

РОЗРАХУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВАЛІВ ВЕРХНЬОЇ ПІДТРИМКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

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

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

²ТОВ «Центр електромеханічної діагностики»

³Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті запропоновано методику розв'язання задачі із знаходження температурного режиму роботи валів верхньої підтримки піч-решітки за допомогою методу скінчених елементів. Так, використовуючи експериментально отримані значення витрати охолоджувального повітря в системі охолодження валів, розглянуто можливість використання модуля State Thermal ПЗ Ansys для багатоітераційного дослідження розподілу температури та визначення діапазонів теплового розширення. Запропонований метод дозволяє визначити ефективність роботи системи охолодження в широкому діапазоні змін параметрів витрати повітря та відповідність встановлених теплових зазорів підшипникових вузлів технічно необхідним.

Ключові слова: агломерат, металургійне виробництво, вали верхньої підтримки, температурне розширення, метод скінчених елементів, Steady-State Thermal.

Вступ

На підприємствах металургійного виробництва застосовується рухома піч-решітка, яка призначена для сушіння та попереднього нагрівання сирих окатишів з окису заліза та інших домішок до тих меж фізичної якості, які потрібні для подальшого оброблення у трубчастій печі.

У зоні сушіння низхідним потоком потік газу згідно з даними системи керування досягає температури вище 700°C та випаровує майже всю вологу, що використовується в утворенні сирих окатишів.

У роботі подано методи моделювання розподілу температури валів піч-решітки із застосуванням методу скінчених елементів, зокрема в програмі Ansys.

Аналіз публікацій

Під час здійснення інженерних розрахунків використовуються здебільшого інженерні методики із використанням довідкових фізико-механічних характеристик металів та проектних температур. Проте, у процесі робіт із модернізації відповідних технологічних ліній можливі відмінності проектних температур, параметрів системи охолодження тощо. Тому необхідно здійснити експериментальні вимірювання параметрів роботи системи та розрахувати теплові процеси відповідно до специфічних режимів роботи кожного вала верхньої підтримки піч-решітки.

Інформаційних систем у проектуванні в більшості випадків застосовують для перевірки результатів розрахування або визначення параметрів процесів, які складно знайти інженерними методами. Дослідження температурних режимів роботи з метою визначення зміни фізико-механічних характеристик [1] та структур, які виникають внаслідок дії високої температури [2], є однією із задач проектування обладнання металургійного виробництва.

Для застосування методу скінчених елементів під час розв'язання задач теплообміну необхідно визначити початкову температуру охолоджувального повітря на вході валів і на виході, а також значення тиску та втрати об'ємної витрати повітря між портами вимірювання (режим визначення різниці значень між вхідним повітропроводом та вихідним).

Відповідність значень об'ємних витрат охолоджувального повітря умовам експлуатації валів верхньої підтримки є одним із найважливіших факторів, які впливають на надійність і термін експлуатації валів.

Вимірювання швидкості та об'ємної витрати охолоджувального повітря здійснювалося згідно з вимогами експлуатаційних та нормативних документів [3–5].

Мета та постановка завдання

Метою дослідження є обґрунтування можливості розв'язання інженерних задач із дослідження температурного режиму роботи

валів верхньої підтримки піч-решітки методом скінчених елементів за змінних обсягів охолоджувального повітря та температур під-решітчастої області, базуючись на показниках експериментально визначених температур та параметрах теплопровідності деталей в умовах нелінійної залежності теплоємності охолоджувальних газів від температури та тиску.

Експериментальне визначення параметрів системи охолодження валів верхньої підтримки

Допускаючи, що на вали верхньої підтримки без вимірювальних портів значення об'ємних витрат лінійно зменшується залежно від віддаленості вала від головного колектора, використовуючи математичний апарат лінійного тренда, було розраховано значення витрат повітря на вході термонавантажених валів (рис. 1).

У випадку суттєвої різниці значень об'ємних витрат повітря між входом і виходом на деяких валах через наявність пошкоджень використати вищезазначений метод лінійного

тренда для розрахування витрат повітря на виході валів неможливо.

