

УДК 620.178.311

В. В. Поворотний¹, к.т.н., ORCID 0009-0000-9128-902X

Г. І. Толстіков¹, к.т.н., доц.

І. Г. Толстіков¹

О. О. Яйчук¹, ORCID 0009-0009-4034-4266

¹ *Український державний університет науки і технологій*

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЧАШ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ РІДКОГО ШЛАКУ

Анотація. Як відомо, в металургійних цехах доменного і сталеплавильного переділів, для зливу шлаку і його транспортування застосовуються шлаковози. Основною і найдорожчою частиною шлаковоза є чаша, що являє собою сталевий вилівок у вигляді товстостінної оболонки різної конфігурації. Нині в доменних цехах найбільшого поширення набули чаші об'ємом 16 м³, що базуються на рамах з лафетами і переміщуються за допомогою двовісних ходових візків залізничного типу. Разом з тим, на металургійних підприємствах почали впроваджувати шлаковози автомобільного типу, що перевозять одну чашу. Середній термін служби чаш незначний і в середньому він становить 500-1000 наливів залежно від хімічного складу шлаку, його температури і низки інших чинників. Основними причинами виходу з ладу шлакових чаш є зміни в процесі роботи їхньої форми, що виражаються в утворенні кільцевого або місцевого звуження в районі опорного кільця, а також поява поздовжніх і поперечних тріщин у стінках. Чаші автомобільного типу служать набагато менше через частий вихід з ладу цапф, за допомогою яких цапфа монтується на кузов шлаковоза. Вищевказані дефекти з'являються внаслідок циклічних теплових впливів, зумовлених природними технологічними процесами експлуатації шлаковозів. У суцільному тілі нерівномірне теплове розширення не може відбуватися вільно і спричиняє температурні напруження, які в поєднанні з механічними від зовнішніх сил можуть спричинити суттєві пластичні деформації, які спричиняють повне або прогресуюче руйнування конструкції. Знання величини і характеру розподілу термічних напружень необхідне для всебічного аналізу міцності конструкції, а глибокі дослідження термонапруженого стану чаш у процесі їхньої експлуатації дадуть змогу розробити й ухвалити інженерні рішення для збільшення їхнього ресурсу.

Ключові слова: шлакова чаша, температурне напруження, деформація, температура, термічний опір.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Посилання для цитування: Поворотній В. В., Толстіков Г. І., Толстіков І. Г., Яйчук О. О. Деякі особливості моделювання процесу дослідження термонапруженого стану чаш для перевезення рідкого шлаку. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 672-685. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-672-685>.

Вступ. Температурні напруження становлять великий практичний інтерес для металургійної промисловості. Боротьба за подальший розвиток металургії, за економію металу пов'язана з максимальним зменшенням браку чаш для перевезення рідкого шлаку через виникнення тріщин від температурних напружень та інших дефектів чаш, що виникають внаслідок температурних навантажень.

Прямий шлях побудови теорії температурних напружень для різних форм і конструкцій шлакових чаш полягав би в написанні рівнянь для пружної та пластичної зон і спільному розв'язанні цих рівнянь з урахуванням граничних умов. Однак для розв'язання цієї задачі на сьогоднішній день немає достатньої кількості даних ні про розподіл пружних напружень у стінках шлакових чаш, ні параметрів температурних навантажень на шлакову чашу в процесі наливання шлаку і його транспортування, ні розуміння зміни фізико-механічних властивостей у матеріалі чаші під час досягнення температури, за якої метал втрачає пружні властивості й температурні напруження починають розсіюватися.

Шлакові чаші, як йшлося вище, виходять з ладу внаслідок зміни форми (утворення кільцевого або місцевого звуження в районі опорного кільця (чаші на залізничному ході) і руйнування опорних цапф для чаш, що базуються на автомобільному ході), а також від появи тріщин у стінках. Зазначені дефекти з'являються внаслідок циклічного температурного впливу шлаку. Нерівномірне розширення, зумовлене високими температурами, спричиняє в стінці чаші температурні напруження, які, як самі по собі, так і в поєднанні з механічними напруженнями від зовнішніх сил спричиняють пластичні деформації. Змінні пружно-пластичні деформації призводять до термовипучування тонкостінних конструкцій, з'являються тріщини і відбувається руйнування. Повторний вплив високих температур викликає термічну втому стінок чаші.

