

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України
The Ministry of Education and Science of Ukraine
The National Metallurgical Academy of Ukraine

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ
НАУКОВІ ВІСТІ

MODERN PROBLEMS OF METALLURGY
SCIENTIFIC BULLETIN

№ 24

Дніпро 2021

Dnipro 2021

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №24, (2021). – Дніпро: НМетАУ – ІВК «Системні технології», 2021. – 160 с.

ISSN 1991-7848 (Print)

ISSN 2707-9457 (Online)

Відповідальний редактор: член-кор. НАН України, проф. Гасик М.І.

Заступник відповідального редактора: д.т.н., доц. Селівьорстова Т.В.

Відповідальний секретар редакції: к.т.н., с.н.с. Власова Т.Є.

Редакційна колегія збірника:

Балакін В.Ф. д.т.н., проф.,
Гасик М.М. д.т.н., проф. (Фінляндія),
Губінський М.В. д.т.н., проф.,
Гуда А.І., д.т.н., доц.,
Єрьомін О.О., д.т.н., проф.,
Критська Т.В., д.т.н., проф.,
Пінчук В.О., д.т.н., проф.,
Пройдак Ю.С. д.т.н., проф.,
Саричев О.П., д.т.н., проф.,
Светличний Д.С. д.т.н., проф. (Польща),
Селівьорстов В.Ю., д.т.н., проф.,
Тараканов А.К. д.т.н., проф.,
Фролов Я.В., д.т.н., проф.

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Національної металургійної академії України
від 22.01.2021 р., № 1

Адреса редакції збірника:
49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4,
Національна металургійна академія України,
кафедра Інформаційних технологій і систем,
e-mail: st@nmetau.edu.ua
+3 8 (097) 685 45 25

© Національна металургійна академія України,
ІВК «Системні технології», 2021.

ПАМ'ЯТІ НАДЗВИЧАЙНОЇ ЛЮДИНИ

Три речі ніколи не повертаються назад – час, слово, можливість.

Тому: цілуй час, вибирай слова, не втрачай можливість.

Конфуцій (551 – 419 р. до н.е.)



Михайло Іванович народився червні 1929 року в селі Семенівка Пологівського району Запорізької області. Після закінчення з відзнакою Дніпропетровського металургійного інституту отримав спеціальність «Металургія чорних металів». В 1961 році у віці 32 років захистив кандидатську дисертацію, у 1968 році – докторську. На той момент йому було 39 років.

З 1974 року Михайло Іванович очолював кафедру електрометалургії у Національній металургійній академії України (47 років). За цей період під його керівництвом та безпосередньою участю набули вищу освіту декілька поколінь спеціалістів, які працюють на металургійних підприємствах, у наукових установах України і світу.

Під керівництвом професора Гасика М.І. було захищено 45 кандидатські та 13 докторських дисертацій. Михайло Іванович із задоволенням консультував та ділився ідеями з науковцями та практиками під час конференцій, семінарів, нарад, наукових засідань, яких в його житті було безліч.

Надзвичайні досягнення Михайла Івановича були відзначені на державному рівні – в 1990 році він отримав звання академіка НАН України. Крім того, в його «портфелі нагород» є почесне звання «Заслуженій діяч науки і техніки України» (1999 р.) та двічі лауреат Державної премії України (1977, 1998 рр.).

Професор Гасик М.І. є автором понад 200 винаходів, численних книжок, монографій та наукових робіт, які лягли в основу розвитку багатьох сучасних технологій електротеметалургійного виробництва металів та сплавів.

Наведений вище список нагород, відзнак та досягнень не претендує на вичерпність, проте вражає своїм масштабом. Ще древні мудреці казали «Вибери собі роботу до душі, і тобі не доведеться працювати жодного дня у своєму житті», здається в цих словах криється життєве кредо надзвичайної талановитої людини, разом з якою нам пощастило жити і працювати.

Серце Михайло Іванович Гасика зупинилось 5 січня 2021 року.

Він назавжди залишиться в пам'яті посміхненим, доброзичливим, з витонченим почуттям гумору.

За дорученням редакційної ради

Юрій Проїдак, Тетяна Селівьорстова, Вадим Селівьорстов

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ СТАЛІ ПРИ ФІНІШНОМУ ЛЕГУВАННІ У ВИЛИВНИЦІ

У статті обговорюється технологія фінішного легування сталі при розливанні зверху та сифоном. За рахунок зменшення активності кисню в металі через порівняно нижчу від попередніх етапів сталеплавильного переділу температуру розливки досягається зменшення угару феросплавів та збільшується ступінь засвоєння корисних елементів феросплавів. Ключовим аспектом для досягнення максимальної ефективності розглянутої технології є швидке розчинення феросплавів та рівномірний розподіл легуючих компонентів у металі. Метою цього дослідження є визначення найбільш раціональної з погляду часу усереднення металу за хімічним складом технології введення добавки. Для вирішення поставленої задачі було застосовано метод фізичного моделювання на водній прозорій моделі із використанням флуоресцентного барвника. За результатами серії експериментів було визначено раціональний спосіб розливки та режим введення легуючої добавки для забезпечення найшвидшого її розподілення в металі.

Ключові слова: фізичне моделювання, фінішне легування, розливка сталі, гомогенізація.

Стан питання та постановка задач досліджень

Основною задачею введення легуючих матеріалів у виливницю під час розливання є утворення нових фаз (карбідних, нітридних, карбонітридних) та структурних компонентів, які підвищують або надають металу спеціальних властивостей. Їх введення у розплав найчастіше здійснюють у формі порошкового дроту або високолегованого сталевго дробу [1, 2]. Одним з різновидів технологій їх використання є мікролегування, під яким розуміють введення у металевий розплав невеликої до 1 кг/т кількості легуючих елементів для змінення властивостей сплаву. Специфіку операції мікролегування чавуну і сталі детально розглянуто авторами робіт [3, 4, 5, 6].

Автори роботи [7] наголошують на тому, що елементи-модифікатори в залежності від присутності у металевому розплаві інших компонентів, зокрема, азоту, кисню та надлишку вуглецю можуть утворювати нові фази з підвищеними механічними властивостями. Витрата легуючих коливається у досить широких межах 5÷30 кг/т. Зокрема ведення у струмінь металу 7 кг/т

феротитану суттєво покращує рівномірність розподілу вуглецю у поперечному перерізі заготовки [8].

Одним з ефективних напрямків розвитку є технологія фінішного легування металів у виливниці. Раніше було показано в роботах [9] введення рідкоземельних металів в рідку сталь в процесі електрошлакового кокільного лиття сприяє зменшенню забрудненості неметалевими включеннями. В результаті модифікування спостерігається зміна морфології, зменшення загальної кількості і розмірів неметалевих включень. Неметалеві включення набувають переважно глобулярну форму. Модифікування мішметалевої церієвої групи в процесі ЕКЛ стали 4Х5МФС виробляти до значного підвищення ударної в'язкості і пластичності.

Раніше проводилися дослідження тільки по дослідженню видалення неметалевих включень з розплаву у виливниці [10] в цій статті автори вивчали вплив параметрів розливання на видалення неметалевих включень у виливниці, також вивчалось формування неметалевих включень при розливанні через оголення дзеркала металу в виливниці [11], дослідження по розподіленню неметалевих включень в залежності від їх розміру [12], а вивчення видалення методом гомогенізації в самій виливниці вивчено не було.

Важливим показником реалізації запропонованої технології є легування сталі у виливниці для отримання сталі певної марки в малих об'ємах.

Метою дослідження визначити раціональне місце введення легуючих в об'єм розплаву і спосіб розливання, для найкращого розчинення.

Методика проведення досліджень

Схема експериментальної установки зображена на рисунку 1. Установка складалася з моделі виливниці у масштабі 1:3,5 з сифонною та верхньою розливками, над виливницею була проведена трубка, що імітує модель розливного стакану сталерозливного ковша, для подачі води зверху, яку можна було перемістити для розливки зверху або сифоном. При моделюванні розливки зверху отвір у дні виливниці закупорювали.

Для імітування розчинення легуючої добавки у сталі використали ультрафіолетовий барвник Losa glow (мальтодекстрин, рибофловін). Для підсвічування барвника з обох боків виливниці були встановлені ультрафіолетові лампи, потужністю 40 Вт і з довжиною хвилі 365 Нм кожна. Зйомка здійснювалась на камеру з роздільною здатністю 1280×720, яка була встановлена на штатив. В ході кожного експерименту змінювалося місце введення барвника (центр, 50% радіусу і під стінку виливниці) і момент введення (25%, 50%, 75%, 98% висоти наповнення виливниці). Було проведено три серії дослідів з різним способом розливки та введення барвника:

1) розливання зверху з введенням барвника у виливницю; 2) розливання сифоном з введенням барвника у виливницю; 3) розливання сифоном з введенням барвника у центрову. Після проведення експериментів, за відзнятими відео, визначали час гомогенізації від моменту введення барвника. За час повної гомогенізації приймали момент рівномірного забарвлення усього об'єму рідини.

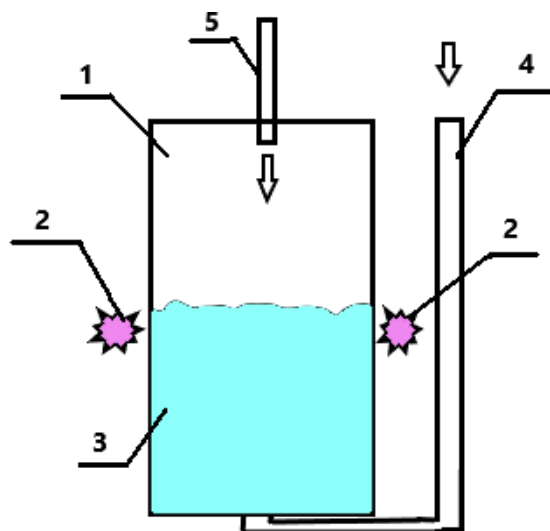


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки:

1 – виливниця; 2 – ультрафіолетові лампи; 3 – вода; 4 – центрова;
5 – модель розливного стакану сталерозливного ковша

Результати

За результатами проведених експериментів було побудовано графік залежності часу повного усереднення від рівня рідини при введенні барвнику для кожної з трьох серії дослідів (рисунок 2).

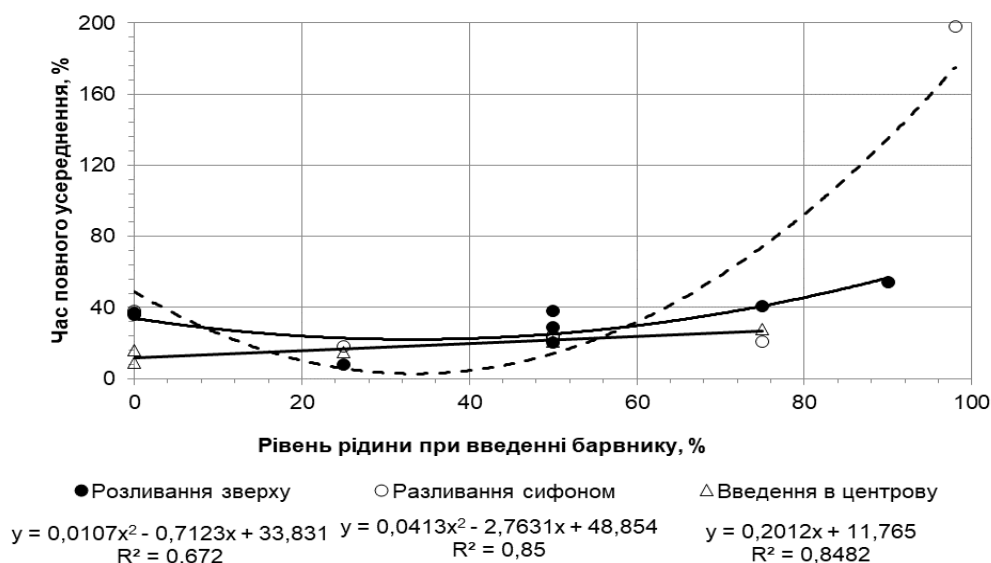


Рисунок 2 – Залежність часу повного усереднення від рівня рідини при введенні барвника

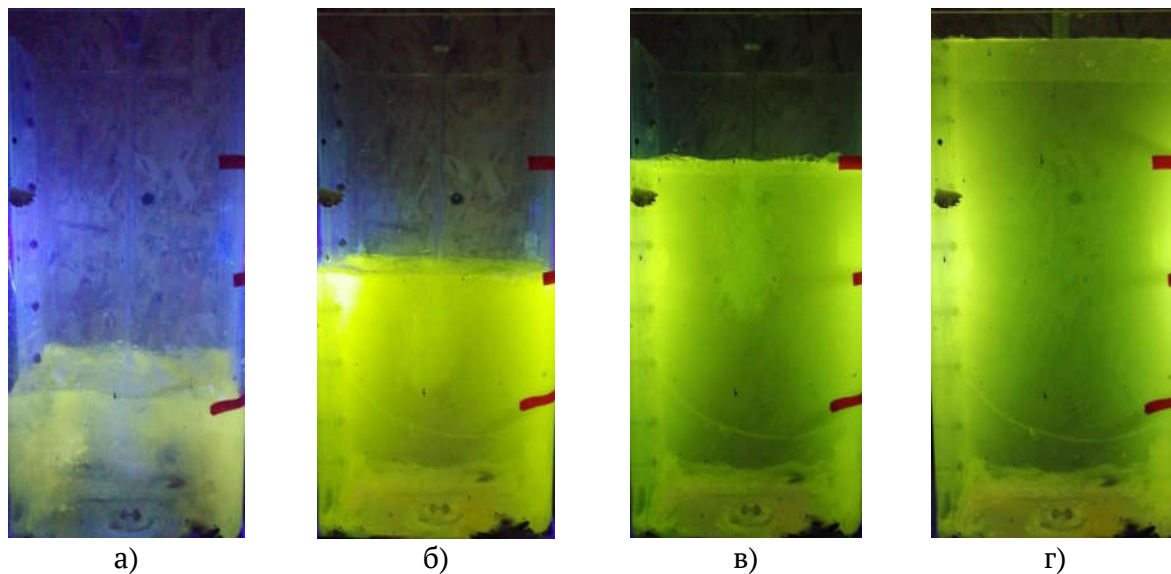


Рисунок 3 – Розливка зверху, введення зверху на 25% наповнення, а) момент введення. Концентрація і розчин барвнику на б) 50%, в) 75%, г) 100% наповнення

