різноманітних системах протягування паперу, картону, тканини, плівки тощо.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Попри наявність численних публікацій [1, 2, 3, 4, 5], явища у контактній зоні фрикційної пари залишаються ще далеко не розкритими, чому й досі відсутні науково-обґрунтовані рекомендації з розрахунку технологічних та енергетичних параметрів.

**Мета статті** – спроба проаналізувати процес створення напружено-деформованого стану в матеріалі облицювання валика та його трансформацію у процесі обертання фрикційної пари.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Подальше викладення матеріалу ґрунтується на припущеннях:

- а) матеріал облицювання валика не стискується;
- б) з'єднання матеріалу облицювання з сердечником нерозривне;
- в) близько торцеві зони деформації не розглядаються.

Характерними матеріалами облицювання валика є гума і поліуретан.

Для підтвердження правомірності приведених нижче викладок наводимо результати проведеного нами раніше експериментального дослідження [6] конкретної фрикційної пари, в яких дана констатація результатів без достатнього аналізу явищ в зоні контакту.

Тензометричними засобами на експериментальному стенді була досліджена фрикційна пара, що мала такі параметри: діаметр ведучого сталевого циліндра – 116 мм, діаметр валика – 70 мм, товщина поліуретанового покриття – 20 мм, його твердість – 30 одиниць Шора, довжина контакту – 200 мм. Частота обертання циліндра не змінювалась і становила 1,5 об/с.

Для кожного дискретно створюваного погонного навантаження у фрикційній парі (в діапазоні  $q = 0 \dots 1$  (кН/м)) реєструвались крутні моменти на вході:

- $M_{пр.с}$  – при сухих поверхнях циліндра і валика;
- $M_{пр.ф}$  – при поверхнях покритих чорною друкарською фарбою, товщиною 30 мкм;
- $M_{г.с}$  – при сухих поверхнях фрикційної пари і загальмованому (нерухомому) валику;
- $M_{г.ф}$  – при покритих фарбою поверхнях і загальмованому валику;
- $M_{г.м}$  – при змазаних поверхнях солідолом (мастило циліндрове 38 ГОСТ 6311-76).

Отримані залежності представлені у вигляді графіків на рис. 1. Тут же представлено теоретично підрахований графік крутних моментів від тертя в опорах фрикційної пари залежно від погонного навантаження ( $M_{тр} = f(q)$ ).

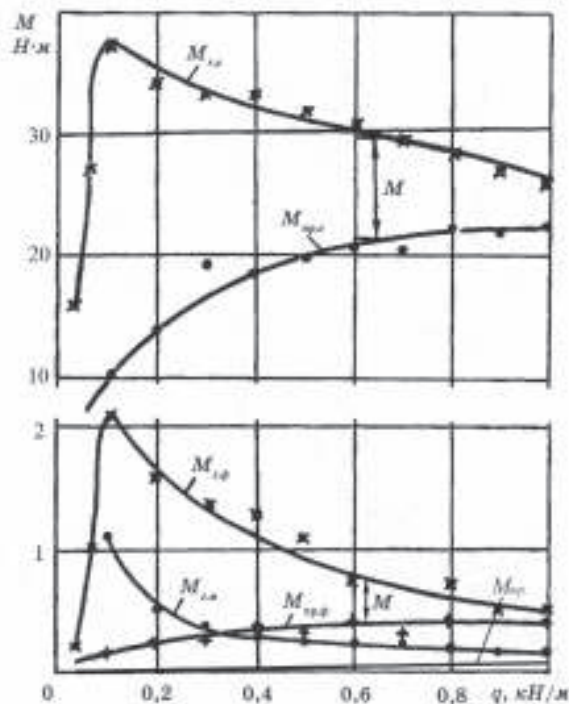


Рис. 1. Графіки крутних моментів фрикційної пари

Роботі фрикційної пари передує створення попередньо-напруженого стану шляхом зближення циліндричних тіл. Величина цього зближення визначає картину напружено-деформованого стану оболонки валика. Можна виділити три інтервали такого зближення:

1. В період 1-го інтервалу внаслідок деформації оболонки відбувається збільшення периметру зони контакту через видавлювання матеріалу валика у ближньозональний простір. При цьому відносне ковзання контактуючих поверхонь відсутнє. В цей період фрикційний зв'язок у парі збільшується пропо-

рційно створюваному зусиллю, на певній стадії досягаючи свого максимуму. При цьому потенційна сила тертя у зоні контакту при роботі фрикційної пари може забезпечити передачу найбільшого крутного моменту.