З розвитком комп'ютерних технологій стали доступні методи досліджень, засновані на чисельних методах розв'язання диференціальних рівнянь. У сукупності з тривимірним моделюванням на практиці широко використовується метод кінцевих елементів. Однак алгоритм розв'язання статичної задачі, з використанням цього методу дослідження, і термічної задачі істотно відрізняються. Це

зумовлено значними температурними деформаціями досліджуваного об'єкта, а також наявністю межі контакту двох середовищ.

Методика дослідження. Задачі з визначення температурних напружень, що виникають у металевих конструкціях, є актуальними з кінця позаминого століття. Утворення температурних напружень спричинене тим, що окремі частини об'єкта, що нагрівається, не можуть змінювати свої розміри відповідно до температурних розширень. Під час нагрівання металу відбувається його розширення і збільшення об'єму. З ускладненням конструкції і нерівномірним температурним навантаженням, найбільш нагріті частини об'єкта розширюються сильніше, ніж менш нагріті. Це, своєю чергою, призводить до розтягування матеріалу всередині конструкції, що нагрівається [1].

Задачами з визначення температурних напружень у металургійному обладнанні та, відповідно, проблематикою підвищення їхньої термічної стійкості активно займалися співробітники кафедри теоретичної механіки Національної Металургійної академії України, а також ПКТИ ПАТ "Дніпроважмаш" [2].

Проводилися дослідження термонапруженого стану чаш для перевезення рідкого шлаку різних конструкцій з використанням тензометричного методу досліджень. Результати проведених досліджень свідчили про те, що температура поверхні чаші, в процесі її експлуатації, може досягати 500°C, а напруження, що виникають у конструкції, - в межах 120-150МПа.

При аналітичних методах розв'язання автори представляли шлакову чашу як тонкостінну оболонку обертання постійної товщини під дією зовнішніх контурних сил і температурного поля, розподілених симетрично відносно осі [2]. Застосовувалася така розрахункова схема. Ківш умовно розчленовували на три частини: верхню конічну, що відсікається на рівні упорів, середню конічну і нижню сферичну. До частин прикладали зовнішні зусилля з згинальними моментами, і задачу розв'язували з використанням рівнянь теорії пружності.

Результати виконаних робіт дають певну, але не повну картину термопружного стану шлакових чаш, проте становлять величезний інтерес з точки зору результатів експериментальних досліджень.

З розвитком електронно-обчислювальних машин для розв'язання задач механіки щодо досліджень напружено-деформованого стану різних пружних тіл стали застосовувати метод кінцевих елементів [3-8].

Так, у роботі [3] представлено порівняльні результати досліджень термонапруженого стану шлакових чаш вітчизняного та німецького

виробництв. У роботі показано, що максимальні напруження, які виникають у стінках чаші, становлять 200 МПа.

Дослідження термонапруженого стану чаш для перевезення рідкого шлаку також представлено в ряді робіт [4]. Авторами було проведено низку досліджень з визначення напружень у стінці чаші під час її заповнення шлаком. У результаті проведених досліджень зазначено значення максимальних напружень, що виникають у шлаковій чаші, представлено залежності температур, що виникають у стінці чаші, від часу, за якого розплавлений шлак перебуває в чаші. Представлено шляхи розв'язання задачі підвищення стійкості шлакових чаш під час їх інтенсивної експлуатації.

Визначення температурних напружень у пружному тілі вимагає використання кількох ключових формул, пов'язаних із термодиформациєю і законами теорії пружності. Нижче подано основоположні формули, необхідні для розрахунку температурних напружень.

Узагальнений закон Гука являє собою систему лінійних рівнянь, що пов'язують напруження і деформації в матеріалі. Він використовується для розрахунку напружено-деформованого стану в пружних матеріалах, з урахуванням як механічних навантажень, так і температурних впливів [9].