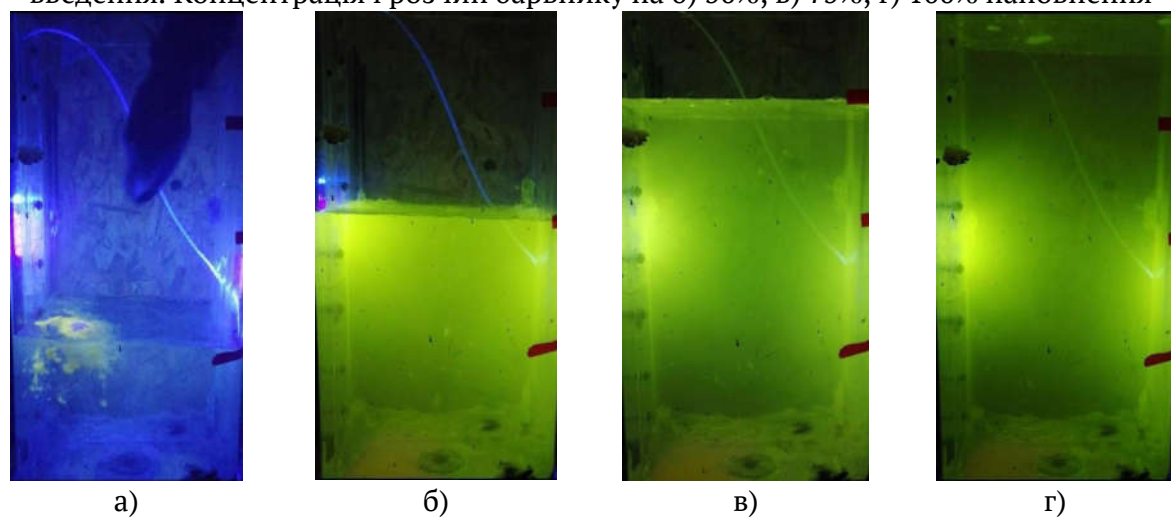


Рисунок 4 - Розливка сифоном, введення зверху на 25% наповнення, а) момент введення. Концентрація і розчин барвнику на б) 50%, в) 75%, г) 100% наповнення

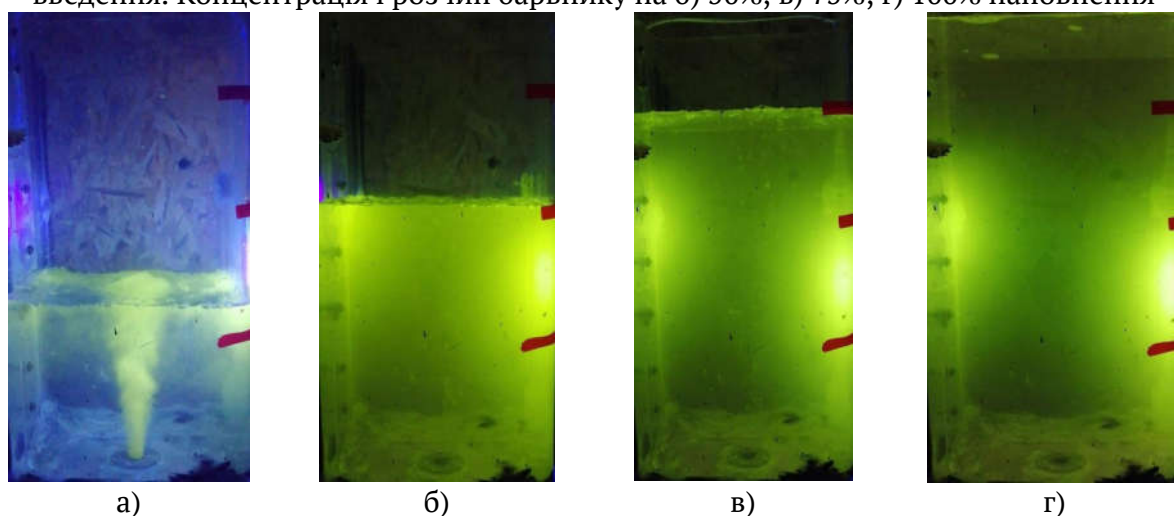


Рисунок 5 - Розливка сифоном, введення у центрову перед наповненням, а) момент подачі рідини. Концентрація і розчин барвнику на б) 25%, в) 75%, г) 100% наповнення

По графіку було проаналізовано, що усереднення барвнику більш ефективно при меншому рівню рідини в виливниці, адже перемішування відбувається завдяки потокам рідини в виливниці, чим вищий рівень рідини у виливниці, тим потоки перемішування слабші. На графіку спостерігається мінімізація часу усереднення при оптимальному рівні рідини. Для розливання зверху та сифоном з додаванням барвника у виливницю оптимальний рівень складає 33%. При введенні барвника у центрову відбувається незначне прямо пропорційне збільшення часу повного усереднення зі збільшенням рівня рідини у виливниці. Серед проаналізованих способів розливання сталі найефективнішим з погляду гомогенізації легуючої добавки є розливання сифоном. На рисунку 3-5 зображено кадри з забарвленням рідини на різних етапах наповнення виливниці при введенні барвника на рівні 25% від висоти виливниці.

Висновки

За результатами дослідження було встановлено, що для розливання зверху вводити легуючі на оголене дзеркало металу слід при оптимальному рівні рідини 33%. При розливанні сифоном легуючі оптимально вводити у центрову перед розливанням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Васильева М.Г. Суспензионное легирование углеродистой стали марганцем / М.Г. Васильева // Литъё с применением инокуляторов. – К.: Институт проблем литъё АН УССР, 1981. – С. 52-56.
2. Зайденберг А.М. Микролегирование высокопрочного чугуна в процессе суспензионного модифицирования / А.М. Зайденберг, Л.А. Солнцев // Литъё с применением инокуляторов. – К.: Институт проблем литъё АН УССР, 1981. – С. 113-116.
3. Ефимов В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, В.С. Эльдарханов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
4. Гольдштейн Я.Е. Проблемы модифицирования стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин // Литъё с применением инокуляторов. – К.: Институт проблем литъё АН УССР, 1981. – С. 168-181.
5. Зайденберг А.М. Микролегирование высокопрочного чугуна в процессе суспензионного модифицирования / А.М. Зайденберг, Л.А. Солнцев // Литъё с применением инокуляторов. – К.: Институт проблем литъё АН УССР, 1981. – С. 113-116.
6. Троцан А.И. Теория и практика микролегирования с учётом межкристаллитной внутренней адсорбции / А.И. Троцан, И.Л. Бродецкий, А.И. Иценко. – К.: «КИМ». – 2009. – 272 с.
7. Дерябин А.А. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали / А.А. Дерябин, А.Б. Добужская // Сталь. – 2000. – №11. – С. 38-43.
8. Влияние микродобавок на химическую неоднородность в литом и деформированном металле / А.И. Манохин, В.Н. Шоршин, Ю.Е. Канн [и др.] // Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1974. – №2. – 143-146.
9. Research of the Effect of Modification on the Structure and Properties of Castings from Steel H11 Obtained by Using Electrosfining Technology / N. V. Larionova, A.M. Tokmin, V.S. Kazakov, O.A. Masansky // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2019. - №12(5). – P. 599-606.

10. Modeling of the Floating of Non-metallic Inclusions when Pouring Steel into a Mold in Top Casting / R.P. Andriukhin., I. Mamuzic, L.S. Molchanov, Y.V. Synehin // Journal of Engineering Sciences. – 2020. – № Volume 7 (2). – P. 22-26.
11. An Experimental and Numerical Study of the Free Surface in an Uphill Teeming Ingot Casting Process / J. Yin, S. Guo, M. Ersson, P. G. Jönsson // FULL PAPER. – 2020. DOI: 10.1002/srin.201900609
12. Model for Inclusion Precipitation Kinetics During Solidification of Steel Applications in MnS and TiN Inclusions / Q. Shu, V.V. Visuri, T. Alatarvas, T. Fabritius // Metallurgical and Materials Transactions b. – 2020.

REFERENCES

1. Vasil'yeva M.G. Suspenszionnoye legirovaniye uglerodistoy stali margantsem (Suspension alloying of carbon steel with manganese) / M.G. Vasil'yeva // Lit'yo s primeneniym inokulyatorov (Casting with the use of inoculators). – K.: Institut problem lit'ya AN USSR, 1981. – S. 52-56 (in Russian).
2. Zaydenberg A.M. Mikrolegirovaniye vysokoprochnogo chuguna v protsesse suspenszionnogo modifitsirovaniya (Microalloying of high-strength cast iron in the process of suspension modification) / A.M. Zaydenberg, L.A. Solntsev // Lit'yo s primeneniym inokulyatorov (Casting with the use of inoculators). – K.: Institut problem lit'ya AN USSR, 1981. – S. 113-116 (in Russian).
3. Yefimov V.A. Fizicheskiye metody vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splavov (Physical methods of influence on the processes of solidification of alloys) / V.A. Yefimov, V.S. El'darkhanov. – M.: Metallurgiya, 1995. – 272 s (in Russian).
4. Gol'dshteyn YA.Ye. Problemy modifitsirovaniya stali (Problems of steel modification) / YA.Ye. Gol'dshteyn, V.G. Mizin // Lit'yo s primeneniym inokulyatorov (Casting with the use of inoculators). – K.: Institut problem lit'ya AN USSR, 1981. – S. 168-181 (in Russian).
5. Zaydenberg A.M. Mikrolegirovaniye vysokoprochnogo chuguna v protsesse suspenszionnogo modifitsirovaniya (Microalloying of high-strength cast iron in the process of suspension modification) / A.M. Zaydenberg, L.A. Solntsev // Lit'yo s primeneniym inokulyatorov (Casting with the use of inoculators). – K.: Institut problem lit'ya AN USSR, 1981. – S. 113-116 (in Russian).
6. Trotsan A.I. Teoriya i praktika mikrolegirovaniya s uchotom mezhkristallitnoy vnutrenney adsorbtsii (Theory and practice of microalloying taking into account intercrystalline internal adsorption) / A.I. Trotsan, I.L. Brodetskiy, A.I. Itsenko. – K.: «KIM». – 2009. – 272 s (in Russian).
7. Deryabin A.A. Issledovaniye effektivnosti protsessov raskisleniya, modifitsirovaniya i mikrolegirovaniya rel'sovoy stali (Investigation of the efficiency of deoxidation processes, modification and microalloying of rail steel) / A.A. Deryabin, A.B. Dobuzhskaya // Stal' (Steel). – 2000. – №11. – S. 38-43 (in Russian).
8. Vliyaniye mikrodozavok na khimicheskuyu neodnorodnost' v litom i deformirovannom metalle (Influence of microadditives on chemical heterogeneity in cast and deformed metal) / A.I. Manokhin, V.N. Shorshin, YU.Ye. Kann [i dr.] // Nepreryvnaya razlivka stali (Continuous casting of steel). – M.: Metallurgiya, 1974. – №2. – 143-146 (in Russian).
9. Research of the Effect of Modification on the Structure and Properties of Castings from Steel H11 Obtained by Using Electrorefining Technology / N. V. Larionova, A.M. Tokmin, V.S. Kazakov, O.A. Masansky // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2019. – №12(5). – P. 599-606.
10. Modeling of the Floating of Non-metallic Inclusions when Pouring Steel into a Mold in Top Casting / R.P. Andriukhin., I. Mamuzic, L.S. Molchanov, Y.V. Synehin // Journal of Engineering Sciences. – 2020. – № Volume 7 (2). – P. 22-26.
11. An Experimental and Numerical Study of the Free Surface in an Uphill Teeming Ingot Casting Process / J. Yin, S. Guo, M. Ersson, P. G. Jönsson // FULL PAPER. – 2020. DOI: 10.1002/srin.201900609
12. Model for Inclusion Precipitation Kinetics During Solidification of Steel Applications in MnS and TiN Inclusions / Q. Shu, V.V. Visuri, T. Alatarvas, T. Fabritius // Metallurgical and Materials Transactions b. – 2020.

Received 01.02.2021.

Accepted 11.02.2021.