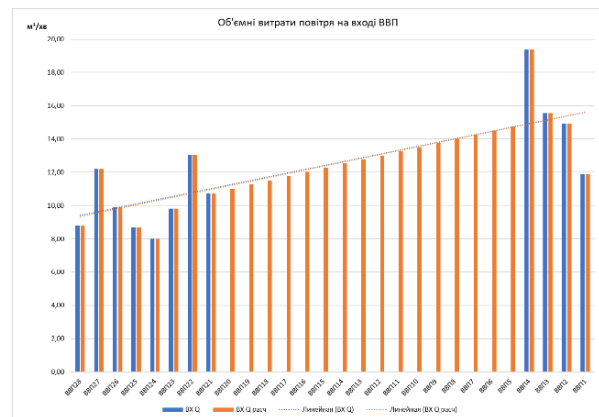


Рис. 1. Результати моделювання значень об'ємних витрат повітря на вході валів верхньої підтримки без вимірювальних отворів

Експериментальний розподіл потоків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розподіл потоку повітря охолодження між ВВП

№ВВП		28	27	26	25	24	23	22	21	4	3	2	1
Температура вхідного потоку охолоджувального повітря	$t_1, ^\circ\text{C}$	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
Температура вихідного потоку охолоджувального повітря	$t_2, ^\circ\text{C}$	181	178	202	203	184	175	175	175	93	105	116	90
Об'ємна витрата повітря (на вході),	$\text{м}^3/\text{хв}$	8,79	12,2	9,92	8,69	8	9,8	13,02	10,71	19,37	15,56	14,94	11,89
Об'ємна витрата повітря (на виході)	$\text{м}^3/\text{хв}$	6,53	12,08	5,98	*	7,91	9,58	11,93	5,8	19,2	14,73	8,81	11,76
Відносна різниця об'ємної витрати повітря	%	26	1	40	*	1	2	8	46	1	5	41	1

За результатами вимірювання об'ємних витрат охолоджувального повітря (таблиця 1) визначено наявність дефектів у валах №№ 28, 26, 21 і 2.

Отже, подальший розрахунок здійснено за параметрами витрати повітря на вхідному вимірювальному порту вала, а для валів, які мають суттєву втрату охолоджувального потоку відносно входу допускається, що витрата повітря здійснюється в середній площині вала, тобто в місці локалізації дефектів та свищів, а нагрівання повітря відбувається миттєво.

Потужність теплового потоку охолодження всередині вала:

$$Q = GC_p(T)(t_1 - t_2), \text{кВт} \quad (1)$$

де G – масова витрата повітря, $\text{кг}/\text{с}$; $C_p(T)$ – питома теплоємність повітря, $\text{кДж}/(\text{кг} \times \text{К})$; t_2 – температура на виході вала. (табл. 2.1); t_1 – температура на вході вала. (табл. 1).

$$G = V_o \rho(T) / 60 \quad (2)$$

де V_o – об'ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{хв}$; $\rho(T)$ – густина повітря залежно від температури, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Таблиця 2 – Потужність теплових потоків валів верхньої підтримки за показниками вхідного потоку

№ВВП		28	27	26	25	24	23	22	21	4	3	2	1
Потужність охолодження вала за вхідним потоком	Q, кВт	19,7 1		25,13					23,15			24,5	
Потужність охолодження вала за вихідним потоком	Q, кВт	14,6		15,2					12,5			13,1	
Потужність охолодження валів із незначною витратою повітря	Q, кВт		25,4		20,7	19,9	21,2	28,1		24,0	22,3		14,7

Для визначення температур валів, зокрема температури поверхні вала, було застосовано ПЗ Ansys R18.1, а для визначення розподілу температурного потоку та параметрів теплової деформації – модуль Stady-State Thermal для [8–10].

Моделювання здійснено для трьох схем розподілу повітря. Вали із відносною різницею витрати охолоджувального повітря 1–8 % (№№ 27, 25, 24, 23, 22, 4, 3, 1) охолоджуються потоком, потужність якого визначено за вхідною витратою повітря. Вали із відносною різницею витрати повітря 26–46 % (№ 28, 26, 21, 2) розраховуються для двох випадків:

- 1 витрата повітря на вхідному з'єднанні повітропроводу та вала;
- 2 витрата повітря в середній площині.

Для цього до 3D-моделі вала застосовано умови нагрівання (табл. 1–2) та потужності охолодження відповідного вала.

Результати розрахунку температури та теплового розширення валів №28, 26, 21, 4 у випадку втрати охолоджувального повітря на вході до валів наведені на рис. 2–4.