2. Другий інтервал деформацій характеризується утворенням по лінії контакту двох зон ковзання ( $a'_k$  і  $a''_k$ , рис. 2), які створюються внаслідок того, що внутрішні сили міжмолекулярного зчеплення при деформації матеріалу оболонки визначають зусилля видавлювання, що перевищують сили тертя на цих зонах. При збільшенні навантаження у фрикційній парі зони ковзання зростають, а зона зчеплення зменшується. Відповідно зменшується величина крутного моменту, який може передати фрикційна пара (через зону зчеплення). А оскільки момент передається через тертя у зоні зчеплення, то величина такого моменту пропорційна коефіцієнту тертя ковзання у контактній парі. Це наглядно демонструють графіки граничного крутного моменту:  $M_{г.с}$  – при сухих поверхнях контактної пари,  $M_{г.ф}$  – при наявності фарби,  $M_{г.м}$  – при змащенні солідолом.

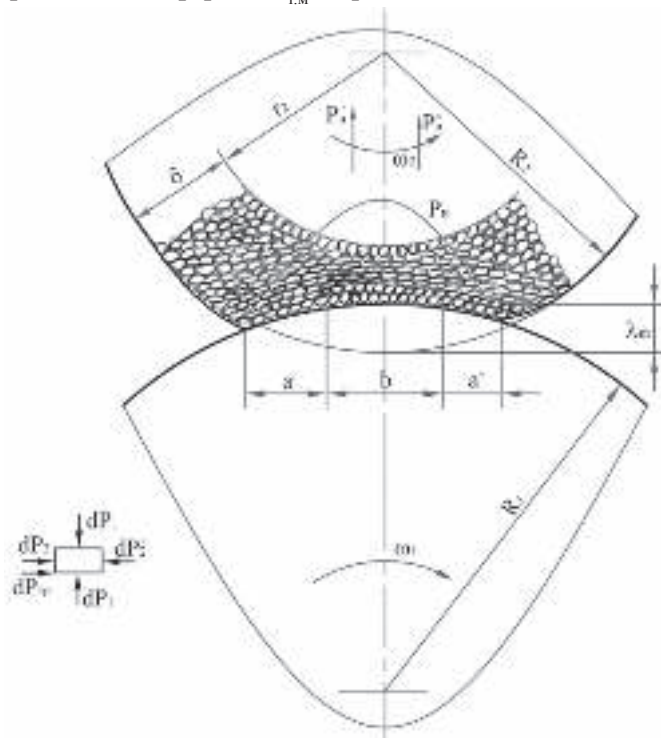


Рис. 2. Зона контакту фрикційної пари

Отже, зростання навантаження у фрикційній парі призводить до зменшення зони зчеплення і, відповідно, знижує можливість фрикційної пари передати крутний момент, величина якого визначається різницею моментів  $M = M_{г.с} - M_{пр.с}$ , а також  $M = M_{г.ф} - M_{пр.ф}$ , залежно від коефіцієнту тертя у зоні контакту (рис. 1).

При цьому слід зауважити, що при збільшенні навантаженні зона зчеплення зменшується інтенсивніше у випадку зменшення тертя ковзання у зоні кон-

такту. Це підтверджується не однаковим співвідношенням граничних моментів  $M_{г.с} : M_{г.ф}$  і  $M_{г.с} : M_{г.м}$  при зростанні навантаження ( $q$ ).

3. Третій етап настає при такому зближенні об'єктів фрикційної пари, при якому зона зчеплення уже зменшується настільки, що передача моменту не відбувається – проходить пробуксовування. Настає воно скоріше чи пізніше залежно від величини моменту опору. Враховуючи мізерні моменти опору ( $M_{тр}$  – від сил тертя в опорах валика) залежності  $M_{г.с}$  і  $M_{пр.с}$  та  $M_{г.ф}$  і  $M_{пр.ф}$  (рис. 1) перетнуться при  $q > 1$  (кН/м).

