

УДК 629.341

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.46

ЩОДО ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ВАЛІВ ВЕРХНЬОЇ ПІДТРИМКИ ПЕЧІ ОФЛЮСУВАННЯ ОКАТИШІВ

Зіборов К. А.¹, Федоряченко С. О.¹, Чеботарьов С. В.², Холодов А. П.³

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

²ПрАТ «Полтавський ГЗК»

³Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті наведено результати дослідження умов роботи валів верхньої підтримки печі металургійного виробництва. Методом скінченних елементів розраховано тепловий режим роботи деталі та визначено абсолютні значення теплового розширення за умови примусового охолодження. Для визначення режимів охолодження проводились експериментальні випробування системи охолодження. За результатами опрацювання температурних режимів роботи наголошено на достатності теплових зазорів у підшипникових вузлах і режимах роботи підшипників кочення. З метою обґрунтування робочих характеристик підшипникових вузлів проведено дослідження ефективності системи змащування та консистентної змазки.

Ключові слова: металургійне виробництво, вал верхньої підтримки піч-решітки, підшипниковий вузол, температурний режим, охолодження.

Вступ

Створення економічних високопродуктивних машин і агрегатів високої надійності та довговічності – основна мета перспективного розвитку промислових підприємств за умови значного скорочення сфери застосування ручної, малокваліфікованої та важкої фізичної праці. Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат (компанія *Ferrexpo*) – виробник та експортер залізородних окатишів, що застосовуються в чорній металургії та виробництві сталі.

Ferrexpo планує до 2030 р. досягти до 50 % скорочення обсягу викидів вуглецю в І та II категоріях на тону виробленої залізородної продукції порівняно з базовим 2019 р. Ключовим кроком для зниження вуглецевих викидів на підприємствах компанії є збільшення виробництва залізородних окатишів прямого відновлення – DR-окатишів.

Транспортування сирих окатишів на металургійні заводи неможливе без їх попереднього зміцнення [1, 2]. З метою підвищення міцності сирих окатишів їх піддають випалу на конвеєрних випалювальних машинах і комбінованих транспортувальних установках типу «решітка – піч – охолоджувач» (рис. 1).

Тому виробниче обладнання, що працює в умовах фабрики з виробництва окатишів, має розраховуватися, зважаючи на наявність як характеристик робочого навантаження, що змінюються в часі, так і корозійно-

механічного зносу в процесі експлуатації, а також високих температурних технологічних режимів [2, 3].



Рис. 1. Фрагмент транспортувальної установки типу «решітка – піч – охолоджувач»

Це передбачає нові підходи в проектуванні для підвищення показників його працездатності.

Аналіз публікацій

Конструювання обладнання для випалення сирих окатишів загалом має проводитися з таким розрахунком, щоб кількість ланок і кінематичних пар була мінімальною, а зусилля між ними розподілялися рівномірно. У схемах має передбачатися додаткова рухливість елементів, необхідна для компенсації перекосів, зносу й теплових деформацій [4]. До того ж необхідно зводити до мінімуму

можливість небезпечних пошкоджень обладнання, наслідки яких повністю не усуваються. У цьому плані воно має задовольняти такі основні вимоги: у разі відмови в роботі окремих частин і вузлів не має виникати небезпека для обслуговувального персоналу або для інших машин технологічної лінії; конструкція вузлів має допускати можливість монтажу в неправильному положенні; вузли й агрегати мають забезпечувати його роботу в заданих умовах експлуатації. Недостатня надійність вузлів може бути підвищена збільшенням запасів міцності. Підвищенню надійності механізмів і систем управління сприяють застосування сучасних методів розрахунку та експериментальні дослідження. Інформаційні системи в проектуванні здебільшого застосовують для перевірки результатів розрахунків або визначення параметрів процесів, які складно знайти інженерними методами.

Вони передбачають для встановлення впливу різних факторів на експлуатаційні характеристики та визначення оптимальних конструктивних параметрів розроблення 3D-моделі технічного об'єкта, виконання МСЕ-розрахунку, що дає змогу скоригувати або обрати оптимальне конструктивне рішення та здійснити підбір матеріалів для його ланок, з огляду на умови експлуатації [5–7]. Дослідження впливу температурних режимів роботи обладнання для визначення можливої деформації та зміни фізико-механічних характеристик матеріалу, які впливають на показники надійності та працездатності, також є одним із завдань проектування обладнання металургійного виробництва.

Мета та постановка завдання

Мета роботи – експериментальне визначення робочих характеристик підшипникових вузлів валів верхньої підтримки печі офлюсування окатишів та 3D-МСЕ моделювання з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів і рекомендацій щодо змашування в процесі регламентних робіт.