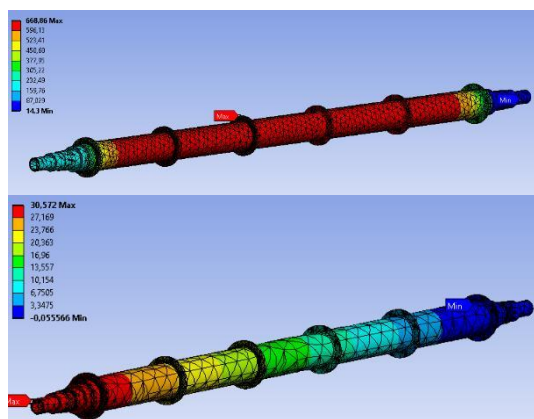


Рис. 2. Вал верхньої підтримки № 28: а – температурний режим; б – теплове розширення

Результати розрахунку ВВП № 28, 26, 21, 4 за умови втрати охолоджувального повітря всередині вала наведено на рис. 2.5–2.8.

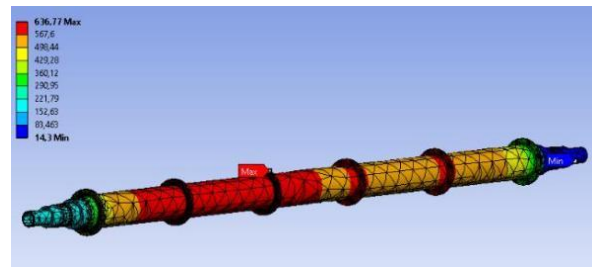


Рис. 3. Вал верхньої підтримки № 28. Температурний режим

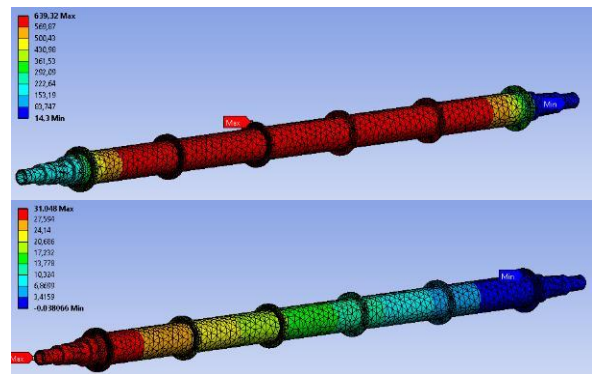


Рис. 4. Вал верхньої підтримки № 27: а – температурний режим; б – теплове розширення

Зменшення температур валів за умови втрати охолоджувального повітря обумовлюється збільшеною площею ефективного охолодження недефектної частини вала зі збільшеною поверхнею теплопередачі.

Незважаючи на це, наявність локальних дефектів знижує механічну міцність та є наслідком роботи вала в граничних температурних режимах.

Відповідно, одним із можливих способів діагностування технічного стану валів верхньої підтримки є контроль витрати повітря на вхідному та вихідному трубопроводах, а збільшення відносної різниці об'ємної витрати повітря у співвідношенні до обсягів витрати на вхідному повітропроводі > 10 % може бути індикатором втрати герметичності в системі подачі або розвитку дефектів всередині валів

гарячої секції. Для здійснення діагностики такого типу авторський колектив має необхідне обладнання та може у разі виробничої необхідності провести це дослідження.

Відповідно до отриманих результатів (відносна похибка 10 %) вали верхньої підтримки працюють в умовах граничних температурних режимів, за яких здійснюються процеси зміни фізико-механічних властивостей матеріалу.

Висновки

Під час вимірювання об'ємних витрат охолоджувального повітря в системі охолодження валів верхньої підтримки визначено різницю значень об'ємних витрат охолоджувального повітря, що використано для розрахування потужності потоку охолодження. Відповідно до отриманих результатів здійснених розрахунків та моделювання методом скінчених елементів визначено, що вали верхньої підтримки працюють в умовах граничних температурних режимів, за яких відбуваються процеси зміни фізико-механічних властивостей матеріалу. Відповідно до розрахованих показників температури визначено величину теплового розширення за нерівномірного прогрівання для обґрунтування величини необхідного осевого зазора підшипників буксових вузлів.

Визначено, що використання методу скінчених елементів дозволяє здійснити розрахування теплових режимів роботи валів із високою достовірністю отриманих результатів.