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} (\varepsilon_{kk} - 3\alpha \Delta T) + 2\mu (\varepsilon_{ij} - \alpha \Delta T \delta_{ij}), \quad (1)$$

σ_{ij} - компоненти тензора напружень; ε_{ij} - компоненти тензора деформацій; λ, μ - ламе коефіцієнти; δ_{ij} - символ Кронекера; α - коефіцієнт лінійного теплового розширення; ΔT - зміна температури.

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

Для розв'язання задачі термонапруженого стану шлакової чаші також можна скористатися рівняннями рівноваги. Диференціальні рівняння рівноваги в теорії пружності описують баланс сил у пружному тілі. Ці рівняння забезпечують умову, за якої внутрішні

напруження в тілі перебувають у рівновазі з прикладеними зовнішніми силами.

Для випадку температурних деформацій диференціальні рівняння рівноваги в переміщеннях можна узагальнити і представити в такому вигляді:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) \right] - \alpha \cdot \Delta T, \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_y - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_z) \right] - \alpha \cdot \Delta T, \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_z - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \right] - \alpha \cdot \Delta T, \quad (6)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ нормальні напруження, Па

У квазістатичній задачі термопружності не враховують ефекту зв'язаності температурного поля і поля деформацій, а також сили інерції, зумовлені нестационарним температурним полем, а час t відіграє роль параметра.

Перший етап розв'язання статичної та квазістатичної задач термопружності полягає у визначенні температурного поля T . Він зводиться до розв'язання рівняння:

$$\lambda \nabla^2 T - c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} + W = 0, \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; ρ – густина; W – інтенсивність джерел тепла, віднесених до одиниці об'єму.

Після розв'язання рівняння за певних теплових початкових і граничних умов визначається термопружний напружений стан. Граничні умови залежать від температурних умов експлуатації та конструкції досліджуваного об'єкта.

Відомий закон, що встановлює залежність між деформаціями і напруженнями, дає змогу одержати такий вираз, що пов'яже деформацію від термічного розширення з температурним напруженням:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot \Delta T, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; ΔT – різниця температур у зоні досліджень, °C; E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона.

Цей вираз дає змогу визначити напруження в досліджуваному об'єкті, за рівномірного його нагрівання стосовно плоского завдання. Для дослідження об'ємного термонапруженого стану з урахуванням прикладання до тіла зовнішніх сил використовувати вираз (8) не представляється можливим.

Визначення температурних напружень у тривимірному об'єкті являє собою складну задачу, для якої здебільшого аналітичне розв'язання неможливе з огляду на низку причин і вищевикладене. Також тривимірні об'єкти, до яких належить шлакова чаша, мають складну і неоднорідну геометрію. Як наслідок, у чаші формуватиметься неоднорідне температурне поле, що в сукупності з необхідністю розв'язування системи диференціальних рівнянь (рівняння рівноваги, сумісності деформацій та узагальнені закони Гука) у приватних похідних зводить задачу до розряду нерозв'язних.

Для розв'язання цього завдання оптимально підходить метод кінцевих елементів, як чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь на базі тривимірного комп'ютерного моделювання.

Вихідні данні та результати дослідження. Під час аналізу термонапруженого стану об'єктів, що зазнають термічного впливу, до яких належать шлакові чаші, необхідно враховувати низку умовностей.

Під час моделювання знаходження розплавленого шлаку в чаші, необхідно враховувати такі припущення:

1. Фізико-механічні параметри рідкого шлаку вважають постійними і такими, що не залежать від температури.
2. Фізико-механічні параметри матеріалу, з якого виготовлена шлакова чаша, змінюються залежно від температури.
3. На межі шлаку і чаші присутній температурний опір, що виникає внаслідок нанесення на чашу вапняного розчину.
4. Шлакова чаша і дзеркало шлаку контактує з навколишнім середовищем, унаслідок чого відбувається теплообмін.