3D-МСЕ моделювання робочого навантаження підшипникових вузлів валів верхньої підтримки

На підприємствах Полтавського ГЗК, як було зазначено раніше, сушіння й попереднє нагрівання окатишів здійснюється на колосникових решітках машинами зміцнювально-відновного випалу. Верхні опорні вали

(рис. 2) підтримують конвеєрний ланцюг решітки машини для випалу, коли вона рухається від хвостового до головного вала. Рівновіддалені порожнисті вали монтуються в підшипникових вузлах, що розміщені на значній відстані один від одного та зазнають значного впливу несприятливих умов роботи (рис. 3).



Рис. 2. Вали верхньої підтримки печі офлюсування окатишів

Усі опорні вали (рис. 2) треба змонтувати й підтримувати перпендикулярно до осьової лінії прямокутника, утвореного правильно вивіреними головним і хвостовим валами ланцюгової решітки, що рухається. При робочому процесі вони піддаються значним впливам температури, що може призвести до температурних деформацій та зміни початкової геометрії розташування як елементів з'єднання, так і параметрів підшипникових вузлів.

Точність монтажу валів підтримки, непаралельність геометричних осей щодо одна одної та головного й хвостового валів, непаралельність і різновисотність опорних вузлів, можлива температурна кривизна й загальний стан інших вузлів машини вимагають недосяжної на практиці ідеальності, тому проектні (розрахункові) терміни служби підшипникових вузлів машини зміцнювально-відновлювального випалу значно відрізняються від реальних.



Рис. 3. Виробничі умови експлуатації підшипникових вузлів

У роботі [4] визначено, що вали верхньої підтримки працюють в умовах граничних температурних режимів, за яких відбуваються процеси зміни фізико-механічних властивостей матеріалу. Крім цього, також змінюються геометричні розміри валів, що впливає на працездатність конструктивно пов'язаних з ними деталей і вузлів. Розглянути такі питання та ввести відповідні корективи в конструкцію ланок машини можливо з допомогою використання методів інжинірингу та реінжинірингу. Для цього до створеної 3D-моделі змодельовані умови нагрівання та охолодження відповідного вала, як це відбувається в реальних виробничих умовах. Визначення температур валів, зокрема температури поверхні вала, відбувалося за допомогою ПЗ *Ansys R18.1*, а для визначення розподілу температурного потоку й параметрів теплової деформації – модуль *Stady-State Thermal* [5–7].

Для найбільш термонавантаженого вала (ВВП № 28) визначено величину його теплового розширення Δ за умови коефіцієнта температурного розширення сталі 15X28 $\alpha=11 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ (рис. 4.):

- 1) у разі втрати охолоджувального повітря всередині вала $\Delta=29,5$ мм;
- 2) якщо втрата повітря на вході ВВП $\Delta=30,6$ мм;
- 3) за відсутньої втрати повітря відповідно до проведених вимірювань $\Delta=28,5$ мм.

Зазор теплового розширення, що наразі (за рекомендаціями розробника) встановлюється 20 мм, є недостатнім як за умови втрати повітря в системі охолодження валів (пошкодження ВВП чи порушення герметичності системи охолодження), так і в разі відсутності втрат повітря (новий ВВП, герметична система охолодження).

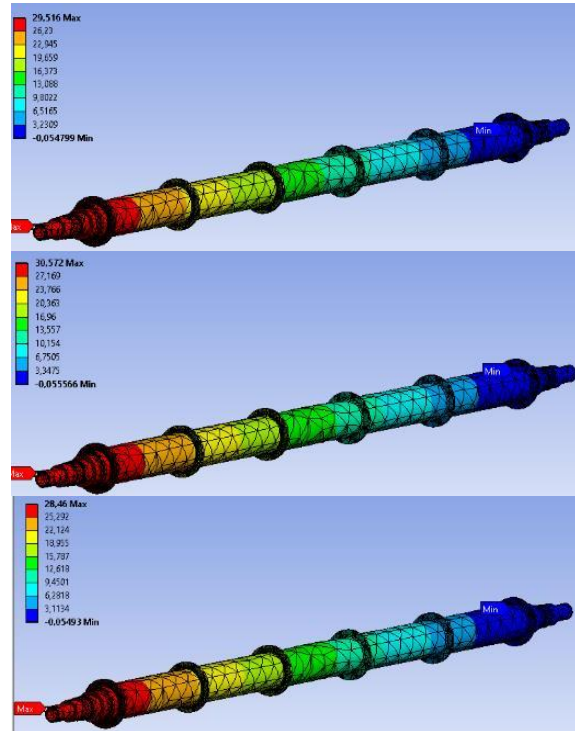


Рис. 4. Теплове розширення ВВП № 28 за умов: а – втрати повітря посередині вала; б – втрати повітря на вході вала; в – відсутності втрати повітря

Отримані показники теплової деформації можливо використовувати для обґрунтування величини необхідного осьового зазора підшипників підшипникових вузлів.