**PHYSICAL MODELING OF STEEL HOMOGENIZATION
DURING FINISH ALLOYING IN THE MOLD**

The article describes the method of finish alloying steel in molds in top and bottom casting. Due to the reduction of oxygen activity in the metal due to the relatively lower casting temperature than the previous stages of steelmaking redistribution, it is achieved the reduction of the ferroalloys loss and increasing the yield of useful elements of ferroalloys. An important indicator of the implementation of the proposed technology is the alloying of steel in the mold to obtain steel of a certain brand in small volumes. The aim of the study is to determine the rational place of addition of alloys into the volume of the melt and the method of casting, for the best dissolution of alloys in steel directly in the mold. To solve this problem, the method of physical modeling on a water transparent model using a fluorescent dye that glows brightly in ultraviolet light was used. The experiment consisted of three series of with different methods of casting and introduction of dye: 1) top casting with the introduction of dye into the mold; 2) bottom casting with the introduction of dye into the mold; 3) bottom casting with the introduction of dye in the trumpet. It was analyzed that the averaging of the dye is more efficient at a lower liquid level in the mold, because mixing occurs due to the flow of liquid in the mold, the higher the liquid level in the mold, the weaker the mixing flows. The research revealed minimization of averaging time at the optimal fluid level. For top and bottom casting with the addition of dye to the mold, the optimal level is 33%. When the dye is introduced into the center, there is a slight directly proportional increase in the time of complete homogenization with an increase in the liquid level in the mold. Among the analyzed methods of steel casting, the most effective in terms of homogenization of the alloying additive is bottom casting. The color of the liquid at different stages of filling the mold with the introduction of the dye at the level of 25% of the height of the mold is analyzed.

Keywords: physical modeling, finishing alloying, steel casting, homogenization.

Андюхін Роман Павлович – аспірант, кафедра металургії чавуну і сталі, Національна металургійна академія України.

Молчанов Лавр Сергійович – к.т.н., завідувач відділом фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України.

Синегін Євген Володимирович – доцент, к.т.н., доцент кафедри металургії чавуну і сталі, Національна металургійна академія України.

Андюхин Роман Павлович – аспирант кафедры металлургии чугуна и стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Молчанов Лавр Сергеевич – заведующий отделом физико-технических проблем металлургии стали, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальная академия наук Украины.

Синегин Евгений Владимирович – доцент, к.т.н., доцент кафедры металлургии чугуна и стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Andriukhin Roman – PhD Student, Department of Iron and Steel Metallurgy, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Molchanov Lavr – PhD, Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Synehin Yevhen – PhD, Associate Professor, Department of Iron and Steel Metallurgy, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

О.І. Бабаченко, Р.В. Подольський, К. Г. Дьоміна,
Г.А. Кононенко, О.А. Сафронова²

ФІЗИЧНЕ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЛАБОРАТОРНИХ ЗЛИТКІВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ОСЕЙ

Анотація. Проведено огляд досліджень у галузі моделювання процесів у металі під час термообробки та обробки металу тиском та вплив обробки на фізико-механічні властивості сталі з хімічним складом 0,59%С, 0,31% Si, 0,73%Mn. Розроблено математичну модель розрахунку фізико-механічних властивостей сталі в процесі гарячої пластичної деформації. В результаті моделювання були отримані функції: величина деформації в напрямку прикладеної сили, поділена на початкову довжину матеріалу. Отримано коефіцієнт подовження матеріалу з фактичним хімічним складом при температурі $1250 \pm 10^\circ\text{C}$, яка склав 0,32. При порівнянні значень навантаження, що було застосовано при ГПД в лабораторних умовах і отримано в результаті розрахунків з використанням розробленої моделі встановлено, що вони мають близькі значення ~ 45 МПа. Цим підтверджується адекватність отриманої моделі.

Ключові слова: моделювання, напруження, геометрія, осі, плавка, фізико-механічні властивості.

Вступ

За рахунок підвищення вантажності вагонів підвищується фактичне навантаження на вісь, а збільшення швидкості веде до зростання динамічного впливу колії та рухомого складу, а також числа зміни циклів напружень в одиницю часу, що викликає підвищення напружень в деталях вагонів і локомотивів, а також рейкового шляху. Все це визначає необхідність збільшення міцності та службової надійності вузлів і деталей рухомого складу [1, 2].

У зв'язку з швидким скороченням строків освоєння виробів у виробництві велике значення має використання електронної та розрахункової техніки. Тому провідні фірми застосовують гнучкі виробничі системи, які базуються на автоматизації всього життєвого циклу виробів [3]. Моделювання дозволяє суттєво скоротити витрати часу та матеріальних ресурсів при освоєнні нових видів продукції або вдосконаленні технології виробництва. Найпоширенішими програмами для моделювання процесів у металі при деформаційній та термічній обробці є такі: QForm, модуль Magics [4] програми Materialise, ANSYS, SOLIDWORKS.

Постановки мети і завдань дослідження

Дослідженням впливу режимів деформації на пророблення структури готових виробів займалося багато видатних вчених у галузі прокатного виробництва та в галузі кувального виробництва [5, 6]. Інтенсифікація режимів деформації практично завжди позитивно позначається на проробленні внутрішніх ділянок виробів, що деформуються [7]. Для підвищення якості залізничних осей необхідно підвищувати деформаційну пророблюваність чорнової осі при ГПД. Для дослідження впливу гарячої пластичної деформації на структуру та властивості сталі для залізничних осей, в лабораторних умовах був виготовлений злиток сталі, що за хімічним станом відповідає складу сталі для залізничних осей марки ОС згідно ДСТУ ГОСТ 31334:2009.

Матеріал і методика досліджень

В умовах Інституту чорної металургії була виконана виплавка дослідної плавки. Виплавку виконували за допомогою комплексної установки, що складається з плавильного агрегату ІТПЕ-0,01 закритого типу і високочастотного джерела струму ВТГ-20-22, що має вбудовану станцію автономного охолодження. Загальний вигляд комплексної експериментальної установки показано на рис. 1. Ця установка дозволяє виплавляти в лабораторних умовах дослідні сталі, в тому числі спеціально леговані марганцем, кремнієм, хромом, молібденом та ін.



Рисунок 1 – Процес розплавлення сталі

Для забезпечення необхідних показників в досліджуваних варіантах і відсутності небажаних домішок присутніх в рядовому брухті в якості вихідної сировини вибрали метал колісної марки класу С – вуглецева якісна сталь з вмістом вуглецю 0,72%, мас.

Плавку проводили методом переплавлення без примусового окислення домішок. З огляду на малий обсяг печі (до 12 кг), і той факт, що діаметр тигля становить всього близько 43 мм шихту подрібнювали до розмірів 10х7,5х5 мм, попередньо відпустивши метал в муфельній печі. Фактичний хімічний склад представлений в таблиці 1.

Таблиця 1

Фактичний хімічний склад лабораторної осьової плавки

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Ti
0,59	0,31	0,73	0,057	0,087	0,008	0,01	0,141	0,002	0,002

Дослідження мікроструктури дослідного злитку в литому стані (рис. 2) проводилось за допомогою витравлення в 4% розчині ніталя та гарячому розчині пікрату натрію. Мікроструктура - ферито-перлітна з перлітом різної дисперсності. Дендритна структура, яка виявляється по слідах хімічної неоднорідності, характеризує процеси кристалізації. З рисунків видно вплив швидкості охолодження при кристалізації в залежності від відстані до поверхні виливниці (поверхня, $\frac{1}{2}$ радіусу, центр) на дисперсність первинних кристалів.

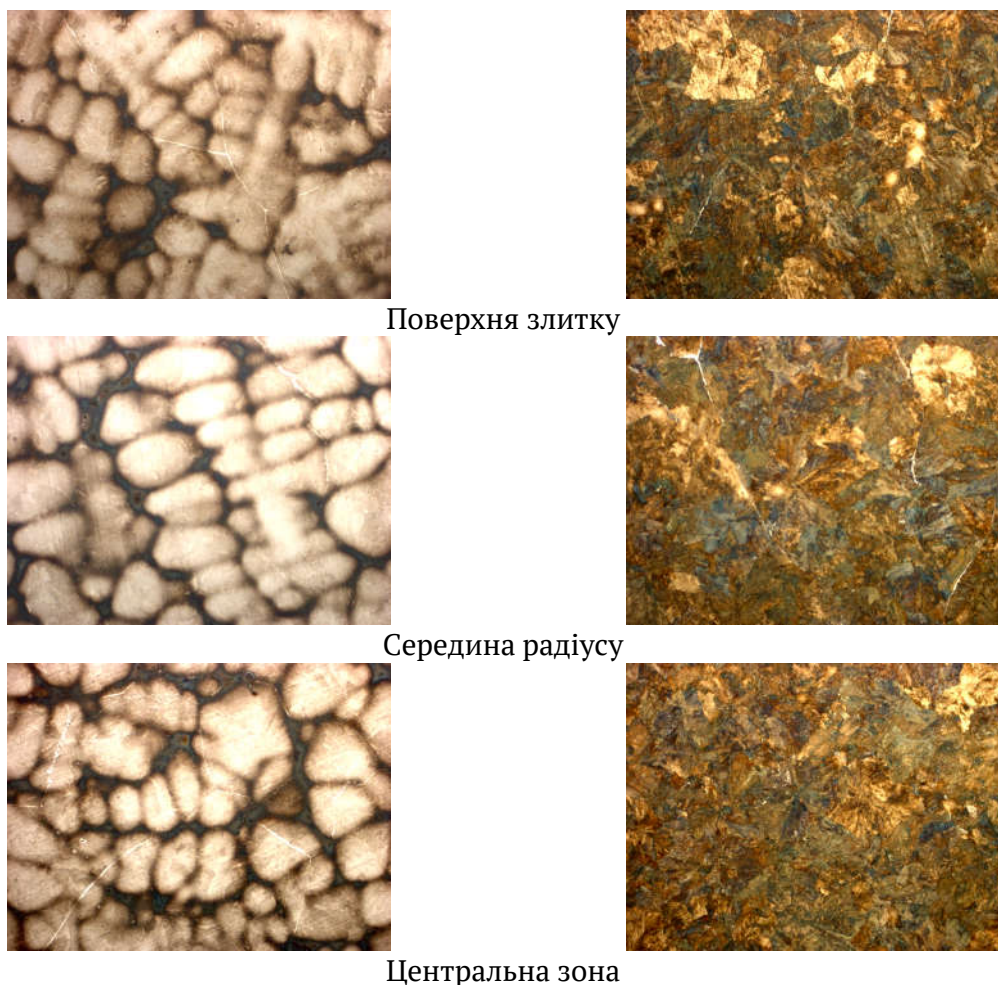


Рисунок 2 – Мікроструктура лабораторного осьового злитку в литому стані, $\times 100$

Механічні властивості металу, визначаються його структурою. Найбільш ефективним способом підвищення властивостей металу є зниження розміру зерна. Подрібнення дійсного зерна практично не впливає на характеристики міцності середньо- і високовуглецевої сталі, але чинить позитивний вплив на її пластичність [8].

Також гаряча деформація зменшує стійкість аустеніту в перлітній області і збільшує швидкість перлітного перетворення, в результаті чого утворюється високодисперсний перліт. Інтенсифікуючий вплив гарячої деформації на перлітне перетворення проявляється тим сильніше, чим вище ступінь обтиску [9].

Завданням досліджень була розробка моделі розрахунку розподілу фізико-механічних властивостей сталі для залізничних осей при ГПД на 50% по перерізу циліндричних зразків (124,9ммхØ31мм) в програмі QForm. Також було проведено деформацію зразків в лабораторних умовах на універсальній випробувальній машині.

В програмі QForm проводилось моделювання експерименту процесу гарячої пластичної деформації (ГПД) на 50% циліндричних зразків лабораторних осьових плавок для дослідження зміни морфології литої структури.

В якості вихідних умов задавалися типи операцій – розрахунок термопружно-пластичної задачі. Побудова геометрії зразка проводилася в програмі КОМПАС. Креслення експортувалося в форматі *.stp в QForm. Температура деформації встановлена 1250°C. Показано процес зміни інтенсивності напруження в матеріалі при ГПД, середнє напруження та пластична деформація (рис. 3).

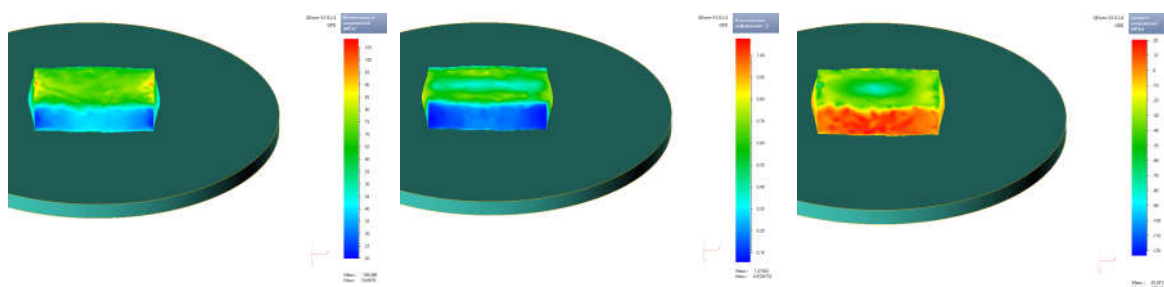


Рисунок 3 – Моделювання гарячої пластичної деформації проби з лабораторного злитка сталі для залізничних осей в робочому просторі QForm

На підставі даного моделювання отриманні результати по інтенсивності напруження, які склали близько 45-50 МПа, та розподіл напруження по зразку дослідної сталі для залізничних осей, які склали близько 40-50 МПа в області контакту з інструментом та близько 10-15 МПа в безконтактній області.

В результаті моделювання були отримані функції: величина деформації в напрямку прикладеної сили, поділена на початкову довжину матеріалу. Отримано коефіцієнт подовження матеріалу з фактичним хімічним складом при температурі $1250 \pm 10^\circ\text{C}$, яка склала 0,32. Отримано фізичну величину, яка представляє силу на одиницю площі в оточенні матеріальної точки на реальній поверхні або зображенні суцільного середовища. Отримано значення напружень в області контакту з інструментом близько 44,76 МПа.