Література

1. Gariboldi, Elisabetta, and Stefano Spigarelli. 2021. "High-Temperature Behavior of Metals" *Metals* 11. No. 7: 1128. <https://doi.org/10.3390/met11071128>.
2. Tran Dinh Cuong, Nguyen Quang Hoc, and Anh D. Phan "Application of the statistical moment, method to melting properties of ternary alloys with FCC structure", *Journal of Applied Physics* 125. 215112 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5089228>.
3. «Трубки напірні модифікацій НДІОГАЗ та Піто. Інструкція з експлуатації. ПР 2.601.014 РС».
4. Мановакуумметр цифровий ММЦ-200. Інструкція з експлуатації.
5. «Прилад для вимірювання тиску та швидкості потоку TESTO 512. Посібник з експлуатації».
6. ДСТУ 8725:2017 «Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення швидкості та обсягу витрати газопилових потоків».
7. Batista Abreu, J.C., Vieira, L.M.C., Abu-Hamd, M.H. et al. Review: development of performance-based fire design for cold-formed steel. *Fire Sci Rev* 3, 1 (2014). [https://doi.org/10.1186/s40038-](https://doi.org/10.1186/s40038-014-0001-3GOST)

014-0001-3GOST 8050-64 Двоокис вуглецю газоподібний і рідкий. Технічні умови.

8. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19 PDF/EPub.
9. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).
10. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).

References

1. Gariboldi, Elisabetta, and Stefano Spigarelli. 2021. "High-Temperature Behavior of Metals" *Metals* 11. No. 7: 1128. <https://doi.org/10.3390/met11071128>.
2. Tran Dinh Cuong, Nguyen Quang Hoc, and Anh D. Phan "Application of the statistical moment, method to melting properties of ternary alloys with FCC structure", *Journal of Applied Physics* 125. 215112 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5089228>.
3. "Pressure tubes of NDIOGAZ and Pitot modifications. Operating Instructions. PR 2.601.014 CE".
4. Manovakuummeter digital MMC-200. Operating Instructions.
5. "Device for measuring pressure and flow rate TESTO 512. Operating manual".
6. DSTU 8725:2017 "Air quality. Stationary source emissions. Methods of determining the speed and volume of consumption of gas and dust flows".
7. Batista Abreu, J.C., Vieira, L.M.C., Abu-Hamd, M.H. et al. Review: development of performance-based fire design for cold-formed steel. *Fire Sci Rev* 3, 1 (2014). [https://doi.org/10.1186/s40038-](https://doi.org/10.1186/s40038-014-0001-3GOST)
8. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19 PDF/EPub.
9. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).
10. Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench by Yijun Liu and Xiaolin Chen (2014, Hardcover).

Федоряченко Сергій Олександрович, к.т.н., доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, НТУ «Дніпровська політехніка», fedoriachenko.s.o@nmu.one, тел.: +38 050-988-08-49,

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

Джур Роман Вікторович, директор ТОВ «Центр електромеханічної діагностики», cedgroup@ukr.net, +38 050-320-25-29,

Холодов Антон Павлович, к.т.н., доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, +380502063644.

Calculation of upper support shafts cooling system parameters by means of the finite element method

Abstract. Problem. The paper proposes a method for solving the problem of the temperature regimes of the upper support shafts using the finite element method. Thus, using the experimentally obtained values of the cooling air flow of the shafts, the possibility of using the State Thermal module of the Ansys software for a multi-iteration study of the temperature distribution and determining the ranges of thermal expansion was considered. It is an important task during engineering tasks solution. **Goal.** The goal of the paper is to develop a methodology to solve thermal exchange tasks using FEA methods based on the experiment research of the thermal processes. **Methodology.** Solution of the tasks involved application of the theoretical approach in order to build up multi-purpose solid models with the range of initial data to provide a simulation research. **Results.** The proposed method allows to determine the efficiency of the cooling system in a wide range of changes in air flow parameters and the compliance of the established thermal clearances of the bearing assemblies. **Originality.** Engineering tasks of the denoted area are rarely solved with FEA, especially thermal package. Thus, implementation of the software with experimental research kit allows in timely manner check the thermal state of the shafts and

indicate possible cooling air leaks at the very first stage to avoid time consuming technical service. **Practical value.** The use of the denoted methodology allows to adjust cooling system in terms of sufficient shaft thermal state of bearing clearances and keep updated cooling parameters to maneuver the main ventilation system.

Key words: agglomerate, metallurgical production, upper support shafts, temperature expansion, finite element method, Steady-State Thermal.

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

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

Dzhur Roman, director of the Center of Electromechanical Diagnostics LLC, cedgroup@ukr.net, +38 050-320-25-29,

Kholodov Anton, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, tel.: +38-050-2063644.