Умови використання матеріалів для обслуговування підшипникових вузлів

Серед основних причин передчасного виходу з ладу підшипників чи не основним є мастило. За оцінками різних виробників з усіх підшипників, які не відпрацювали свій ресурс сповна, через неправильне змащування передчасно вийшли з ладу від 33 до 55 % підшипників. Зупинка валів верхньої підтримки обумовлюється зокрема перегрівом підшипникових вузлів, у яких мастильний матеріал обуглюється та зупиняє вал (рис. 5).

Для підтвердження гіпотези виходу з ладу був отриманий зразок нової та відпрацьованої консистентної змазки «Уніол» для визна-

чення її фактичних фізико-хімічних характеристик. За технічними характеристиками «Уніол» має температуру краплепадіння 230 °С та навантаження зварювання – 23,23 кН, критичне навантаження 9,8 кН та індекс задирки 392.



Рис. 5. Демонтований підшипниковий вузол ВВП

Варто зазначити, що згідно з розрахунками максимальна температура на вихідному повітропроводі становить 203 °С, температура бугелів підшипникових вузлів близько 140 °С. З урахуванням похибок вимірювання, усередині підшипникового вузла температура

може становити приблизно 230 °С, що значно знижує трибологічні властивості змазки.

Для перевірки відповідності технічних характеристик змазки заявленим, було досліджено зразки нового мастила та відпрацьованого. Визначенню підлягали такі параметри: температура краплепадіння, навантаження зварювання, критичне навантаження, індекс задирки, температура початку коксування.

Температуру коксування мастила визначено для чотирьох температурних режимів: 150 °С, 200 °С, 250 °С, 300 °С (рис. 6).



Рис. 6. Зразки «Уніол» для визначення температури утворення коксу

Результати тесту наведено на рис. 7.



Рис. 7. Зразки «Уніол» для визначення температури утворення коксу

Відповідно до рис. 7 температура початку закоксування мастила становить 300 °С, що розміщена вище за температури експлуатації підшипникових вузлів ВВП.

Температура краплепадіння визначена на лабораторному пристрої «Крапля» (рис. 8). Установлена температура краплепадіння для чотирьох зразків становить 266 °С, 266 °С, 267 °С, 266 °С. Середнє значення $t_k = 266,25$ °С, що задовольняє технічним характеристикам «Уніол».

Трибологічні випробування проведено для зразка нової змазки та відпрацьованої.

Результати подані в табл. 1.

На певних режимах роботи підшипникового вузла зменшення показника критичного навантаження може призводити до руйнування масляної плівки та задирання матеріалу підшипників, підвищуючи сили тертя й зменшуючи ресурс підшипника.

Перед застосуванням консистентної змазки рекомендується виконувати вхідний контроль трибологічних характеристик на машині тертя для запобігання застосування мастила із незадовільними трибологічними характеристиками.

Таблиця 1 – Результати трибологічних випробувань

Параметр	Значення за технічними характеристиками	Нова змазка	Відпрацьована змазка	Зміна показника щодо паспортних даних (нова / відпрацьована змазка), %
Навантаження зварювання, кН	23,23	24,5	39,2	+5/+69
Критичне навантаження, кН	9,8	9,21	9,8	-6/0
Індекс задирки	392,0	352,0	470,0	-10/+20

Відповідно, рекомендовано застосовувати змазки, аналогічні *Agrinol Sliding GR* із паспортною температурою краплепадіння не нижче ніж 250 °С та із заявленим індексом задирки 440,0 за умови критичного навантаження 9,8 кН.

Для визначення терміну служби мастила (а значить інтервалів змащування), яка використовується в нормальних умовах, фахівці японської компанії *JTECT* (виробники підшипників *Koyo*) пропонують такий графік (див. рис. 8) [9].