У лабораторних умовах була проведена гаряча пластична деформація проби діаметром 31 мм та висотою 124 мм з дослідного злитку шляхом осаджування на величину 50% (рис. 4). Температура нагрівання проб під гарячу деформацію дорівнювала 1250°C . В результаті експерименту отримано фактичні значення напружень в області контакту з інструментом близько 46 МПа.



Рисунок 4 – Загальний вигляд проб з дослідного злитку до деформації

Мікроструктура досліджуваної лабораторної плавки після ГПД складається в основному з ферито- перлітної структури, спостерігались ділянки з грубою пластинчастою структурою перліту (рис. 5). Дослідження дендритної структури показало витяжку дендритів в області $\frac{1}{2}$ радіусу та центральної частини, що підтверджує сприятливий вплив на рівномірність структури. Рівномірність структури досягалась завдяки впливу гарячої пластичної деформації, яка вирівнює негативні наслідки литого стану.

При порівнянні значень навантаження, що було застосовано при ГПД в лабораторних умовах і отриманого в результаті розрахунків з використанням розробленої моделі встановлено, що вони мають близькі значення ~ 45 МПа. Цим підтверджується адекватність отриманої моделі.

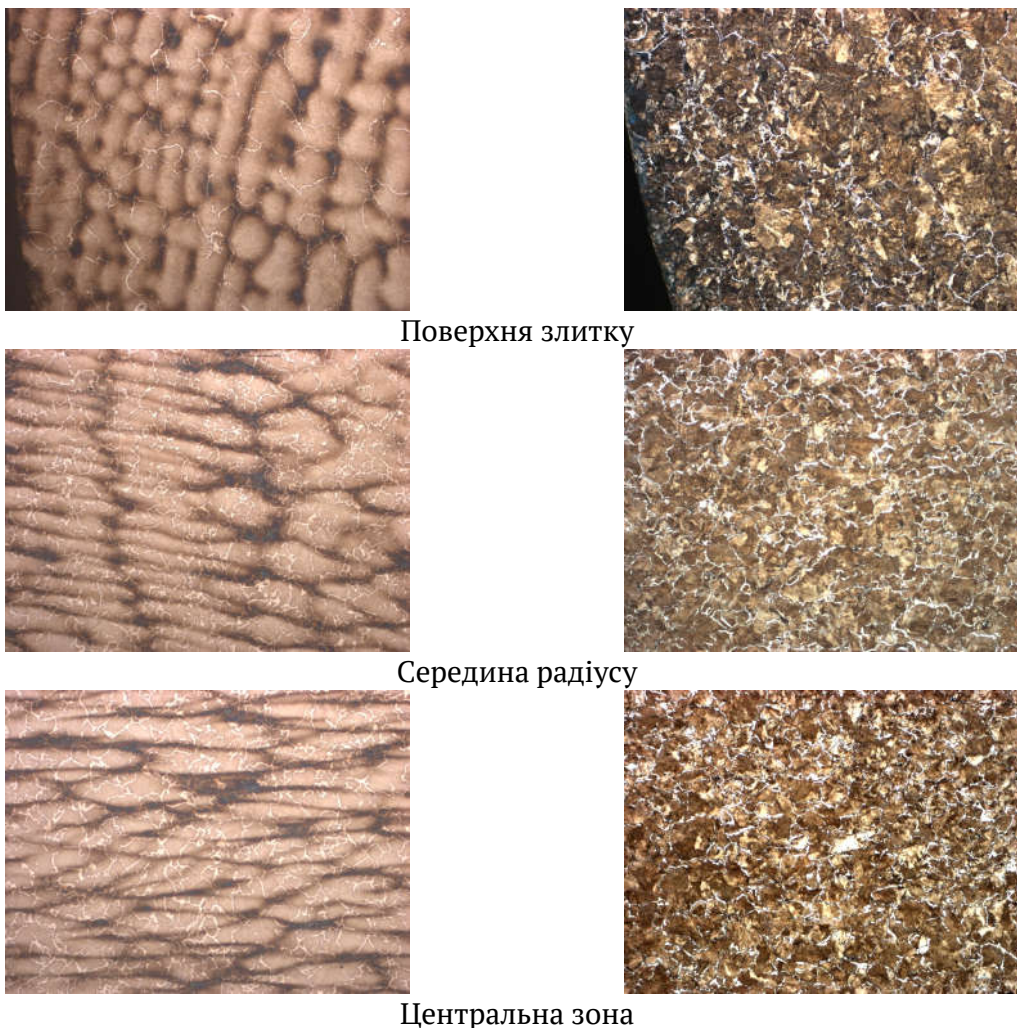


Рисунок 5 - Мікроструктура лабораторного осьового злитку після ГПД, $\times 100$

В подальшому отримані результати будуть використані про розробці моделі розрахунку зміни фізико-механічних властивостей металу залізничної осі при розробці перспективних способів та режимів її ГПД.

ВИСНОВОК

1. Проведено моделювання гарячої пластичної деформації на 50% лабораторного осьового злитку при температурі $1250 \pm 10^\circ\text{C}$ з хімічним складом 0,59%С, 0,31% Si, 0,73%Mn. Визначено коефіцієнт подовження матеріалу, який склав 0,32.

2. Дослідження дендритної структури показало витяжку дендритів в області $\frac{1}{2}$ радіусу та центральної частини, що підтверджує сприятливий вплив на рівномірність структури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Школьник Л.М. Повышение прочности осей подвижного состава / Л.М. Школьник. – М.: Транспорт, 1964. – 224 с.

2. Safronova O., Podolskyi R., Domina K. Hereditary influence of the initial structural state on the quality of rail axes. The 19 International students scientific conference "Engineer of the Third Millennium". 2020. №19. С. 32–33. DOI: 10.13140/RG.2.2.24462.38728
3. Кундас С.П., Кашко ТА. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб, пособ. в 2 ч. Ч 1. М.: БГУИР, 2002. 164 с.
4. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. Симуляция влияния остаточных напряжений и параметров SLM-технологии на формирование области границ изделия из жаропрочного никелевого сплава inconel 718. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» Днепр, 2020, С. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001>.
5. Чекмарёв А. П. Теория прокатки крупных слитков / А. П. Чекмарёв, В. Л. Павлов, В. И. Мелешко, В. А. Токарев. – М.: Металлургия, 1968. – 252 с.
6. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М. Я. Дзугутов. – М.: Металлургия, 1977. – 480 с.
7. Babachenko O. I., Diomina K. H., Kononenko H. A., Podolskyi R. V. Analysis of the influence of deformation working of a continuous billet on macro- and microstructure of structural steel (review). Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals. 2020. 91, №4. P. 17-29. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241120.17.687>
8. Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Дементьева Ж.А. Исследование влияния действительного зерна на износостойкость и сопротивление хрупкому разрушению углеродистой стали // Металлургическая и горная промышленность. – 2002. - №5. – С. 52 – 54.
9. В.И. Большаков, И.Е. Долженков, В.И. Долженков Термическая обработка стали и металлопроката. - Днепропетровск: Gaudeamus, 2002. -271 с.

REFERENCES

1. Sterin I.S. /Mashinostroitelnyie materialyi. Osnovyi metallovedeniya i termicheskoy obrabotki/ Uch. Posobie. – SPb.: Politehnika, 2003.-344 s. ISBN 5-7325-0636-5
2. Safronova O., Podolskyi R., Domina K. Hereditary influence of the initial structural state on the quality of rail axes. The 19 International students scientific conference "Engineer of the Third Millennium". 2020. №19. S. 32–33. DOI: 10.13140/RG.2.2.24462.38728
3. Kundas S.P., Kashko TA. Komp'yuternoe modelirovanie tehnologicheskikh sistem: Ucheb, posob. v 2 ch. Ch 1. Mi.: BGUIR, 2002. 164 s.
4. Adzhamskij S. V., Kononenko A. A., Podol'skij R. V. (2020). Simuljacija vlijaniya ostatochnyh naprjazhenij i parametrov SLM-tehnologii na formirovanie oblasti granic izdelija iz zharoprochnogo nikel'evogo splava inconel 718. Materiali mizhnarodnoї naukovo-tehničnoї konferencії «Інформаційні технології в металургії та mashinobuduvanni» Dnepr, S. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001>
5. Chekmarjov A. P. Teorija prokatki krupnyh slitkov / A. P. Chekmarjov, V. L. Pavlov, V. I. Meleshko, V. A. Tokarev. – М.: Metallurgija, 1968. – 252 s.
6. Dzugutov M. Ja. Plasticheskaja deformacija vysokolegirovannyh stalej i splavov / M. Ja. Dzugutov. – М.: Metallurgija, 1977. – 480 s.
7. Babachenko O. I., Diomina K. H., Kononenko H. A., Podolskyi R. V. Analysis of the influence of deformation working of a continuous billet on macro- and microstructure of structural steel (review). Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals. 2020. 91, №4. P. 17-29. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241120.17.687>
8. Uzlov I.G., Babachenko A.I., Dement'eva Zh.A. Issledovanie vlijaniya dejstvitel'nogo zerna na iznosostojkost' i soprotivlenie hrupkomu razrusheniju uglerodistoj stali // Metallurgicheskaja i gornaja promyshlennost'. – 2002. - №5. – S. 52 – 54.
9. V.I. Bol'shakov, I.E. Dolzhenkov, V.I. Dolzhenkov Termicheskaja obrabotka stali i metalloprokata. - Dnepropetrovsk: Gaudeamus, 2002. -271 s.

Received 11.01.2021.

Accepted 25.01.2021.

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF HOT PLASTIC DEFORMATION
OF LABORATOR STEEL INGOLES FOR AXES**

A review of research in the field of modeling processes in metal during heat treatment and pressure treatment of metal and the effect of processing on the physical and mechanical properties of steel with a chemical composition of 0.59% C, 0.31% Si, 0.73% Mn. A mathematical model for calculating the physical and mechanical properties of steel in the process of hot plastic deformation has been developed. As a result of modeling, the following functions were obtained: the amount of deformation in the direction of the applied force divided by the initial length of the material. The coefficient of elongation of the material with the actual chemical composition at a temperature of 1250 ± 10 °C, which was 0.32. In the laboratory, hot plastic deformation of the sample with a diameter of 31 mm and a height of 124 mm from the test ingot by deposition of 50% When comparing the values of the load applied to the GPA in the laboratory they have close values of ~ 45 MPa. The microstructure of the studied laboratory smelting after GPA consists mainly of ferrite-perlite structure, areas with a rough lamellar structure of perlite were observed. The study of the dendritic structure showed the extraction of dendrites in the area of $\frac{1}{2}$ radius and the central part, which confirms the favorable effect on the uniformity of the structure. This confirms the adequacy of the obtained model. In the future, the obtained results will be used to develop a model for calculating the change in physical and mechanical properties of the metal of the railway axis in the development of promising methods and modes of its GPA.

Keywords: modeling, stress, geometry, axis, melting, physical and mechanical properties.

Бабаченко Олександр Іванович – докт. техн.наук, директор, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Подольський Ростислав Вячеславович – інженер першої категорії, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Дьоміна Катерина Геннадіївна – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Кононенко Ганна Андріївна – канд. техн. наук, вчений секретар, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Сафронова Олена Анатоліївна – інженер першої категорії, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Бабаченко Александр Иванович – докт. техн.наук, директор, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Подольский Ростислав Вячеславович – инженер первой категории, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Демина Екатерина Геннадиевна – канд. техн.наук, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Кононенко Анна Андреевна – канд. техн.наук, ученый секретар, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Сафронова Елена Анатольевна – инженер первой категории, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Babachenko Alexander– Dr. Technical Sciences, Director, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Podolskyi Rostislav – engineer of the first category, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Domina Kateryna – Cand. technical science, senior researcher, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Kononenko Ganna – Cand. technical science, scientific secretary, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Safronova Olena – engineer of the first category, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КРИСТАЛІЧНИХ РЕШІТОК НА ФРАКТАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

Значний інтерес представляють кристалічні тіла, які характеризуються впорядкованим розташуванням атомів. До кристалів можна віднести мінерали, всі метали, солі, більшість органічних сполук і велику кількість інших твердих тіл. Закономірна і досконала геометрія кристалів говорить про наявність закономірностей і в їх внутрішній будові. Ці впорядковані структурні частинки, що розташовані правильними рядами в строгій ієрархічній послідовності і мають ось симетрії другого, третього, четвертого і шостого порядків. Строго математично доведено, що відмічені порядки осей в тому або іншому поєднанні для кристалів єдино можливі. Інших порядків осей симетрії, поворот навколо яких переводив би ґрати кристала самі в себе, в класичній кристалографії не існує. Тому є сенс побудувати поверхні другого, третього, четвертого порядків симетрії та провести аналіз їх фрактальних характеристик. Цікавим дослідженням є побудова фрактальних розподілень таких поверхонь.

Ключові слова: фрактальна розмірність, фрактальні розподілення, кристалічна решітка, квазікристали, шехтманіт, обертальна симетрія, порядок симетрії, мозаїка Пенроуза, кристалічна та квазікристалічна фрактальна поверхня.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Структуру твердих тіл в природі можна розділити на три класи: 1. неупорядковані аморфні тіла, в яких повністю відсутня закономірність у взаємному розташуванні атомів; 2. кристалічні тіла, що характеризуються їх впорядкованим розташуванням; 3. квазікристали, що розглядаються як проміжні форми між аморфними і кристалічними тілами [1].