Таким чином, створений попередньо-напружений стан у зоні контакту (у процесі налагодження) визначає основні характеристики фрикційної пари – величину передаваного моменту, передатне відношення і споживану на перекочування енергію.

Розглянемо картину явищ напружено-деформованого стану у зоні контакту фрикційної пари у русі, тобто у динамічних умовах. На рис. 2 зображена (у перерізі) зона контакту фрикційної пари, на якій елементарні частини умовно зображені у вигляді zdeформованих кружечків. Там же позначені зона зчеплення ( $b$ ) і дві зони ковзання ( $a'$  і  $a''$ ), а також геометричні параметри фрикційної пари.

За умови нестискуваності матеріалу оболонки валика, при усталеній швидкості обертання, вся маса його покриття повинна пройти через щілину (розташовану в міжцентровій площині) розміром  $R_2 - \lambda_{max} - r_2$ . Внаслідок цього поворот валика зменшиться на додатковий кут ( $\varphi_d$ ), що залежатиме від додаткового об'єму ( $V_d$ ), який змінюватиметься пропорційно максимальній деформації ( $\lambda_m$ ) оболонки валика. Отже, додатковий об'єм маси становитиме:

$$V_{\bar{a}} = \pi \left[ R_2^2 - (R_2 - \lambda_m)^2 \right] \cdot 1. \quad (1)$$

Проходження цього додаткового об'єму ( $V_d$ ) виразимо через додатковий кут  $\varphi_d$

$$V_{\bar{a}} = \left[ (R_2 - \lambda_m)^2 - r_2^2 \right] \cdot \frac{\varphi_{\bar{a}}}{2} \cdot 1. \quad (2)$$

Прирівнюючи (1) і (2), знайдемо додатковий кут

$$\varphi_{\bar{a}} = \frac{2\pi \left[ R_2^2 - (R_2 - \lambda_m)^2 \right] \cdot 1}{\left[ (R_2 - \lambda_m)^2 - r_2^2 \right] \cdot 1}. \quad (3)$$

Тоді передатне відношення фрикційної пари

$$\begin{aligned} u &= \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{2\pi}{2\pi - \varphi_{\bar{a}}} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{2\pi}{2\pi - \frac{2\pi \left[ R_2^2 - (R_2 - \lambda_m)^2 \right]}{\left[ (R_2 - \lambda_m)^2 - r_2^2 \right]}} = \\ &= \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{R_2^2 - (R_2 - \lambda_m)^2}{\left[ (R_2 - \lambda_m)^2 - r_2^2 \right]}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Виразивши максимальну деформацію через відносну ( $\lambda_m = \varepsilon_m \times \delta$ ) і  $r_2 = R_2 - \delta$ , вираз (4) набуде вигляду:

$$u = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{(2R_2 - \delta \cdot \varepsilon_m) \delta \cdot \varepsilon_m}{\delta \cdot \varepsilon_m (\delta \cdot \varepsilon_m - 2R_2) + (2R_2 - \delta) \delta}} \quad (5)$$

Для описаної вище експериментальної фрикційної пари з параметрами  $R_1 = 58$  мм,  $R_2 = 35$  мм і  $\delta = 20$  мм залежність зміни передатного відношення (в %) від відносної деформації ( $u = f(\varepsilon_m)$ ) проілюстрована графіками на рис. 3. Тут же представлена графічна залежність (крива 2) сумарного проковзування  $s$  (мм) поверхні валика за період одного оберту циліндра [ $s = (u_{\Sigma m} - u_\theta) \cdot R_2$ ], як функції відносної деформації.