На відміну від класичних кінцево-елементних розрахунків із визначення напружень і деформацій об'єкта, що виникають у пружній зоні, алгоритм аналізу температурних напружень дещо відрізняється. По-перше, для отримання температурних напружень необхідно визначити температурне поле, що виникає в досліджуваному об'єкті. Це свого роду прикладене навантаження на досліджуваний об'єкт, і в деяких випадках температурне поле викликає в конструкції більші за величиною напруги, ніж механічні зусилля.

Під час дослідження конструкцій, обладнання металургійних комбінатів, до яких відносяться шлакові чаші, виливниці, чавуновозні та сталевозні ковші, то в них необхідно враховувати температурний опір, що виникає між виробом і рідким середовищем. Так, на рис. 1 представлено заключний процес зливу рідкого шлаку зі шлаковозної чаші. На малюнку видно випадання кірки шлаку, що утворилася під час охолодження шлаку, і вступ його в реакції з внутрішнім футеруванням ковша. Ця "кірка" служить температурним опором, що захищає чашу від перегріву [10].



Рисунок 1 – Випадання гарнісажу зі шлакової чаші на автомобільному ході в процесі зливання шлаку

На рис. 2 представлено результати комп'ютерного моделювання динамічного температурного поля шлакової чаші в однаковий момент часу, що дорівнює 30-ти хвилинам після наливання за різних значень температурного опору чаші.

Як показує практика, під час експлуатації шлаковоза, шлак простоє в чаші залізничного шлаковоза в середньому 40-80 хвилин [2-4]. Таким чином температурне поле чаші буде динамічним і змінюватиметься в часі. Дослідним шляхом було встановлено, що температури стінки чаші, отримані під час експериментальних досліджень, представлених у роботах [2, 3], а також під час комп'ютерного моделювання, близькі за температурного опору між шлаком і чашею $4 \cdot 10^{-4}$ К/Вт (рис. 2 а).

З рисунка видно, що при зниженні температурного опору у 8 разів від заданого (рис. 2 г), максимальна температура чаші зростає на 167 °С, що становить 23% при 1800 секундах експлуатації чаші. При зниженні температурного опору до 10^{-4} К/Вт (рис. 2 в), максимальна температура чаші зростає на 140 °С, що становить 19,5%. У разі зниження температурного опору до $2 \cdot 10^{-4}$ К/Вт (рис. 2 б), - температура чаші зростає на 67 °С, що становить 9%.

Таким чином, показано, що температурний опір між шлаком і чашею безпосередньо впливає на характеристики температурного поля чаші, що, своєю чергою, призводить до певних значень температурних напружень.

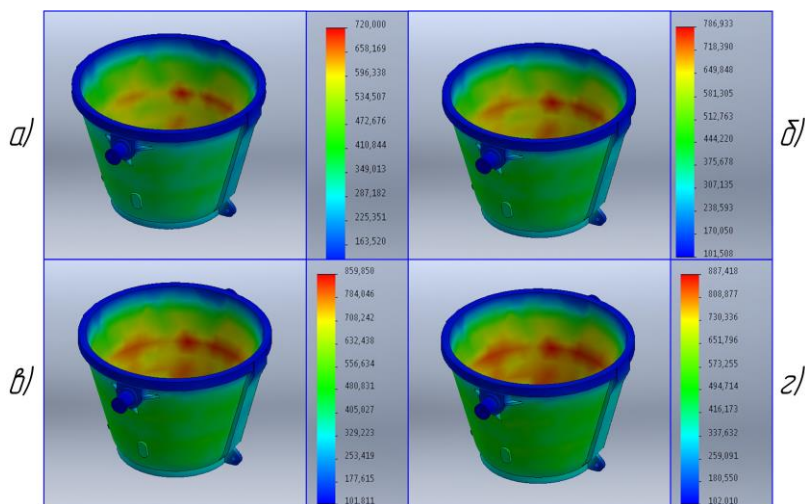


Рисунок 2 – Температурне поле шлакової чаші за різних температурних опорів: а) $4 \cdot 10^{-4}$ К/Вт; б) $2 \cdot 10^{-4}$ К/Вт; в) 10^{-4} К/Вт; г) $5 \cdot 10^{-5}$ К/Вт

Важливим фактором під час дослідження термонапруженого стану шлакових чаш є врахування залежності фізико-механічних параметрів матеріалу від температури (табл. 1). Так, на рис. 3 наведено результати дослідження термонапруженого стану шлакових чаш за температурозалежних параметрів матеріалу (рис. 3 а) і параметрів матеріалу при температурі 20 °С, зазначених у таблиці 1 (рис. 3 б).