До кристалів можна віднести мінерали, всі метали, солі, більшість органічних сполук і велику кількість інших твердих тіл. Закономірна і досконала геометрія кристалів говорить про наявність закономірностей і в їх внутрішній будові. Ці впорядковані структурні частинки, що розташовані правильними рядами в строгій ієрархічній послідовності, визначають просторові кристалічні ґрати і мають ось симетрії другого, третього, четвертого і шостого порядків. Строго математично доведено, що відмічені порядки осей в тому або іншому поєднанні для кристалів єдино можливі. Інших порядків осей симетрії, поворот навколо яких переводив би ґрати кристала самі в себе, в класичній кристалографії не існує.

У 1984 році Д. Шехтманом був відкритий сплав алюмінію з марганцем з незвичайними властивостями. Він мав структуру схожу на кристал, але їм не був, оскільки мав обертальну симетрію 5-го порядку. Виявлена структура згодом була названа шехтманітом. Наявність різких дифракційних максимумів свідчила про впорядковане розташування атомів в структурі, що характерна для кристалів, а наявність осі симетрії 5-го порядку, що спостерігалася, суперечила фундаментальним представленням класичної кристалографії і говорила про те, що досліджувана речовина не є кристалом. Така структура отримала назву квазікристала.

Моделлю двовимірного квазікристала є мозаїка Пенроуза, що являє собою впорядковану структуру, яка складається з двох ромбів з рівними сторонами. Така мозаїка має багато властивостей, характерних для квазікристалічного стану речовини [2].

Тому є сенс побудувати поверхні другого, третього, четвертого, п'ятого та шостого порядків симетрії та провести аналіз їх фрактальних характеристик. Цікавим дослідженням є побудова фрактальних розподілень таких поверхонь.

Метою цієї роботи є розробка програмних модулів для побудови квазікристалічних та кристалічних решіток з симетрією різних порядків; обчислення фрактальних розмірностей та побудова фрактальних розподілень природних та комп'ютерних поверхонь кристалів і квазікристалів.

Викладення основного матеріалу дослідження

В ході дослідження розроблено програмний продукт PenrouseFS, який дозволяє побудувати фрактальні поверхні на кристалічних решітках з різною поворотною симетрією та на квазікристалічних решітках. Побудовані фрактальні поверхні кристалічних та квазікристалічних структур за допомогою метода випадкового зсуву середньої точки. Даний метод розпочинається з трикутника, що лежить у довільній площині. Середні точки сторін трикутника з'єднанні між собою таким чином, що трикутник виявляється поділений на чотири менші трикутники. Після чого кожна середня точка зсувається вгору або вниз на певну, випадково обрану величину. Такий самий процес застосовується до кожного з менших трикутників, потім до ще менших й так далі нескінченно [3]. Етапи побудови фрактальної поверхні наведені на рис. 1.

У цьому методі зсуву середніх точок випадкові величини для переміщення середніх точок угору або вниз керуються певним законом розподілу, який підбирається, щоб отримати близьку апроксимацію бажаної поверхні. Таким чином, за допомогою методу зсуву середньої точки з кристалічної решітки можна створювати фрактальні складні поверхні з певною поворотною симетрією. Було досліджено, що у всіх поверхонь, побудованих даним методом існує загальна властивість: міра порізаності або складності їх структури вимірюється фрактальною розмірністю.

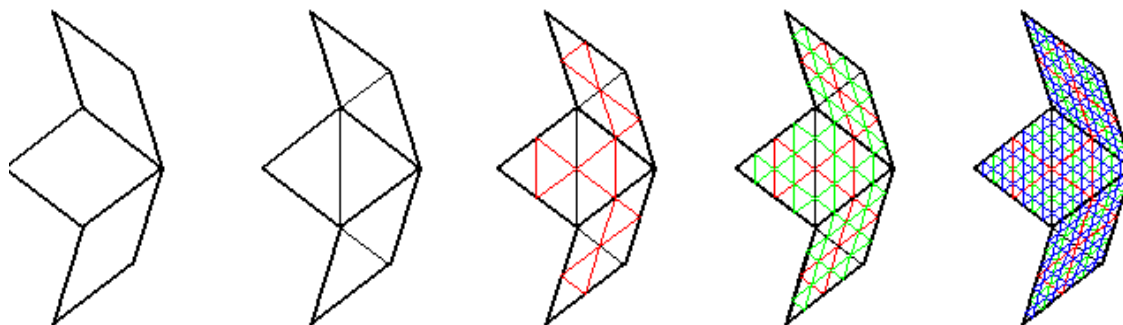


Рисунок 1 – Етапи побудови фрактальних поверхонь на прикладі елементів мозаїки Пенроуза

В ході роботи було побудовано чисельну кількість фрактальних поверхонь кристалічних та квазікристалічних структур з використанням наведеного методу: побудовані кристалічні структури другого, третього, четвертого, шостого порядків симетрії та квазікристалічні структури з різною кількістю ітерацій (від 4 до 9), яка відповідає за ступінь деталізації поверхні та проведений аналіз їх фрактальних характеристик. При цьому побудова поверхні розпочиналася з розбиття початкової кристалічної решітки, що представлена квадратами (для кристалічної структури другого порядку) чи прямокутниками (для кристалічної структури четвертого порядку) на два трикутники, до яких було застосовано метод випадкового зсуву середньої точки. Початкові кристалічні решітки для побудови фрактальних поверхонь представлені на рис. 2.

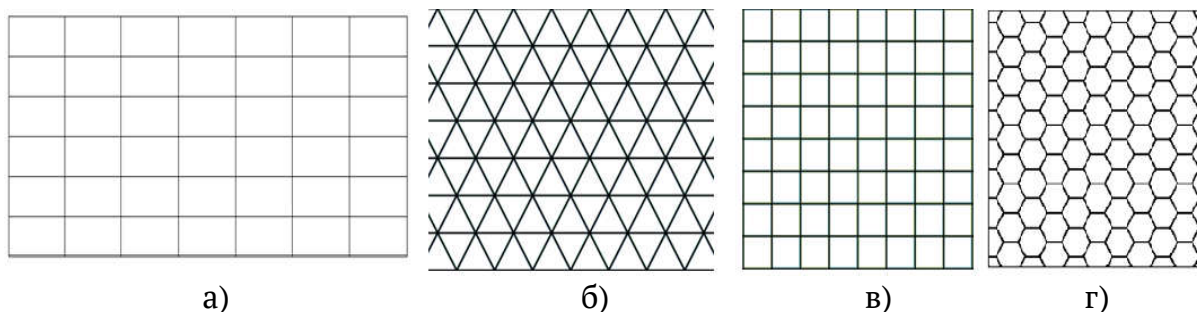


Рисунок 2 – Кристалічна решітка другого (а), третього (б), четвертого (в) та шостого (г) порядків обертальної симетрії

За допомогою розробленого програмного продукту було побудовано чотири види фрактальних поверхонь на кристалічних решітках другого, третього, четвертого та шостого порядків обертальної симетрії з кількістю ітерацій від чотирьох до дев'яти. На рис. 3 наведено отримані фрактальні поверхні. З представлених на рис. 3 кристалічних поверхонь можна побачити кристалічну решітку, що бралася за основу при побудові поверхні.

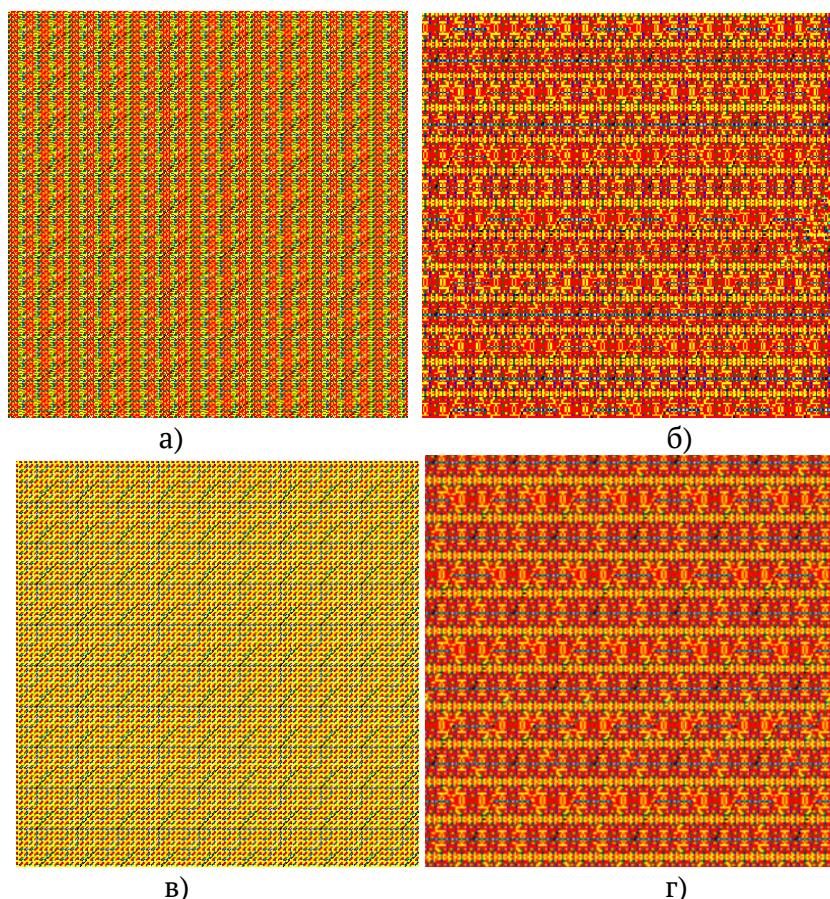


Рисунок 3 – Кристалічні поверхні з орієнтаційною симетрією другого (а), третього (б), четвертого (в) і шостого (г) порядків

Поверхні квазікристалічних структур – поверхні Пенроуза - були побудовані на основі мозаїк Пенроуза з використанням методу випадкового зсуву середньої точки. При цьому побудова поверхні розпочиналася з розбиття кожного з ромбів, якими представлена мозаїка Пенроуза, на два трикутники, до яких було застосовано метод випадкового зсуву середньої точки. Доцільність побудови поверхонь Пенроуза зумовлена властивістю самоподібності мозаїки Пенроуза, яка являє собою модель квазікристалу. Початкова квазікристалічна решітки для побудови фрактальних поверхонь представлена на рис. 4.

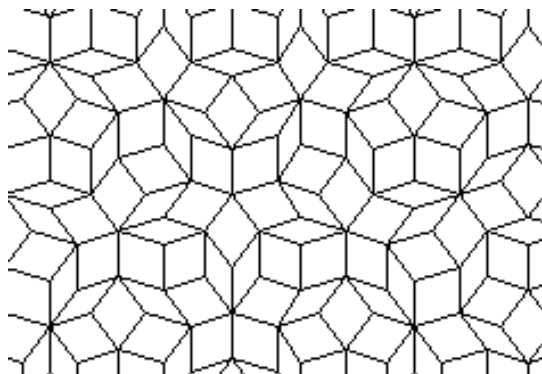


Рисунок 4 – Квазікристалічна решітка

На рис. 5 наведено приклад квазікристалічної поверхні з обертальною симетрією п'ятого порядку.

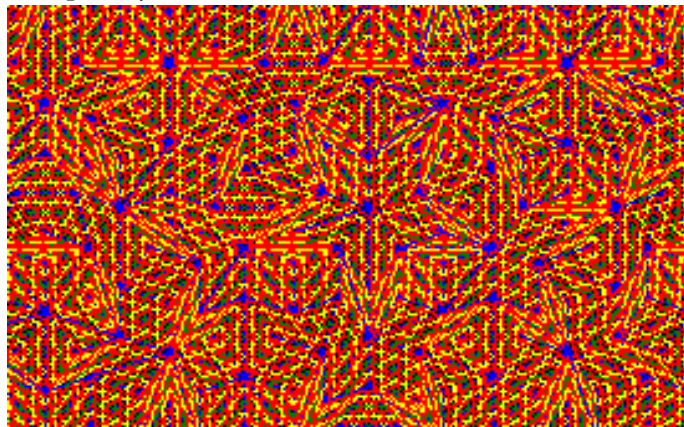
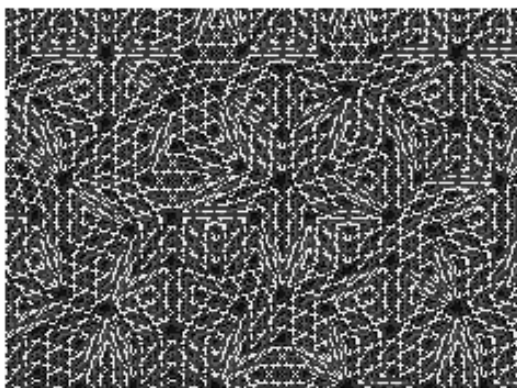
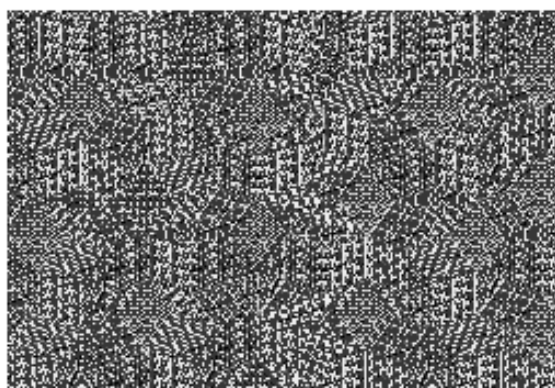


Рисунок 5 – Квазікристалічна фрактальна поверхня з обертальною симетрією п'ятого порядку

На рис. 6 представлені зображення фрактальної поверхні з кількістю ітерацій 4 та 9. Зображення представлені у чорно-білих кольорах, де чорним кольором зазначені області, що не підлягали обробці алгоритмом (найнижчі точки), білим кольором – найвищі точки. З рис. 6 видно, що чим більша кількість ітерацій, тим більше білих точок на зображенні і тим точніше деталізація поверхні.



