

УДК 621.01

ОЦІНКА СПРАЦЮВАННЯ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ КУЛАЧКІВ ТА РОЛИКІВ ПРЕСОВИХ ПРИВІДНИХ МЕХАНІЗМІВ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Я. О. ШАХБАЗОВ¹, В. В. ШИРОКОВ¹, О. Ю. ЧЕТЕРБУХ¹, Х. Б. ВАСИЛІВ²,
О. Б. ГАСІЙ³, О. В. МЕЛЬНИКОВ⁴, О. В. БІЛОУС⁵

¹ Українська академія друкарства, Львів;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Національний лісотехнічний університет України, Львів;

⁴ IT STEP Університет, Львів;

⁵ Національний університет "Львівська політехніка"

Наведено методику аналітичного розрахунку спрацювання елементів силових механізмів технологічного обладнання. Встановлено найменше спрацювання контактних кулачків і роликів приводу натискної плити плоскоштанцювального преса за закону періодичного руху "Синусоїдне пришвидшення (симетрична тахограма)", яке для кулачка становить $h_1 = 7,9 \cdot 10^{-5}$ м, а для ролика $h_2 = 7,72 \cdot 10^{-4}$ м.

Ключові слова: силові механізми, закон періодичного руху, плоскоштанцювальний прес, експериментальні та аналітичні дослідження.

The method of analytical calculation of the elements wear in power mechanisms of technological equipment is presented. It was established that the lowest wear of the contact cams and rollers of the pressure plate drive of the flat punching press is observed during the periodic movement "Sinusoidal acceleration (symmetric tachogram)" and is for the cam $h_1 = 7.9 \cdot 10^{-5}$ m and for the roller $h_2 = 7.72 \cdot 10^{-4}$ m.

Keywords: power mechanisms, the law of periodic motion, flat punching press, experimental and analytical studies.

Вступ. Привідні силові механізми з кулачків і роликів часто застосовують у технологічному обладнанні, зокрема штанцювальному, для виготовлення картонних пакувань. За формою робочих контактних поверхонь його класифікують як плоске, плоскоциліндрове та ротаційне. Найуживаніше плоске, яке високопродуктивне (до 8000 примірників розгортки картонних пакувань за годину), забезпечує найвищу якість продукції і менш витратне виготовлення штанцювальної форми (у 25–50 разів дешевше, аніж ротаційне). Однак головний його недолік – значні технологічні зусилля у приводних механізмах кулачків і роликів [1].

Оскільки до штанцювального устаткування висувають жорсткі вимоги щодо точності технологічних операцій і переміщення виконавчих елементів конструкції, то особливо важливо дослідити деформації та спрацювання, які спричиняють зміну геометричних розмірів і форми контактуючих деталей. Привід натискної плити містить виконавчі деталі, які переміщуються та контактують, в результаті чого між ними виникає тертя і, як наслідок, – спрацювання.

Аналіз останніх досліджень. Спрацювання змінює задану форму і геометричні розміри деталей, знижує їх надійність та довговічність, що впливає на продуктивність устаткування та якість виготовленої продукції. Найбільшого спрацю-

вання деталі зазнають у результаті фрикційної втоми, тобто внаслідок тертя, коли між ними виникають зазори, а також зростають контактні і втомні напруження, через що знижується ресурс їх роботи. Щоб уникнути передчасних поломок деталей, використовують різні аналітичні розрахунки, за результатами яких раціонально обирають матеріал, технологію виготовлення та спосіб оброблення [2–7].

Виконані дослідження [2] з моделювання ступеня спрацювання робочих поверхонь деталей за допомогою алгоритму багатофакторної системи та матриці планування експерименту. Побудовано залежність втрати маси захисних покриттів під час відповідних технологій зміцнення від режимів навантаження, тиску в зонах контактного трибоз'єднання та циклу навантаження. Описано особливості різних видів спрацювання зубчастих пар редукторів штангових свердловинних насосних установок [3]. Запропоновано методи попередження їх виникнення та встановлено прогнозований термін нормальної роботи механізму.