З результатів досліджень, представлених на рисунку 3, випливає, що характер розподілу напружень у чашах має схожий характер. Значний перепад напружень для обох випадків спостерігається в зоні розташування дзеркала шлаку. Це явище добре піддається поясненню

виразом (8). За значного перепаду температур у стінці чаші, що якраз і відбувається в зонах розташування дзеркала шлаку, температурні напруження будуть тим більшими, чим більшою буде різниця температур.

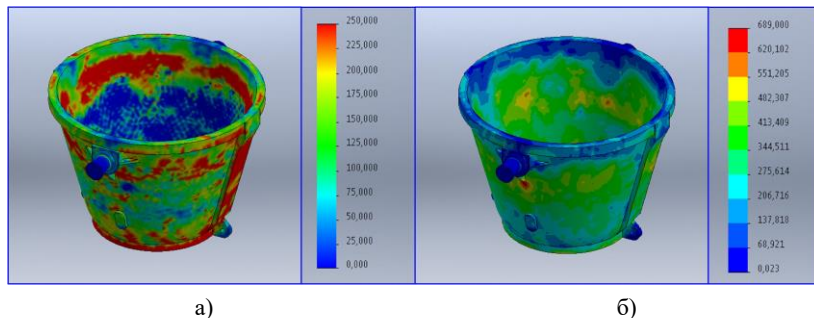


Рисунок 3 – Порівняння напружень (МПа) у шлакових чашах на автомобільному ході за різних умов задання матеріалу: а – температурозалежні параметри матеріалу; б – постійні параметри матеріалу за різних температур

Таблиця 1 – Залежність фізико-механічних параметрів чаші від температури

Температура, °С	Модуль пружності, 10 ⁵ МПа	Коефіцієнт теплового розширення, 10 ⁻⁶ (1/град)	Теплопровідність, Вт/(м·град)	Питома теплоємність, Дж/(кг·град)
Сталь 25Л ГОСТ 977-88				
20	1,98	11,5	52	400
100	1,96	12,2	51	470
200	1,91	13	49	483
300	1,86	13,7	46	500
400	1,63	14,3	43	521
500	–	14,7	40	571
600	–	15	36	–
700	–	15,2	32	–
800	–	–	26	–

Що ж стосується максимальних значень напружень, що виникають у стінці чаші, то їхні величини відрізняються більш ніж удвічі. Це можна пояснити, використавши теорію термічних напружень. Під час нагрівання металу виникають термічні напруження, зумовлені різницею температур. Більш нагріті шари, прагнуть розширитися і перебувають у стислому стані. Холодніші шари - зазнають розтягувальних зусиль. Якщо ці напруги не перевершують межі

пружності тіла, що нагрівається, то з вирівнюванням температури термічні напруги зникають.

Усі метали і сплави мають пружні властивості до певної температури. Для більшості марок сталі ця температура коливається в межах 450-500 °С. Вище за цю температуру метали і сплави переходять у пластичний стан, а термічні напруження, які виникли в них, викликають пластичну деформацію і зникають. Отже, температурні напруження повинні враховуватися під час нагрівання й охолодження сталі тільки в інтервалі температур від кімнатної до точки переходу цього металу з пружного стану в пластичний [11].

Таким чином, з огляду на те, що шлакова чаша в певних зонах нагрівається до температур, що перевищують 500 °С, а матеріал має постійне значення модуля пружності, отримані значення напружень суттєво відрізнятимуться від реальних, що й спостерігається на рис. 3.