а)



б)

Рисунок 6 – Приклад фрактальної поверхні на основі мозаїки Пенроуза з різною деталізацією (рисунок інверсовано): а) кількість ітерацій - 4; б) кількість ітерацій – 9

Дослідження кристалічних поверхонь, що згенеровані за допомогою комп'ютерної програми PenroseFS

Для зображень побудованих поверхонь кристалічних та квазікристалічних структур було проведено фрактальний аналіз, що складається із визначення фрактальної розмірності та побудови фрактальних розподілень. Фрактальна розмірність визначалася з використанням методу BOX COUNTING, який є найбільш універсальним та дозволяє працювати із зображеннями будь-якої структури. Для отримання фрактальних розподілень використовується метод

ковзаючого вікна, який полягає у визначенні фрактальної розмірності в межах вікна, розмір якого можна задавати довільно. Вікно попиксельно переміщується по зображенню. При цьому на кожному кроці обчислюється фрактальна розмірність зображення, що потрапило у ковзаюче вікно. Після чого проводиться побудова їх емпіричного розподілу ймовірностей $W(D)/W \max(D)$. Складні зображення після обчислення фрактальних розподілів дають багатомодальні розподіли.

Аналіз кристалічних поверхонь з симетрією різних порядків дозволив визначити їх фрактальні розмірності, побудувати розподілення локальних фрактальних розмірностей. В ході дослідження було визначено зростання фрактальної розмірності із збільшенням кількості ітерацій. При цьому відзначено майже на всіх видах поверхонь незначне зниження значень фрактальної розмірності при кількості ітерацій, що дорівнюють 5 та 6 (табл. 1). Найменше значення фрактальної розмірності при найменшій деталізації поверхні.

Таблиця 1

Фрактальна розмірність кристалічних поверхонь з різним ступенем деталізації

Порядок симетрії кристалічної поверхні	Значення фрактальної розмірності поверхні при побудові в залежності від деталізації поверхні (кількість ітерацій)					
	4	5	6	7	8	9
2-го порядку	1,65	1,81	1,86	1,79	1,85	1,87
3-го порядку	1,58	1,73	1,75	1,67	1,72	1,74
4-го порядку	1,72	1,85	1,85	1,87	1,85	1,85
6-го порядку	1,59	1,72	1,75	1,68	1,72	1,75

На рис. 7 наведено графік зміни значень фрактальної розмірності в залежності від ступеню деталізації поверхні. З графіку видно, що найбільші значення фрактальної розмірності мають кристалічні поверхні 4-го порядку симетрії. Кристалічні поверхні 3-го та 6-го порядку симетрії мають дуже близькі значення фрактальної розмірності. При цьому їх значення фрактальної розмірності менші за кристалічні поверхні 2-го та 4-го порядку симетрії.

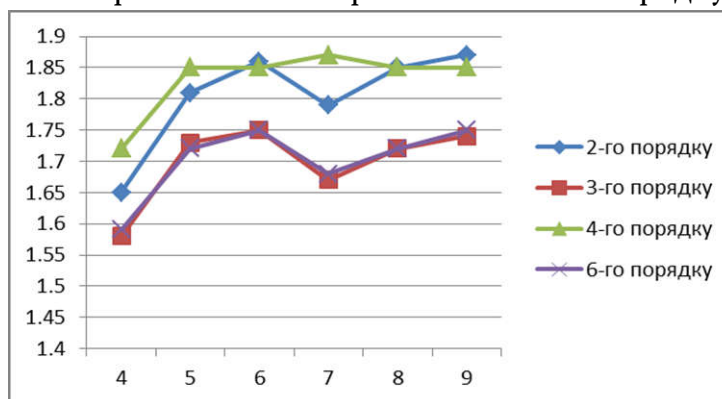
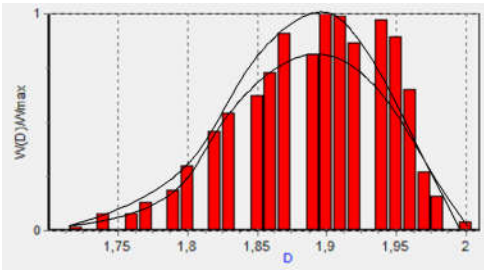
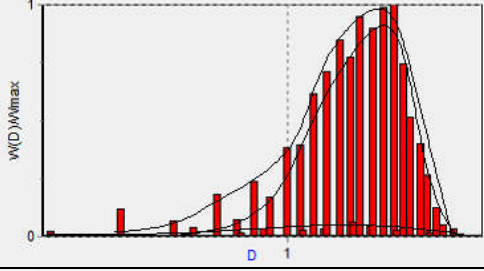
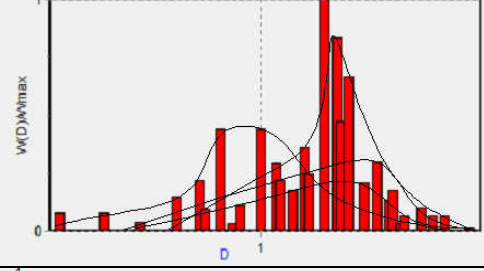
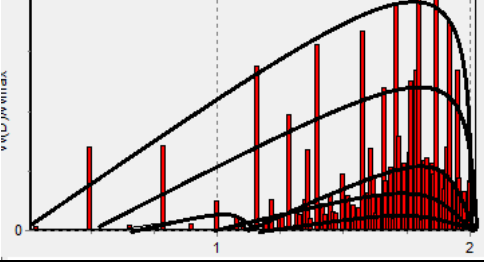


Рисунок 7 – Графік зміни значень фрактальної розмірності в залежності від ступеню деталізації поверхні

Результати досліджень кристалічних структур наведено в табл. 2, з якої видно, що фрактальні розподілення майже для всіх видів поверхонь мають багатомодальний розподіл і широкий розкид значень фрактальної розмірності, який вказує на складні зображення. Фрактальне розподілення кожної із побудованих поверхонь має кількість мод, яка співпадає з порядком симетрії. Таким чином, фрактальні методи дозволяють визначати порядок обертальної симетрії кристалічних матеріалів.

Таблиця 2

Фрактальна розмірність та фрактальні розподілення поверхонь з орієнтаційною симетрією другого, третього, четвертого та шостого порядків

Зображення поверхні	Фрактальні розподілення
Симетрія 2-го порядку 2 моди розподілення	
Симетрія 3-го порядку 3 моди розподілення	
Симетрія 4-го порядку 4 моди розподілення	
Симетрія 6-го порядку 6 мод розподілення	

Дослідження природних поверхонь кристалічних матеріалів на прикладі сніжинок

Будь-яка сніжинка завжди має шість променів. Така форма зумовлена молекулярною будовою води. Вона складається з атома кисню і двох атомів водню. Кожна молекула води є трикутник. Кристали льоду мають форму шестикутника, який складається з таких трикутників (рис. 8а). Цей найперший кристалик і є майбутня сніжинка. Далі він росте за рахунок приєднання нових молекул до кристалику (рис. 8б).

Порядок приєднання нових молекул випадковий, але в підсумку вони шикуються в шестигранники, такі ж, як і перший кристалик (рис. 8в).

Далі у сніжинки почнуть рости відгалуження. Як саме вони будуть виглядати, залежить від температури, вологості, тиску та інших факторів. Кристалики приєднуються один до одного завжди гранню і ніколи кутом, тому промінь сніжинки завжди буде шестикутним (рис. 8г).

Від променя можуть відходити гілки, але вони завжди будуть рости під кутом 60° або 120° (рис. 8д). Так має виглядати ідеальна сніжинка. У реальності величезне скупчення «гілок», які приростають у випадковому порядку, робить кожен сніжинку унікальною [4].

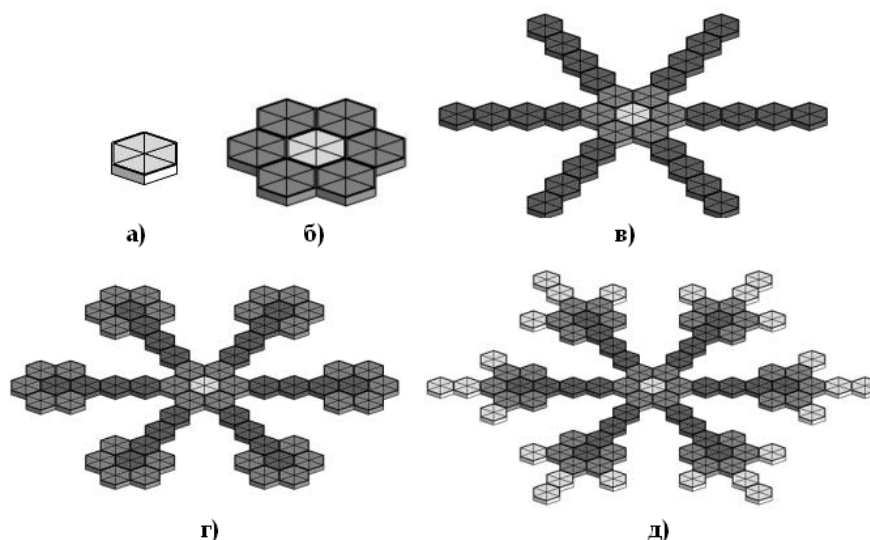


Рисунок 8 - Процес побудови сніжинки

Розглядаючи сніжинки, можна помітити, що жодна з них не повторює іншу. Передбачається, що в одному кубічному метрі снігу знаходиться 350 мільйонів сніжинок, кожна з яких унікальна. Не буває п'ятикутних чи семикутних сніжинок, всі вони мають строго шестикутну форму.

У 1951 році Міжнародна Комісія з Снігу і Льоду прийняла класифікацію твердих опадів. Відповідно до неї всі снігові кристали можна розділити на наступні групи: зірчасті дендрити, пластинки, стовпці, голки, просторові дендрити, стовпці з наконечником і неправильні форми. До них додалися ще три види обледенілих опадів: дрібна снігова крупка, крижана крупка і град.

При дослідженні фрактальних властивостей було проаналізовано близько 50 зображень різноманітних сніжинок, що відносяться до різних груп. При дослідженні фрактальна розмірність мікроструктур визначалася методом BOX COUNTING. Для побудови фрактальних розподілень використовувався метод ковзаючого вікна.

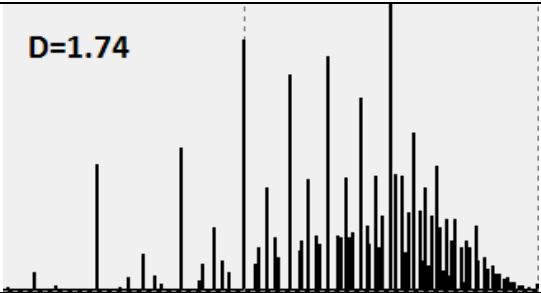
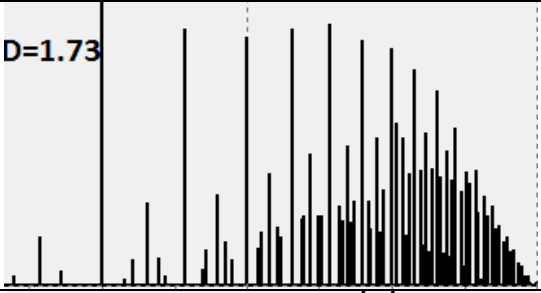
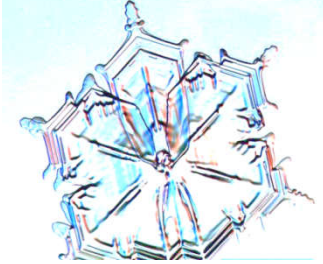
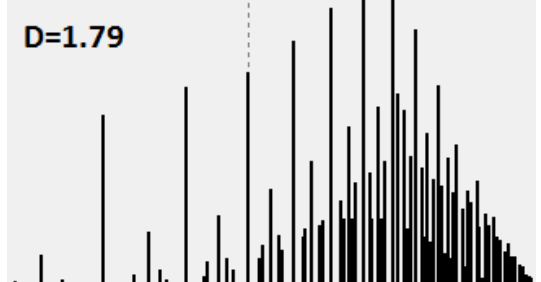
При обчисленні фрактальних властивостей сніжинок було проаналізовано ряд зображень з різними типами сніжинок. В табл. 3-4 представлені результати обчислень фрактальних характеристик сніжинок типу «Пластинки» та типу «Зірчасті дендріти». Для кожного зображення було обчислено фрактальні розмірності та побудовано фрактальні розподілення.

В табл. 3 представлені фрактальні характеристики сніжинок типу «Пластинки». Пластинки – безліч крижаних ребер як ніби ділять лопаті сніжинок на сектора. Вони плоскі і тонкі.

В результаті дослідження було виявлено, що для групи сніжинок «Пластинки» діапазон значень фрактальної розмірності від 1.54 до 1.81, а кількість мод розподілення 6.