Класифіковано відмови редукторів верстатів-гойдалок внаслідок спрацювання та поломки і встановлено причини їх виникнення [4]. Вивчено вплив борування та хромування на тривкість до спрацювання контактних робочих поверхонь деталей із залізвуглецевих сталей в агресивному середовищі [5]. Встановлено, що борування її підвищує, оскільки зростає твердість поверхневих шарів, через що вдається в 3–4 рази збільшити час напрацювання деталей до відмови [6].

Кількісно оцінено залежність інтенсивності спрацювання деталей від параметрів поверхневого шару після різних способів механічного оброблення [7]. Виявлено, що стійкість до спрацювання знижується після шліфування та підвищується у 2–5 разів після накочування. Визначено [2–7] інтенсивність спрацювання контактних робочих поверхонь деталей залежно від способу механічної та хіміко-термічної обробки, але без урахування фізико-механічних моделей спрацювання за фрикційного втомного навантаження.

Для підвищення ресурсу роботи деталей рекомендують механічне оброблення, яке ґрунтується на зміні напрямку вектора швидкості різання під час чистових операцій відносно його напрямку під час попередніх чорнових [8]. Після такого оброблення ресурс роботи деталей пар тертя збільшується на 40...50%, а залишкові напруження у поверхневих шарах деталей знижуються у 10 разів.

Мета дослідження – аналітично оцінити спрацювання контактних робочих поверхонь деталей пресових привідних механізмів за періодичного навантаження.

Метод випроб. Під час аналітичних досліджень ступеня спрацювання контактних робочих поверхонь кулачків та роликів використали різні закони періодичного руху (ЗПР) [9]. Плоскоштанцювальний прес (див. рисунок) складається із плоскоштанцювальної форми 1, закріпленої на верхній нерухомій плиті 2; рухомої натискної плити 3, яка переміщається вздовж вертикальних нерухомих напрямних 4, 4', 5, 5'; розклинювальних важелів 6, 6', 7, 7', шарнірно з'єднаних однією стороною з плитою 3, а іншою – з повзунами 8, 8', 9, 9', що переміщуються по горизонтальних нерухомих напрямних 10, 10'; роликів 11, 11', 12, 12', які постійно контактують з кулачками 13, 13' за допомогою пружин стиску 14, 14'; приводного вала 15, на якому зафіксовані кулачки.

Оскільки у приводі натискної плити виконавчими елементами є ролики та кулачки, то їх спрацювання безпосередньо впливає на надійну та якісну роботу всього преса. Тому досліджували ступінь спрацювання їх контактних поверхонь [10]. Для кулачків:

$$h_1 = 2 \cdot 2 \cdot i_{h1} \cdot a \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot \frac{V_1 \cdot 30}{\pi \cdot R_{\max}} \cdot T_w, \quad (1)$$

для роликів:

$$h_2 = 2 \cdot i_{h2} \cdot a \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_2} \cdot \frac{V_1 \cdot 30}{\pi \cdot r} \cdot T_w, \quad (2)$$

де $i_{h1,2}$ – інтенсивність спрацювання контактних робочих поверхонь кулачків та роликів, відповідно; $V_{1,2}$ – швидкості їх точок, відповідно; a – півширина контактної площини між кулачком і роликом; $R_{\max}$ – радіус-вектор кулачка за найбільших зусиль; T_w – час, для якого розраховували спрацювання контактних поверхонь.