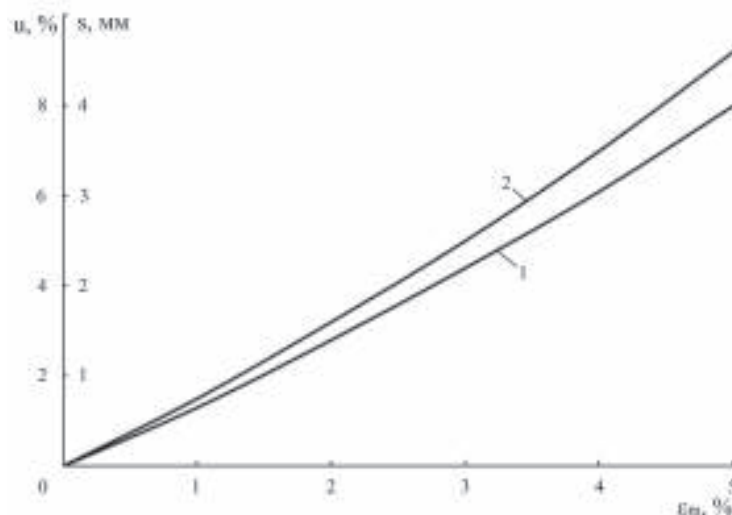


Рис. 3. Залежності передатного відношення (крива 1) і величини проковзування за цикл (крива 2) від відносної деформації оболонки валика

Відносне проковзування у зоні контакту фрикційної пари може суттєво впливати на технологічний процес і технічну характеристику об'єкта. Наприклад, у фарбових апаратах друкарських машин валики, як правило, контактують з двома ведучими циліндрами. Неоднакові деформації оболонки валика у двох зонах контакту обумовлюють в одній із них відносне зміщення поверхонь. Це один з факторів того, що фарбовий апарат є найбільш енергозатратною системою друкарської машини. Регулюванням величини деформації у двох зонах контакту забезпечують не проковзування накочувального валика відносно друкарської форми.

Далі з'ясуємо що ж відбувається при деформації оболонки валика у процесі обертання фрикційної пари. Передача енергії циліндром через тертя у зоні зчеплення супроводжується видавлюванням маси валика на вході контакту (рис. 2, ділянка а'). Внаслідок цього на цій ділянці відбувається зміщення поверхневої маси валика відносно поверхні циліндра в сторону протилежну до обертання.

ня циліндра. Величина цього зміщення змінюється від нуля (на початку зони зчеплення) до максимуму у початковій точці контакту. Сили тертя при цьому зміщенні спрямовані протилежно до обертання циліндра. Аналогічне явище відбувається і на вихідній ділянці ковзання. Тут хоч сили тертя і спрямовані в бік швидкості циліндра, але сприймаються валиком, який приводиться від циліндра. Отже, сили тертя у зонах ковзання визначають основні затрати енергії на перекочування фрикційної пари. Це підтверджує велика різниця приводних моментів ( $M_{\text{пр.ф}}$  та  $M_{\text{пр.с}}$ ) і моментів від сил тертя в опорах ( $M_{\text{тр}}$ ) (рис. 1).

Сили тертя на ділянках ковзання (відповідно і енергозатрати) пропорційні коефіцієнту тертя між контактуючими поверхнями. Про це наглядно свідчать графіки приводних моментів при сухих поверхнях фрикційної пари ( $M_{\text{пр.с}}$ ) і змащених фарбою ( $M_{\text{пр.ф}}$ ). При цьому інтенсивність зростання приводних моментів зі збільшенням погонного навантаження зменшується. Це пояснюється тим, що збільшення  $q$  супроводжується заповільненим зростанням деформації  $\lambda_m$ , внаслідок чого і зменшується робота від сил тертя у зонах проковзування.

Зі збільшенням навантаження у фрикційній парі збільшуються зони ковзання і затрати енергії зростають. Відповідно зменшується зона зчеплення, через яку забезпечується передача крутного моменту. Найбільше значення граничного моменту, який може передати фрикційна пара відповідає найбільшій зоні зчеплення, що утворюється у початковій фазі навантаження  $q$ . Для нашої конкретної експериментальної пари ця початкова фаза навантаження, як для сухих, так і для змащених фарбою чи солідолом поверхонь (див. криві  $M_{\text{г.с}}$ ,  $M_{\text{г.ф}}$ ,  $M_{\text{г.м}}$  на рис. 2) становить  $q \cong 0,1$  кН/м.