Таблиця 3

Фрактальні характеристики сніжинок типу «Пластинки»

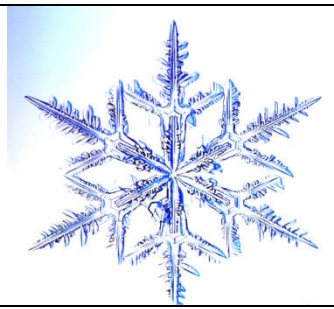
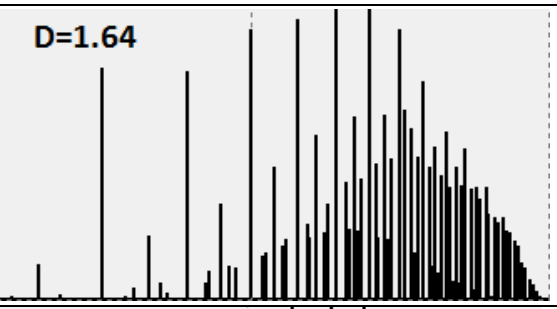
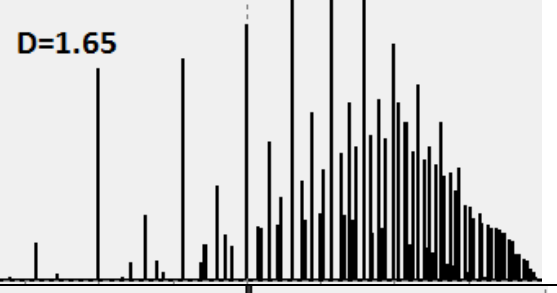
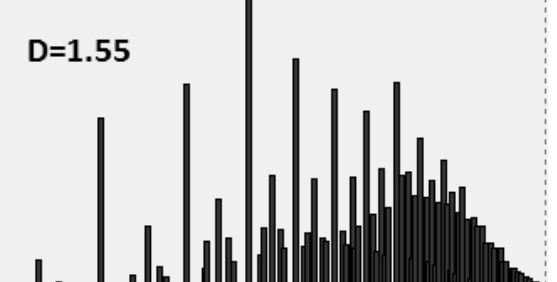
Зображення сніжинок	Фрактальна розмірність та фрактальне розподілення
	D=1.74 
	D=1.73 
	D=1.79 

У таблиці 4 представлені фрактальні характеристики сніжинок типу «Зірчасті дендрити». Зірчасті дендрити - кристал або інше утворення, що має деревоподібну структуру. Вони мають шість симетричних основних гілок і безліч розташованих в довільному порядку відгалужень. Їх розмір - 5 мм і більше в діаметрі, як правило, вони плоскі і тонкі - всього 0.1 мм.

В результаті дослідження було виявлено, що для групи сніжинок «Зірчасті дендрити» діапазон значень фрактальної розмірності від 1.55 до 1.72, а кількість мод розподілення 6.

Таблиця 4

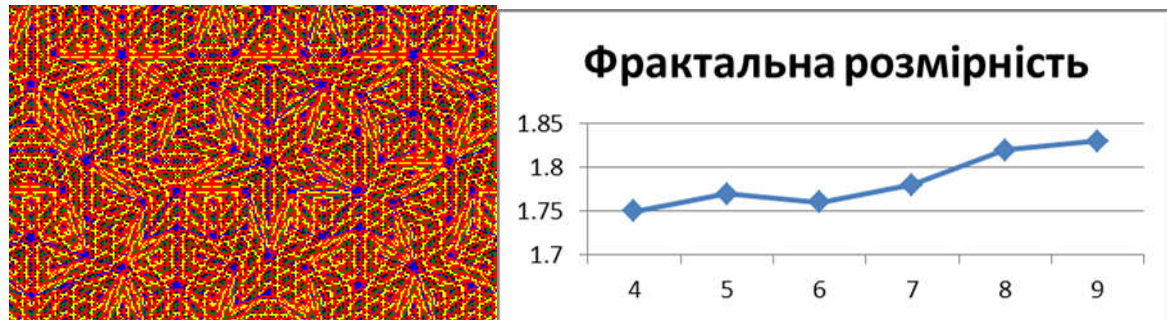
Фрактальні характеристики сніжинок типу «Зірчасті дендрити»

Зображення сніжинок	Фрактальна розмірність та фрактальне розподілення
	D=1.64 
	D=1.65 
	D=1.55 

Дослідження комп'ютерної поверхні квазікристалів

На рис. 9 представлено зображення поверхні Пенроуза, наведено її фрактальні розмірності при кількості ітерацій від чотирьох до дев'яти та побудовано графік залежності фрактальної розмірності від кількості ітерацій, на яких по осі абсцис відкладена кількість ітерацій, а по осі ординат - значення фрактальної розмірності. Графік дає можливість прослідкувати зростання фрактальної розмірності із збільшенням кількості ітерацій. При цьому

спостерігається незначне зниження значень фрактальної розмірності при кількості ітерацій, що дорівнюють 5 та 6.



Деталізація поверхні (кількість ітерацій)	4	5	6	7	8	9
Фрактальна розмірність	1,75	1,77	1,76	1,78	1,82	1,83

Рисунок 9 – Залежність фрактальної розмірності поверхні Пенроуза від кількості ітерацій

На рис. 10 представлено фрактальне розподілення квазікристалічної поверхні Пенроуза. Фрактальне розподілення наведено для поверхні лише при кількості ітерацій, що дорівнює 9, оскільки розподіл локальних фрактальних розмірностей від кількості ітерацій істотно не змінюється. Цей факт говорить про те, що від більшої деталізації поверхні її основні властивості залишаються незмінними.



Рисунок 10 – Розподілення локальних фрактальних розмірностей поверхні Пенроуза

З рис. 9 видно, що фрактальне розподілення квазікристалічної поверхні має багатомодальний розподіл і широкий розкид значень фрактальної розмірності, який вказує на складне зображення. Кожна мода такого розподілу відповідає кластеру зображення, що має близькі значення локальних розмірностей. При цьому слід відзначити, що фрактальне розподілення будь-якої із квазікристалічних поверхонь Пенроуза має п'ять таких мод. Це вказує

на обертальну симетрію п'ятого порядку, яку має мозаїка Пенроуза, а отже – і квазікристалічні поверхні.

Дослідження природної поверхні квазікристалу

Раніше вважалося, що кристалічні речовини не можуть володіти симетрією 5-го порядку. Поширеність же цього типу симетрії у рослин і у голкошкірих використовували як свідчення того, що життя являє якісно інший рівень організації. У 1984 році було зроблено відкриття в мінералогії: виявилось, що метали в склоподібному стані являють собою новий вид впорядкованості атомів. Вони ні кристалічні, ні повністю аморфні; їх назвали квазікристалами. Швидко охолоджений зразок шехтманіта - сплаву алюмінію з марганцем - володіє симетрією 5-го порядку. Таку ж симетрію можна отримати і у багатьох інших металів. Шехтманом, якщо його розплавити і швидко охолодити, утворює гіллясті структури, схожі на снігові пластівці. Однак квазікристали шехтманіта, на відміну від кристалів льоду, мають симетрію не 6-го, а 5-го порядку.

На рис. 11 наведено зображення квазікристалу шехтманіту та наведено зображення фрактального розподілення квазікристалу шехтманіту, яке має 5 мод розподілення. Таку ж кількість мод розподілення мають і квазікристалічні поверхні, згенеровані комп'ютерним шляхом. Фрактальна розмірність квазікристалу шехтманіту має таке ж значення як і комп'ютерна модель квазікристалічної поверхні при найвищому ступені деталізації.

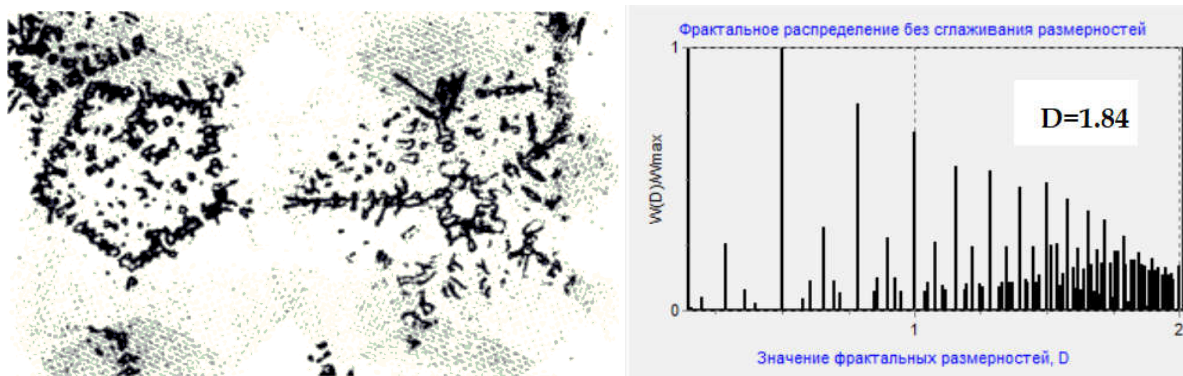


Рисунок 11 – Квазікристал шехтманіту. Фрактальне розподілення та фрактальна розмірність квазікристалу шехтманіту

Висновки

В роботі були досліджені природні та комп'ютерні кристалічні та квазікристалічні фрактальні поверхні. Для кожної поверхні було обчислено фрактальну розмірність та побудовано фрактальне розподілення. В ході досліджень було виявлено, що фрактальні розподілення майже для всіх видів кристалічних та квазікристалічних поверхонь мають багатомодальний

розподіл і широкий розкид значень фрактальної розмірності, який вказує на складні зображення. Фрактальне розподілення кожної із побудованих поверхонь має кількість мод, яка співпадає з порядком симетрії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Журба А.О. Визначення порядку обертальної симетрії кристалічних та квазікристалічних матеріалів з використанням фрактального аналізу / А.О. Журба // Сучасні проблеми металургії. – №16. Дніпропетровськ. - 2013. – С. 63-68.
2. Журба А.О. Дослідження фрактальних властивостей сніжинок / А.О. Журба, Д.І. Журба, О.І. Михальов, О.І. Дерев'яно // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (111). - Дніпро. - 2017. – С. 12-21.
3. Журба А.О., Михальов О.І. Фрактальні характеристики зображень металоструктур та особливості їх обчислення // Системные технологии моделирования сложных систем / Монография под общей редакцией проф. А.И. Михалёва. – Днепр: НМетАУ-ИВК “Системные технологии”, 2016. – С. 299 – 327. ISBN 978-966-2596-19-9.
4. Журба А.О., Пластун Б.О. Дослідження впливу кристалічної решітки на фрактальні розподілення металевих матеріалів // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 15-16 грудня 2020 р.). – Д.: ДІІТ, 2020. – С. 81.

REFERENCES

1. Zhurba A.O. Determination of the order of rotational symmetry of crystalline and quasi-crystalline materials using fractal analysis / A.O. Zhurba // Modern problems of metallurgy. - №16. Dnipropetrovsk. - 2013. - P. 63-68.
2. Zhurba A.O. Investigation of fractal properties of snowflakes / A.O. Zhurba, D.I. Zhurba, O.I. Mikhailov, O.I. Derevyanko // System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works. - Issue 4 (111). - Dnipro. - 2017. - P. 12-21.
3. Zhurba A.O., Mikhalev O.I. Fractal characteristics of images of metal structures and features of their calculation // System technologies of modeling complex systems / Monograph under the general editorship of prof. A.I. Mikhaleva. - Dnipro: NMetAU-IVK “System Technologies”, 2016. - P. 299 - 327. ISBN 978-966-2596-19-9.
4. Zhurba A.O., Plastun B.O. Investigation of the influence of a crystalline lattice on fractal distributions of metal materials // Modern information and communication technologies in transport, industry and education: Abstracts of the XIV International Scientific and Practical Conference (Dnipro, December 15-16, 2020). - D.: DIIT, 2020. - P. 81.

Received 13.01.2021.

Accepted 26.01.2021.

UDC 530.1

A. Zhurba

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CRYSTALLINE LATTICES ON FRACTAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS

In the work, natural and computer crystalline and quasi-crystalline fractal surfaces were investigated. For each surface, fractal dimension was calculated and fractal distribution was constructed.

During the study, PenrouseFS software is developed, which allows the fractal surfaces on crystalline grates with different rotary symmetry and quasi-crystalline lattices. The fractal surfaces of crystalline and quasi-crystalline structures are constructed using a random shear method.

In the course of the work, a numerical number of fractal surfaces of crystalline and quasi-crystalline structures was built using the given method: the crystalline structures of the second, third, fourth, sixth, sixth forms of symmetry and quasi-crystalline structures with a different number of iterations (from 4 to 9), which are responsible for the degree of surface detailation, was constructed. and analyzed their fractal characteristics.

Analysis of crystalline surfaces with symmetry of different orders allowed to determine their fractal dimensions, to construct the distribution of local fractal dimensions. During the study, the growth of fractal dimension with an increase in the number of iterations was determined. In almost all types of surfaces, a slight decrease in the values of fractal dimension in the amount of iterations equal to 5 and 6. is the smallest value of fractal dimension with the smallest detail of the surface.

The greatest values of fractal dimension have crystalline surfaces of the 4th order of symmetry. The crystalline surfaces of the 3rd and 6th order of symmetry have very close fractal dimensions. In this case, their value of fractal dimension is smaller than the crystalline surfaces of the 2nd and 4th order of symmetry.

In the study of fractal properties, about 50 images of a variety of snowflakes belonging to different groups were analyzed. In the study, the fractal dimension of microstructures was determined by the Box Counting method. To construct fractal distributions, a method of sliding window was used.

When calculated fractal properties of snowflakes, a number of images of "plates" and "Star Dendrites" type were analyzed. As a result of the study, it was found that for a group of snowflakes "Plates" range of fractal dimension values from 1.54 to 1.81, and the number of modification modes 6, and for the group of snowflakes "Star Dendrid" range of fractal dimension values from 1.55 to 1.72, and the number of modification modes 6 .