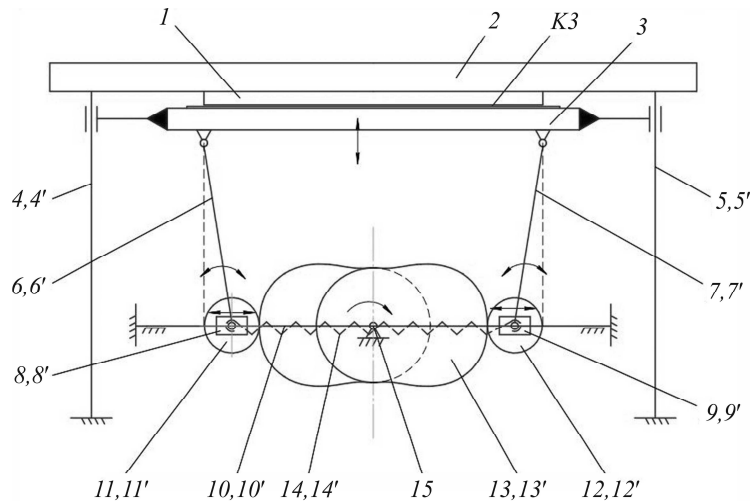


Схема плоскоштанцювального преса.

A scheme of the flat punching press.

Швидкість точок робочої поверхні кулачка

$$V_1 = \frac{\pi \cdot n_K \cdot R}{30}, \quad (3)$$

а ролика

$$V_2 = V_1 \cdot \xi_V, \quad (4)$$

де $\xi_V = 0,98$ – відносна втрата швидкості.

Інтенсивність

$$i_{h1,2} = \frac{6 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta^{2/5}}{N_{1,2}} \cdot \left[\frac{p_{c1,2} \cdot (1 - \mu^2)^2}{E} \right]^{1/5}, \quad (5)$$

де Δ – параметр шорсткості контактної робочої поверхні; $N_{1,2}$ – кількість циклів до руйнування матеріалу кулачка та ролика, відповідно, а $p_{c1,2}$ – тиск на них. Оскільки для сталей модуль пружності $E \approx 2,1 \cdot 10^5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\mu \approx 0,3$, вводимо відповідні змінні в рівняння (5):

$$i_{h1,2} = \frac{6 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta^{2/5}}{N_{1,2}} \cdot p_{c1,2}^{1/5} \cdot k_i, \quad (6)$$

де $k_i = 0,083$ – коефіцієнт, який враховує ці параметри.

Кількість циклів до руйнування

$$N_{1,2} = \left(\frac{\sigma_{B1,2}}{k' \cdot f_{\min} \cdot p_r} \right)^t, \quad (7)$$

де k' – коефіцієнт, який для пружних матеріалів рівний 3, а для крихких становить 5; $f_{\min}$ – мінімально можливе значення коефіцієнта тертя ролика по поверхні кулачка; p_r – середній тиск у місці контакту кулачка та ролика, який відповідає значенню $f_{\min}$.

Середній тиск у місці контакту кулачка та ролика

$$p_r = v(v-1) \cdot k_1 \cdot \left[\frac{\tau_0 \cdot (v+1) \cdot E}{(1-\mu^2) \cdot \alpha_{ef}} \right]^{0,5}, \quad (8)$$

де v – параметр кривої опорної поверхні, а k_1 – стала інтегрування, яка залежить від нього; τ_0 – фрикційна характеристика, яка залежить від умов роботи; α_{ef} – коефіцієнт гістерезисних втрат під час кочення мікронерівності, що залежить від напруженого стану в зоні контакту.

З рівняння (8) отримуємо спрощений вираз

$$p_r = v(v-1) \cdot k_p \cdot k_1 \cdot \left[\frac{\tau_0 \cdot (v+1)}{\alpha_{ef}} \right]^{0,5}, \quad (9)$$

де коефіцієнт $k_p = 480,38$ враховує модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ та показник степеня 0,5 для сталей.

Значення $f_{\min}$ залежить від фізико-механічних характеристик матеріалів (α , μ , E) та параметрів середовища (τ_0 , β), в якому вони взаємодіють:

$$f_{\min} = \frac{\tau_0^{0,5} \cdot \alpha_{ef}^{0,5} \cdot (1-\mu^2)^{0,5}}{E^{0,5}} + \beta, \quad (10)$$

де β – фрикційна характеристика, яка залежить від умов роботи.