У зв'язку з викладеним слід зауважити, що для фрикційної пари з поліуретановим, гумовим та іншим подібним покриттям, на відміну від металевих циліндричних тіл, для підрахунку приводного моменту використання залежності  $M_{\text{пр}} = kP$  (де  $k$  – коефіцієнт перекочування) не допустимо. На величину  $M_{\text{пр}}$  впливатиме різниця складових нормальної сили ( $P_{\text{н}}' - P_{\text{н}}''$ , рис. 2) на вхідній і вихідній ділянках зони контакту, яка залежатиме від характеристик пружно-в'язкого матеріалу і швидкості обертання фрикційної пари. Для дослідженої нами конкретної фрикційної пари цього впливу практично не виявлено.

**Висновки.** Розшифровані явища, що супроводжуються деформаціями пружно-в'язкого матеріалу оболонки валика у процесі створення і перекочування фрикційної пари, проілюстровано їх вплив на експлуатаційні характеристики виробничих систем. Отримані результати можуть служити черговим етапом для більш повного дослідження контакту фрикційної пари і опрацювання практичних рекомендацій.

#### Список використаних джерел

1. Алексеев Г. А., Ярема С. М. Применение метода фотоупругости в полиграфии: [Монография]. – К.: Вища школа, 1994. – 138 с.
2. Балабан О. Г. Исследование механики печатного контакта в офсетной глубокой печати // Тр. ВНИИполиграфии. – М.: 1981. – Т. 31. – Вып. 3.

3. Тир К. В. Фрикционное вращение жесткого цилиндра с тонкой эластичной крышкой // Полиграфия и издательское дело. – Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1964, № 1. – С. 95–103.
4. Шаблий О. Н., Зарецкий В. И. Оптимальное управление напряженно-деформированным состоянием упруговязкой цилиндрической оболочки // Прикладная механика. – 1981. – Т. 17, № 7. – С.42–47.
5. Ярема С. М. Механіка контактної взаємодії фрикційних пар кочення поліграфічних систем: [Монографія]. – К.: УАД, Університет “Україна”, 2006. – 404 с.
6. Чехман Я. І. та ін. Друкарське устаткування: Підручник / Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. – Львів: УАД, 2005. – 468 с.

### References

1. Alekseev G. A., Jarema S. M. (1994). Primenenie metoda fotouprugosti v poligrafii: [Monografija]. – K.: Vishha shkola,– 138 s. (in Russian)
2. Balaban O. G. (1981). Issledovanie mehaniki pechatnogo kontakta v ofsetnoj glubokoj pechati // Tr. VNIpoligrafii. – M.– T. 31. – Выр. 3. (in Russian)
3. Тир К. В. (1964). Фрикционное вращение жесткого цилиндра с тонкой эластичной крышкой // Полиграфия и издательское дело. – Л’вов: Изд-во Л’вов. ун-та, № 1. – С. 95–103. (in Russian)
4. Shabliij O. N., Zareckij V. I. (1981). Optimal’noe upravlenie naprjazhenno-deformirovannym sostojaniem uprugovjazkoj cilindricheskoj obolochki // Prikladnaja mehanika. — T. 17, № 7. – S.42–47. (in Russian)
5. Yarema S. M. (2006). Mekhanika kontaktnoyi vzayemodiyi fryktsiynykh par kochennya polihrafichnykh system: [Monohrafiya]. – K.: UAD, Universytet “Ukrayina”,– 404 s.(in Ukrainain)
6. Chekhman Ya. I. ta in. (2005). Drukars’ke ustatkuvannya: Pidruchnyk / Ya. I. Chekhman, V. T. Senkus’, V. P. Didych, V. O. Bosak. – L’viv: UAD– 468 s.(in Ukrainian)

### ANALISIS OF PHENOMENA IN CONTACT AREA OF ROLLING FRICTION PAIR

Ya.I. Chekhman, A.I. Shustykevych

*Ukrainian Academy of Printing.*

*19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine*

*shandiv@yandex.ua*

*The article describes the phenomena that occur in the process of friction pair rolling and it illustrates their impact on the performance features of production systems. The process of creating the stress-strain condition of the material facing the roller and its transformation during the rotation of the pair has been analyzed. The method of calculating gear ratio of the friction pair has been presented.*

**Keywords:** *stress-strain condition, friction pair, gear ratio, torque, relative sliding, linear load, friction, slip and grip zone, deformation of a roller surface.*

*Стаття надійшла до редакції 12.09.2016.*

*Received 12.09.2016*