Найголовнішою особливістю моделювання термонапруженого стану шлакових чаш, на думку авторів, є врахування значних температурних деформацій і, як наслідок, граничні умови. Під час визначення граничних умов, необхідно враховувати можливі значні розширення матеріалу. У разі жорсткої фіксації тривимірної моделі, результати моделювання можуть не відповідати реальному стану справ.

Для порівняння значень максимальних напружень за різних граничних умов, було розроблено і виконано тестове завдання. Для її вирішення було створено дві ідентичні моделі кільця. Кільця поєднали площинами, задали між ними термічний опір, верхнє кільце нагріли до 500 °С, нижнє мало кімнатну температуру. Комп'ютерним моделюванням передбачалося відведення тепла від нижнього кільця з метою створення в ньому значного перепаду температур (рис. 4 а). Дослідження проводилося на певному часовому проміжку. На рис. 4 б представлено поля температур, що виникають у нижньому кільці внаслідок вищеописаних умов. На рис. 4 в, та 4 г наведено, відповідно, значення напружень, що виникають у кільцях у разі закріплення з відсутністю можливості вільно деформуватися і закріплення на піддатливих пружинах, що дає змогу моделі вільно деформуватися.

Результати моделювання показали, що напруження, які виникають у нижньому кільці, за граничних умов із відсутністю можливості вільно деформуватися, у 4 рази вищі, ніж у кільці, граничні умови на якому дають змогу вільно переміщатися на площині.

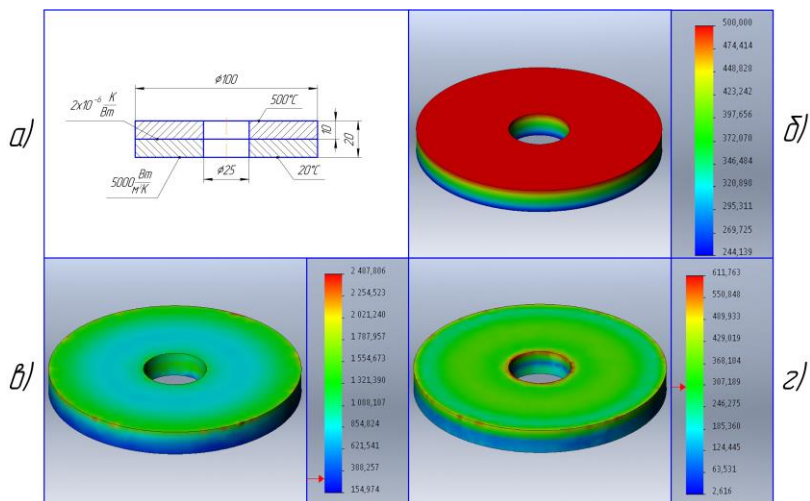


Рис. 4. Щодо аналізу умов закріплення: а) схема й умови взаємодії двох кілець; б) температурне поле нижнього кільця через 450 секунд після початку теплообміну; в) поля еквівалентних температурних напружень нижнього кільця під час його фіксації за трьома координатами (МПа); г) поля еквівалентних температурних напружень нижнього кільця під час його фіксації за однією координатою (МПа)

Висновки. Визначення температурних напружень термонавантажених елементів металургійного обладнання навіть на сьогоднішній день є непростим завданням. Широко відомі рівняння теорії пружності та математичної фізики не дають змоги аналітично розв'язати поставлену задачу і, як наслідок, доводиться вдаватися до чисельних методів розв'язування диференціальних рівнянь із використанням тривимірного моделювання. Водночас на точність отриманих результатів буде впливати не тільки грамотно побудована модель, що є важливим під час аналогічних статичних розрахунків, а й ще низка чинників. До них слід віднести умови закріплення досліджуваної моделі, наявність температурного опору між різними моделями, вказівку характеристик матеріалу як температурно-залежні.

Результати проведеного моделювання свідчать про залежність вищезазначених факторів від значень напружень, що виникають у шлаковій чаші. Температурний опір впливає на однорідність температурного поля і його максимальні значення, неправильні умови закріплення можуть підвищити максимальні напруження в 4 рази, а наявність матеріалу, фізико-механічні параметри якого не залежать від температури, - підвищити напруження ще в 2 рази.