Спрощений вираз (10) з відповідним коефіцієнтом має вигляд

$$f_{\min} = \tau_0^{0,5} \cdot \alpha_{ef}^{0,5} \cdot k_f + \beta, \quad (11)$$

де $k_f = 2,91 \cdot 10^{-3}$.

Звідси

$$\beta = f_m - \frac{2,4 \cdot \tau_0 \cdot (1-\mu^2)^{0,8}}{p_{c1}^{1/5} \cdot \delta^{0,4} \cdot E^{0,8}}, \quad (12)$$

або

$$\beta = f_m - \frac{\tau_0}{p_{c1}^{1/5} \cdot \Delta^{0,4}} \cdot k_\beta, \quad (13)$$

де $k_\beta = 1,23 \cdot 10^{-4}$ – коефіцієнт для сталей, який враховує модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ , число 2,4 та показник степеня 0,8.

Фрикційна характеристика

$$\tau_0 = \frac{\delta \cdot f_m}{k_0 \cdot \left(p_{c1}^{1/(2\nu+1)} - p_{c2}^{1/(2\nu+1)} \right)}, \quad (14)$$

де

$$k_0 = 0,4 \cdot \left[\frac{\nu(\nu-1) \cdot k_1 \cdot \delta^{0,5} \cdot (5E)^{\frac{1}{2\nu+1}}}{1-\mu^2} \right]^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}. \quad (15)$$

Тиск на кулачку та ролику

$$p_{c1,2} = \frac{0,125 \cdot \sigma_{B1,2} \cdot a_{HB}}{\delta^2} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot \tau_{n1,2}}{\sigma_{B1,2} \cdot a_{HB}} \right)^2, \quad (16)$$

де a_{HB} – твердість їх контактної робочої поверхні.

Розрахувати молекулярний складник коефіцієнта тертя можна за виразом

$$f_m = f_K - \frac{0,67 \cdot [(1-\mu^2) \cdot (\sigma_B \cdot a_{HB})]}{E}, \quad (17)$$

або

$$f_m = f_K - \sigma_B \cdot a_{HB} \cdot k_{fm}, \quad (18)$$

де $k_{fm} = 2,9 \cdot 10^{-6}$ – коефіцієнт для сталей, який враховує модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ та число 0,67.

Результати та їх обговорення. Досліджували спрацювання кулачків та роликів приводу натискної плити плоскоштанцювального преса за таких ЗПР: синусоїдне пришвидшення (симетрична тахограма), степеневі закони Саввіна – 2,9 і 2,12, рівноспадне пришвидшення (симетрична тахограма), косинусоїдне пришвидшення (симетрична тахограма), закон Стоддарта (степенева функція шосто-го степеня) [7, 10].

Враховуючи рекомендації для кулачкового механізму, використали такі матеріали: для роликів – сталь 40; для кулачків – сталь 38ХС. Під час досліджень задавали такі параметри: найбільший радіус-вектор кулачків $R_k = 0,35$ м; радіус роликів $r = 0,05$ м; частота обертання кулачка $n_k = 58,33$ min⁻¹; коефіцієнт тертя кочення загартованої сталі по загартованій $f = 0,01$. Також для кулачків приймали: границю міцності за розтягу $\sigma_{B1} = 930$ МПа; твердість загартованого матеріалу 555 НВ; для роликів: границю міцності $\sigma_{B2} = 570$ МПа; твердість загартованого матеріалу 400 НВ.

Вважали [9], що параметри кривої опорної поверхні ν і b для твердшого елемента становлять, відповідно, 1,5 та 0,6; параметр контактно-фрикційної втоми $t = 1,3$; радіуси кривизни вершин мікронерівностей контактуючої поверхні твердшого елемента для поперечного напрямку $R_{trans} = 50$ μm, для поздовжнього $R_{long} = 120$ μm; максимальна шорсткість контактуючої робочої поверхні твердшого елемента $R_{max} = 9,37$ μm, що відповідає шорсткості оброблення $R_a = 1,25$ μm.