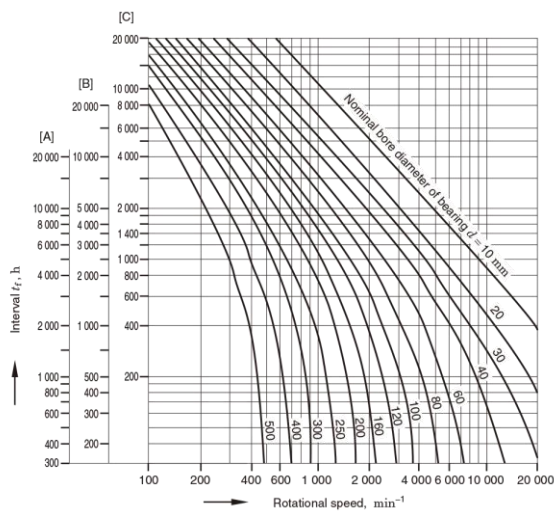


Рис. 8. Графік для визначення терміну служби мастила

В умовах виробництва необхідно також мати інформацію щодо кількості мастила – зважаючи на розміри підшипника й особливості їх експлуатації.

Об'єм вільного простору (см³) для первинного змащування в підшипнику визначається за такою формулою:

$$V = \frac{\pi}{4} B(D^2 - d^2) \cdot 10^{-3} - \frac{M}{7,8 \cdot 10^{-3}}$$

де B – ширина підшипника, мм; D – зовнішній діаметр, мм; d – внутрішній діаметр, мм; M – маса підшипника, кг.

Для обраного за інженерними розрахунками підшипника він становить 514 см³.

Якщо підшипник установлюється в корпус, мастилом заповнюється весь вільний простір усередині підшипника. У цьому разі вільний простір у корпусі заповнюється мастилом на 30–50 %, щоб у процесі запуску його надлишки могли витікати. Однак коли підшипник працює на низькій швидкості і є потреба в посиленому захисті від забруднення та корозії, рекомендується заповнювати внутрішній простір корпусу пластичним мастилом на 90 %. Також перед запуском підшипників на повній швидкості необхідно виконати приробіток – поступове збільшення швидкості обертання, починаючи з низької. Це дасть змогу мастилу рівномірно розподілитися в підшипниковому вузлі та запобігти різкому зростанню температури під час першого запуску.

Кількість мастила для повторного змащування підшипника, змонтованого в корпусі, залежить від методу змащування. Для підшипників, у яких передбачений канал під мастило на внутрішньому або зовнішньому кільці, кількість мастила для повторного змащування розраховується так:

$$G_p = 0,002 \cdot B \cdot D,$$

де G_p – кількість мастила, г; D – зовнішній діаметр підшипника, мм; B – загальна ширина підшипника, мм.

Для обраного за інженерними розрахунками підшипника вона становить 44,7 г.

Після трьох-п'яти поповнень мастило рекомендується повністю замінити. У цьому разі, перш ніж замінювати мастило на свіже, потрібно ретельно очистити корпус і підшипник від залишків старого мастила, промити розчинником і осушити.

Якщо доступ до вузла обмежений, але в корпусі є прес-маслянка і випускний отвір, можливо проводити заміну мастильного матеріалу без демонтажу вузла: під час роботи машини рівномірно й нешвидко вводити свіже мастило через прес-маслянку доти, доки свіже мастило не почне виводитися через випускний отвір.

Висновки

У роботі проведено аналіз умов експлуатації ланок механічної частини приводу печі офлюсування окатишів, що відрізняються високим зносом у важких режимах роботи.

Проведено інженерні розрахунки з визначенням показників надійності та працездатності ланок опорного вузла вала верхньої підтримки печі офлюсування окатишів. За допомогою 3D і МСЕ моделювання виконано розрахунок напружено-деформованого стану вала. Отримано значення деформацій цапфи вала. Для підшипникового вузла запропоновано технологічні прийоми, що дають змогу витримувати основні робочі характеристики в межах, установлених вимогами нормативно-технічної документації та необхідних для виконання функціонального завдання.

Література

1. Бережний М. М., Мовчан В. П. Збагачення та окускування сировини: монографія / під ред. М. М. Бережного. Дніпропетровськ: Пороги, 2002. 365 с.
2. Ishenko A., Rassokhin D., Kakareka D. The current experience of applying the composites in practicing the industrial equipment maintenance. *Metallurgical and Mining Industry*. 2018. № 2. С. 47–49.
3. Іщенко А. О., Какарека Д. Л. Визначення адгезійної міцності композитного матеріалу, який використовують для ремонту металургійного обладнання. *VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві»*: тези доповідей (Суми, 16–19 квітня 2019 г.). С. 133.
4. Розрахування ефективності системи охолодження валів верхньої підтримки із застосуванням методу скінчених елементів / С. О. Федоряченко та ін. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 99. С. 92–96.
5. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19 PDF/EPub.
6. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).
7. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).