Таким чином, аналіз термонапруженого стану шлакових чаш є складнішим і громіздкішим завданням, як порівняти зі статичним розрахунком, не тільки через необхідність окремо розв'язувати задачу з визначення температурного поля як фактора зовнішнього впливу, а й через наявність додаткових умов, необхідних для отримання адекватного результату.

Перелік посилань

1. F.R.N. Nabarro, The calculation of thermal stresses in cylinders. *International Journal of Engineering Science*. 1981. Vol. 19, Iss. 12. P. 1651-1656. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(81\)90157-9](https://doi.org/10.1016/0020-7225(81)90157-9).
2. Иванченко И. Ф. Исследование опытного образца шлаковоза с чашей емкостью 24 м³. Отчет по НИР (заключительный). Днепропетровск: ДМетИ и ДЗМО, 1977. 148 с.
3. Емелин М. В., Рахманов С. Р. К вопросу оценки термонапряженного состояния и термочности чаш шлаковозов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 105-107. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/mgp-02-2009/>
4. Исследование напряжений в стенке чаши шлаковоза / Д. А. Рассохин, В. В. Чигарев, А. В. Лоза, В. В. Шишкин // *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2013. Вип. 27. С. 172-176. URL: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/31526
5. Transient thermal-stress analysis of steel slag pots: impact of the solidifying-slag layer on heat transfer and wear / I. A. Neacșu, B. Scheichl, H. Rojacz et al. // *Steel Research International*. 2016. Vol. 87. Iss. 6. P 720-732. <https://doi.org/10.1002/srin.201500203>
6. Thermal effects on wear and material degradation of slag pots operating in steel production / H. Rojacz, I. A. Neacșu, L. Widder et al. // *Wear*. 2016. Vol. 350–351. P. 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.12.009>.
7. Development of long-life slag pot by optimizing stiffness structurally for temperature distribution/ K. Kozai, M. Naito, Y. Sato, K. Oyama // *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020. Vol. 3. P. 2233 - 2240. <https://doi.org/10.33313/380/241>
8. Analysis of Thermal Interactions in the Slag Pots for Transporting Copper Slags / A. Szklarz, A. W. Bydalek, P. Migas et al. // *International Journal of Heat and Technology*. 2022, Vol. 40, Iss. 2. P. 646 – 652. <https://doi.org/10.18280/ijht.400236>
9. Timoshenko S. *Strength of Materials, 3rd edition. Part 2. Advanced Theory and Problems*. Melbourne (Florida): Krieger Publishing Company, 1976. 588 p.
10. Determining the thermally-stressed state of motor-driven bowls for transporting liquid slag / V. Povorotnii, I. Shcherbyna, S. Zdanevych et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1. No. 7(127). P. 99 – 106. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299180>.
11. Тайц Н. Ю. *Технология нагрева стали*. М.: Металургиздат, 1962. 567 с.