Аналітичні дослідження виконували за умови, що плоскоштанцювальний прес працює в одну зміну (8 h) упродовж трьох років (в одному році – 255 робочих змін), а його деталі пройшли термін припрацювання. Розрахункові результати наведено у таблиці.

Результати аналітичного дослідження

Закон періодичного руху	Товщина спрацювання	
	кулачка h_1 , m	ролика h_2 , m
Синусоїдне пришвидшення (симетрична тахограма)	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$7,72 \cdot 10^{-4}$
Степеневий закон Саввіна – 2,9	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$9,57 \cdot 10^{-4}$
Степеневий закон Саввіна – 2,12	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
Рівноспадне пришвидшення (симетрична тахограма)	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
Косинусоїдне пришвидшення (симетрична тахограма)	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$
Закон Стоддарта (степенева функція шостого степеня)	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$

ВИСНОВКИ

Спрогнозовано спрацювання контактних робочих поверхонь кулачків та роликів – виконавчих елементів приводу натискної плити плоскоштанцювального преса залежно від обраного матеріалу та ЗПР вихідної ланки, що дає змогу уникнути надмірного спрацювання, яке викликати змїну форми та геометричних розмірів кулачків і роликів, погіршення якості виготовлення продукції тощо. За заданих параметрів приводу найменше спрацювання контактних робочих поверхонь встановлено за ЗПР “Синусоїдне пришвидження (симетрична тахограма)”, а найбільше – за ЗПР “Рівноспадне пришвидження (симетрична тахограма)” та “Закон Стоддарта (степенева функція шостого степеня)”.

1. Регей І. І. Споживче картонне пакування: матеріали, проектування, обладнання для виготовлення. – Львів: УАД, 2011. – 142 с.
2. Моделювання ступеня спрацювання робочих поверхонь деталей за допомогою алгоритму багатофакторної системи і матриці планування експерименту / О. Г. Чернета, Б. П. Серета, В. І. Кубич, М. А. Очеретяний, М. В. Скороход // Математичне моделювання. – 2022. – № 2 (47). – С. 76–81.
3. Прогнозування спрацювання деталей редукторів верстатів-гойдалок / Б. В. Копей, О. І. Стефанишин, О. В. Євчук, В. В. Лопатін // Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ-друк, 2010. – Вип. 53. – С. 42–58.
4. Копей Б. В., Стефанишин О. І. Аналіз спрацювання деталей редукторів верстатів-гойдалок // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 1 (30). – С. 108–114.
5. Некоз О. І., Ястреба С. П., Шуляк С. О. Підвищення довговічності деталей пресів для відтиснення олії // Наук. пр. НУХТ. – 2014. – № 42. – С. 88–91.
6. Некоз О. І., Ястреба С. П., Шуляк С. О. Дослідження зношування матеріалів олійних пресів // Обладнання та технологія харчових виробів. Тематичний зб. наук. пр. ДонНУЕТ ім. Туган-Барановського. – 2009. – № 20. – С. 39–43.
7. Кіницький Я. Т. Теорія машин і механізмів. – К.: Наук. думка, 2002. – 664 с.
8. Evaluation of residual stresses during mechanical treatment of machine parts / Y. O. Shakhbazov, V. V. Shyrokov, O. Y. Cheterbukh, I. M. Griner, K. B. Vasylyv, and O. V. Melnykov // Materials Science. – 2023. – 58, № 5. – P. 686–692.
9. Патент 151852, Україна: МПК В26F 1/40. Прес штанцювального автомата / О. Ю. Четербух, Я. О. Шахбазов. – Опубл. 21.09.2022; Бюл. № 38.
10. Полюдов О. М. Механіка поліграфічних і пакувальних машин. – Львів: УАД, 2005. – 178 с.

Одержано 15.04.2024