8. DSTU ISO 76:2017 Вальницькі кочення. Статична вантажопідіймальність (ISO 76:2006, IDT). Київ: УкрНДНЦ, 2017.
9. Purpose and method of lubrication. URL: <https://koyo.jtekt.co.jp/en/support/bearing-knowledge/12-1000.html>.

References

1. Berezhnyi, M. M., Movchan, V. P. (2002) Zba-hachennia ta okuskuvannia syrovyny: monografi-ia / pid red. M. M. Berezhnoho. Dnipropetrovsk, 365 p.
2. Ishenko, A., Rassokhin, D., Kakareka, D. (2018) The current experience of applying the composites in practicing the industrial equipment maintenance. *Metallurgical and Mining Industry*, no. 2, pp. 47–49.
3. Ishchenko, A. O., Kakareka, D. L. (2019) Vyznachennia adheziinoi mitsnosti kompozytnoho materialu, yakyi vykorystovuiut dlia remontu metalurhiinoho obladnannia. *VI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsi-ia «Suchasni tekhnologii u promyslovomu vyrobnytstvi» tez. dokl.* (Sumy, 16–19 kvitnia 2019), pp. 133.
4. Fedoriachenko, S.O., Ziborov, K.A., Dzhur, R.V., Kholodov, A.P. (2022) Rozrakhuvannia efektyv-nosti sys-temy okholodzhennia valiv verkhnoi pidtrymky iz zastosuvanniam metodu skin-chenykh elementiv. *Visnyk KhNADU*, vyp. 99, pp. 92–96.
5. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19 PDF/EPub.
6. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).
7. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).
8. DSTU ISO 76:2017 Valnytsi kochennia. Statych-na vantazhopidiimnist (ISO 76:2006, IDT). Ky-iv, 2017
10. Purpose and method of lubrication. URL: <https://koyo.jtekt.co.jp/en/support/bearing-knowledge/12-1000.html>.

Зіборов Кирило Альбертович, канд. техн. наук, декан механіко-машинобудівного факультету НТУ «Дніпровська політехніка», ziborov.k.a@nmu.one, тел. +38 050-362-26-82.

Федоряченко Сергій Олександрович, канд. техн. наук, завідувач кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, НТУ «Дніпровська політехніка», fedoriachenko.s.o@nmu.one, тел. +38 050-988-08-49.

Чеботарьов Сергій Валентинович, директор з технічного обслуговування, ремонтів та енергетичного забезпечення, ПрАТ «Полтавський ГЗК», тел. +38 05348-7-43-60.

Холодов Антон Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин

ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
тел. +38050-20-63-644.

Concerning the justification of the working characteristics and construction parameters of the bearing assembly of the upper support of the pellet furnace shafts

Abstract. Problem. Metallurgical industry requires raw material for further steel production. One of the technological chain element is grid furnace, equipped with shafts, which hold the grid with raw product during heating. Insufficient cooling of the shafts provides the durability decrease and interruption of the technological process during the shafts' failure. The article presents the results of research into the working conditions of the upper support shafts of the metallurgical furnace.

Goal. The goal of the paper is to find the absolute thermal expansion of the shaft by means of thermal transient methods and identify the required bearing clearances to extend durability and reliability of the technological element. **Results.** Using the method of finite elements, the calculation of the thermal mode of operation of the part was carried out and the absolute values of thermal expansion under the condition of forced cooling were determined. **Originality.** Finite element analysis has been used to examine the necessity of bearing clearances correction as well as working regimes of steel construction. **Practical**

value. To determine the cooling modes, experimental tests of the cooling system were carried out. Based on the results of working out the temperature modes of operation, attention is focused on the sufficiency of thermal clearances in bearing units and the operating modes of rolling bearings. In order to substantiate the working characteristics of the bearing assemblies, experimental studies of the effectiveness of the lubrication system and consistent grease were conducted.

Key words: metallurgical production, shaft of the upper support of the furnace-grid, bearing unit, temperature mode, cooling.

Ziborov Kyrlo, Ph.D., Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Dnipro University of Technology, ziborov.k.a@nmu.one,
tel. +38 050-362-26-82.

Fedorichenko Serhii, Ph.D., associate professor of the Generative Design Department, Dnipro University of Technology, fedoriachenko.s.o@nmu.one,
tel. +38 050-988-08-49.

Chebotaarov Serhii, director of technical maintenance, repairs and energy supply, PJSC "Poltava GZK", tel. +38 05-348-7-43-60.

Kholodov Anton, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University,
tel. +38-050-206-36-44.