References

1. Nabarro, F. R. N. (1981). The calculation of thermal stresses in cylinders. *International Journal of Engineering Science*, 19(12), 1651-1656. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(81\)90157-9](https://doi.org/10.1016/0020-7225(81)90157-9)
2. Yvanchenko, Y. F. (1977). *Issledovanie opytnogo obrazca shlakovoza s chashei emkostiu 24 m³*. Otchet po NYR. Dnepropetrovsk: DMetY and DZMO
3. Emelyn, M. V. & Rakhmanov, S. R. (2009). K voprosu otsenky termonapriazhennoho sostoiannya y termoprochnosti chash shlakovozov. *Metallurhycheskaia i hornorudnaia promyshlennost*, (2), 105-107. <https://www.metaljournal.com.ua/mgp-02-2009/>
4. Rassokhyn, D. A., Chyharev V. V., Loza A. V., & Shyshkyn V. V. (2013). Yssledovanye napriazheniy v stenke chashy shlakovoza. *Visnyk pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*, 27, 172-176. https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/31526
5. Neacșu, I. A., Scheichl, B., Rojacz, H., Vorlaufer, G., Varga, M., Schmid, H., & Heiss, J. (2016). Transient Thermal-Stress Analysis of Steel Slag Pots: Impact of the Solidifying-Slag Layer on Heat Transfer and Wear. *Steel Research int.*, 87, 720-732. <https://doi.org/10.1002/srin.201500203>
6. Rojacz, H., Neacșu, I. A., Widder, L., Varga, M., & Heiss, J. (2016). Thermal effects on wear and material degradation of slag pots operating in steel production. *Wear*, 350–351, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.12.009>
7. Kozai, K., Naito, M., Sato, Y., & Oyama, K. (2020). Development of long-life slag pot by optimizing stiffness structurally for temperature distribution. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*, 3, 2233 - 2240. <https://doi.org/10.33313/380/241>
8. Szklarz, A., Bydałek, A. W., Migas, P., Pytel, A., Jaśkowiec, K., Bitka, A., Wójcicki, M., Pysz, S., & Żuczek, R. (2022). Analysis of Thermal Interactions in the Slag Pots for Transporting Copper Slags. *International Journal of Heat and Technology*, 40(2), 646 – 652. <https://doi.org/10.18280/ijht.400236>
9. Timoshenko, S. (1976). *Strength of Materials, 3rd edition. Part 2. Advanced Theory and Problems*. Melbourne (Florida): Krieger Publishing Company
10. Povoronii, V., Shcherbyna, I., Zdanevych, S., Diachenko, N., Kimstach, T., Solonenko, L., & Usenko R. (2024). Determining the thermally-stressed state of motor-driven bowls for transporting liquid slag. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(127)), 99-106. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299180>
11. Taits, N. Iu. (1962). *Tekhnolohiya nahreva staly*. Metalurhyzdat

V. V. Povorotny¹, Ph. D. (Tech.), ORCID 0009-0000-9128-902X

H. I. Tolstikov¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor

I. H. Tolstikov¹

O. O. Yaichuk¹, ORCID 0009-0009-4034-4266

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

SOME FEATURES OF MODELING THE RESEARCH PROCESS THERMO-STRESSED BOWL FOR LIQUID SLAG TRANSPORTATION

Abstract. As is known, in metallurgical shops of blast furnace and steelmaking processes, slag carriers are used to drain slag and transport it. The main and most expensive part of a slag carrier is the bowl, which is a steel casting in the form of a thick-walled shell of various configurations. Currently, in blast furnace shops, the most widely used bowls are 16 m³ in volume, based on frames with carriages and moved by biaxial railway-type undercarriages. At the same time, automobile-type slag carriers carrying one bowl began to be introduced at metallurgical enterprises. The average service life of the bowls is insignificant and on average it is 500-1000 fillings, depending on the chemical composition of the slag, its temperature and a number of other factors. The main reasons for the failure of slag bowls are changes in their shape during operation, expressed in the formation of an annular or local narrowing in the area of the support ring, as well as the appearance of longitudinal and transverse cracks in the walls. Automotive-type bowls last much less due to the frequent failure of the axles, by means of which the axle is mounted on the body of the slag carrier. The above defects appear as a result of cyclic thermal effects caused by natural technological processes in the operation of slag carriers. In a solid body, uneven thermal expansion cannot occur freely and causes thermal stresses, which, in combination with mechanical ones from external forces, can cause significant plastic deformations, leading to complete or progressive destruction of the structure. Knowledge of the magnitude and nature of the distribution of thermal stresses is necessary for a comprehensive analysis of the strength of the structure, and in-depth studies of the thermally stressed state of bowls during their operation will make it possible to develop and adopt engineering solutions to increase their service life.

Key words: slag bowl, thermal stress, deformation, temperature, thermal resistance.

For citation: Povorotny, V. V., Tolstikov, H. I., Tolstikov, I. H., & Yaichuk, O. O. (2024). Some features of modeling the research process thermo-stressed bowl for liquid slag transportation. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 672-685. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-672-685>

*Стаття надійшла до редакції збірника 22.08.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*