The image of the Quasi crazy-crazinite has 5 modes of distribution. The same amount of distribution mods have a quasi-crystalline surfaces of pentroose generated by a computer route. The fractal dimension of the quasi-crystal of shekhtmanite has the same meaning as a computer model of a quasi-crystalline surface at the highest degree of detail.

During the research, it has been found that fractal distributions almost for all types of crystalline and quasi-crystalline surfaces have a multimodal distribution and a wide spread of fractal dimension values, which indicates complex images. Fractal distribution of each of the built surfaces has a number of mods that coincides with the order of symmetry.

Keywords: fractal dimension, fractal distributions, crystal lattice, quasicrystals, Schechtmanite, rotational symmetry, symmetry order, Penrose mosaic, crystalline and quasicrystalline fractal surface.

Журба Анна Олексіївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Національна металургійна академія України.

Журба Анна Алексеевна – к.т.н., доцент, доцент кафедри информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Zhurba Anna – candidate of technical science, assistant professor, assistant professor Department of information technology and systems, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

РОЗПОДІЛЕНІ АЛГОРИТМИ РОЗВ’ЯЗКУ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ В ЕКСТРЕМАЛЬНІЙ ПОСТАНОВЦІ

Для дослідження теплофізичних властивостей матеріалів за допомогою обернених методів було виведено відповідний клас математичних моделей. Процедура обробки математичних моделей зведена до екстремальної постановки, що дозволило розробити ефективні алгоритми розв’язування коефіцієнтних задач довільного порядку точності. Представлені результати розв’язування тестових задач на основі запропонованого підходу. Виведено додаткові умови, які дозволяють розділити досліджувану проблему на дві задачі: а) температурну; б) потокову. Перша з них дає можливість розв’язувати коефіцієнтну задачу на всьому заданому діапазоні зміни температури за допомогою управляючого параметра у вигляді коефіцієнта дифузії; друга спрямована на визначення коефіцієнтів теплопровідності або теплоємності. Дослідження математичних моделей 1 і 2 проводили із застосуванням методу прямих. Запропоновані моделі дозволяють розв’язувати задачі в екстремальних постановках. Для розв’язання заданих задач методами математичного моделювання розроблено пакет прикладних задач. Створення пакету було здійснено з урахуванням вимог об’єктно-орієнтованого програмування. Процедура моделювання була реалізована на основі застосування багатопроцесорної обчислювальної системи. Пакет прикладних програм призначений для опрацювання теплофізичних експериментів оберненими методами.

Ключові слова: коефіцієнтні задачі, екстремальна постановка, математичні моделі, теплопровідність, теплоємність, теплопередача.

Постановка проблеми

При аналізі перенесення тепла за рахунок теплопровідності точність результатів рішення тієї або іншої задачі може сильно постраждати через недостатності відомості про теплофізичні характеристики системи. З цієї причини важливо виразно уявляти собі фізичний сенс та процес зміни цих характеристик від температури та методів, за допомогою яких вони експериментально визначаються, а також ті обмеження, до яких ці зміни схильні [1 – 3]. До основних теплофізичних характеристик матеріалів, що визначають умови їх теплової обробки, відносяться ентальпія, теплоємність і коефіцієнти тепло- і температуропровідності. Ці параметри входять в рівняння теплопровідності та визначають температурне поле усередині речовини.

Теплофізичні характеристики речовини залежать від великої кількості чинників, тому експеримент є єдиним джерелом отримання цих характеристик [3]. Проте, з появою і розвитком нового напрямку, що дістав назву обернених задач теплопровідності (ОЗТ), стає можливим не лише дослідження форми та змісту математичних моделей, що відбивають феноменологічний опис процесів, але й значне підвищення інформативності теплового експерименту. Отже, безпосередньо обробка результатів експериментальних даних повинна досліджуватися за допомогою того класу задач металургійної теплофізики, які складають групу обернених теплових задач. У багатьох випадках основу математичного забезпечення нестационарних теплових експериментів становлять саме методи розв’язування обернених задач теплопровідності (ОЗТ), серед яких можна назвати визначення граничних теплових режимів, ідентифікацію процесів перенесення тепла і маси, відновлення зовнішніх і внутрішніх температурних полів і т. д. Основною сферою застосування ОЗТ залишається обробка й інтерпретація результатів теплових експериментів. Саме тут було досягнуто найбільших успіхів теоретичного й прикладного характеру з точки зору ефективності методів і широти їх практичного використання.

У даній роботі задача обробки результатів експериментальних даних реалізується зведенням її до екстремальної постановки. Такий підхід полягає в тому, що в цьому випадку шукані причинні характеристики теплообмінного процесу розглядаються як параметри керування, що входять у розв’язок прямих задач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Актуальність проблеми розробки числових методів для розв’язування багатовимірних систем параболічних квазілінійних рівнянь, що описують процеси тепло – і масообміну, можна вважати такою, що не викликає сумнівів. Одним з найцікавіших прикладів таких систем можуть служити рівняння гідродинаміки та металургійної теплофізики [4, 5]. Про масове рішення нестационарних задач високого порядку точності на нинішньому рівні технічної можливості та на базі традиційних методів, розроблених до теперішнього часу, мабуть, можна говорити, тільки враховуючи наступні обставини.

По-перше, поява нових і недорогих засобів комунікації обчислювальної техніки стимулювала розвиток нових інформаційних технологій: структурного програмування, мережевих операційних систем, об’єктно-орієнтованого програмування, систем паралельної обробки інформації і так далі. Організація паралельної обробки інформаційних потоків, зв’язок проблем

розпаралелювання з архітектурою ПЕВМ, системи паралельного програмування, методи і алгоритми паралельних обчислень – ось ключові теми розвитку обчислювальної техніки на цьому етапі [1, 6, 7].

По-друге, до теперішнього часу намітилися певні тенденції щодо розвитку обчислювальних методів із складною логічною структурою, що мають в порівнянні з традиційними скінченно-різницевиими методами вищий порядок точності [8 – 10]. Серйозним прогресом в області розв’язування багатовимірних просторових задач можна вважати ряд пропозицій, не зовсім еквівалентних один одному, але мають одну стереотипну мету – звести задачі тривимірного розподілу області зміни змінних до послідовності схем, що включають невідомі величини лише в одному напрямку, – поперемінно в подовжньому, поперечному і вертикальному. Досить детальна бібліографія цих робіт представлена в [8, 9]. Помітимо, що використання при цьому неявних схем приводить до систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), що мають трьохдіагональну структуру [9]. Таким чином, прийняття за методологічну основу різницеві схеми розщеплювання, по-перше – забезпечує економічну і стійку реалізацію числових моделей методом скалярних прогонів. І, по-друге, відомо, що найбільший ефект від паралельного процесора досягається в тих випадках, коли він застосовується для виконання матричних обчислень лінійної алгебри.

У цій роботі ідентифікація процесів теплопровідності розглядається на прикладі рішення рівнянь теплопровідності в декартовій системі координат для області $y \in [y_0, yL], t \in [0, \infty)$. Очевидно, що при заданих вхідних даних розв’язок цієї задачі досить просто реалізується скінченно-різницевиими методами. Використовуючи неявні схеми за часом і центральні різниці за просторовій змінній, отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) трьохдіагональної структури. Використовуючи метод прогонки, побудуємо економічну різницеву схему рішення прямої задачі. З аналізу цієї алгебраїчної ММ витікає, що для сіткової області визначення шуканої функції $u_p, p = 1, 2, 3, \dots, 2m, m \in Z$ в кожному u_p – му сітковому вузлі в коефіцієнти СЛАР входять дискретні значення $\lambda_{p,1}, C_{p,1}$. Як видно, число невідомих $\lambda_{p,1}, C_{p,1}$ в два рази більше числа сіткових рівнянь. Така незамкнута СЛАР при відомих значеннях температури у вузлах сітки за просторовій змінній може мати нескінченну безліч рішень відносно невідомих $\lambda_{p,1}, C_{p,1}$. Отже, чисто формальний підхід не дозволяє сформулювати рішення коефіцієнтних ОЗТ в даній постановці.

Мета і завдання дослідження

Мета досліджень полягає в тому, щоб для визначення теплофізичних властивостей матеріалів оберненими методами вивести відповідний клас температурних і градієнтних математичних моделей (ММ). Основне завдання досліджень полягає в тому, щоб процедуру обробки ММ як керованих за вхідними параметрами звести, на основі принципу нев'язки, до екстремальної постановки. Такий підхід дозволяє розробити ефективні алгоритми рішень коефіцієнтних задач на ММ довільного порядку точності з адаптацією за часовими режимами теплофізичного експерименту.

Надалі вважатимемо, що одновимірна постановка задач теплопровідності є основною розрахунковою математичною моделлю, для якої мають бути побудовані ефективні розв'язки ОЗТ і алгоритми обробки експериментальних даних з метою визначення теплофізичних характеристик матеріалу.

Викладення основного матеріалу досліджень

Розв'язок поставленої задачі можна отримати у тому випадку, якщо шукані температурні залежності $\lambda(T), C_p(T)$ локалізувати в квадрантах у вигляді кусочно-сталих залежностей від температури, як за просторовій змінній, так і за часом, а в якості ММ сконструювати температурну та градієнтну залежності. Покажемо, що для кожного такого просторово-часового квадранта замкнуті рішення початкової диференціальної задачі досить ефективно будуються на рішеннях задачі Коші :

$$T_{p+\varepsilon_{x,1}}(\varepsilon_t, \varepsilon_y) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{\varepsilon_y^{2n}}{(2n)!} \frac{1}{a_p^n} \frac{d^n T_{p,1}(\varepsilon_t)}{d\varepsilon_t^n} - \left(\frac{1}{\lambda_p} \right) \frac{\varepsilon_y^{2n+1}}{(2n+1)!} \frac{1}{a_p^n} \frac{d^n T_{p,2}(\varepsilon_t)}{d\varepsilon_t^n} \right\}, \quad (1)$$

де $p = \overline{1, 2m-1}$ – номери сіткових вузлів по просторовій області $y \in [y_0, y_L]$; $T_{p,1}(\varepsilon_t), T_{p,2}(\varepsilon_t)$ – дані Коші (температурні та потокові), які задані у вузлах сіткової області при $\varepsilon_y = 0$; a_p – безрозмірний сітковий коефіцієнт теплопровідності ($a_p = \frac{\lambda_{p,1}}{CV_{p,1}} \frac{Dt_1}{Dy_1^2}$). Просторова та часова змінні в (1) нормовані залежностями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{y - y_p}{y_{p+1} - y_p} \in [-1, 1] \\ \varepsilon_t &= \frac{t - t_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \in [0, 1] \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Для p – x сіткових вузлів, розподілених рівномірно, розв'язок задачі Коши дозволяє побудувати замкнуті математичні моделі відносно невідомих даних Коші у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь (СЗДУ). Поклавши в (1) $\varepsilon_y = \pm 1$ отримаємо СЗДУ N -го порядку:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=0}^N \frac{1/a_p^n}{(2n)!} T_{p,1}^{(n)}(\varepsilon_t) &= \frac{1}{2} (T_{p+1,1}(\varepsilon_t) + T_{p-1,1}(\varepsilon_t)) \\ -\frac{1}{\lambda_p} \sum_{n=0}^N \frac{1/a_p^n}{(2n+1)!} T_{p,2}^{(n)}(\varepsilon_t) &= \frac{1}{2} (T_{p+1,1}(\varepsilon_t) - T_{p-1,1}(\varepsilon_t)) \end{aligned} \right\}, \quad N \in Z, \quad (3)$$

безперервних в часовій області. Наприклад, при $N = 1$ отримаємо СЗДУ першого порядку у формі Коши, де праві частини будуть відомими функціями часу. В цьому випадку рішення доцільно побудувати в кусочно - аналітичному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} T_{p,1}(\varepsilon_t) &= T_{p,1}^*(\varepsilon_t) + (T_{p,1}(0) - T_{p,1}^*(0)) e^{-2a_p \varepsilon_t} \\ T_{p,2}(\varepsilon_t) &= T_{p,2}^*(\varepsilon_t) + (T_{p,2}(0) - T_{p,2}^*(0)) e^{-6a_p \varepsilon_t} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де $\{T_{p,1}^*(\varepsilon_t), T_{p,2}^*(\varepsilon_t)\}$ – частинний розв'язок неоднорідних рівнянь, $\{T_{p,1}(\theta), T_{p,2}(\theta)\}$ – відомі початкові дані. У загальнішому випадку, для довільного значення цілочисельного параметра N , від диференціальних рівнянь (3) доцільно перейти до нормальних СЗДР першого порядку, що мають форму Коші. Таким чином, процедура інтегрування рівняння в частинних похідних зведена нами до інтегрування СЗДР першого порядку у формі Коши, які можуть бути використані при рішенні коефіцієнтних задач як керовані ММ відносно коефіцієнтів тепло- і температуропровідності. Слід підкреслити також, що включення в ММ значення цілочисельного параметра N , як вхідної величини, дозволяє конструювати ММ з довільним порядком точності та адаптацією за порядками апроксимації.

Зведення проблеми визначення теплофізичних властивостей матеріалів до екстремальної постановки. Одним із перспективних напрямів опрацювання задач теплообміну оберненими методами є зведення їх до екстремальних постановок з використанням числових методів теорії оптимізації. У точній екстремальній постановці визначення параметрів $\lambda_{p,1}, C_{\nu p,1}$ на ММ (3) або (4) відповідатиме мінімізації нев'язок у вигляді функціоналів:

$$\left. \begin{aligned} J_{p,1}(R) &= \left(T_{p,1}(\varepsilon_t, R) - f(\varepsilon_t, R) \right)^2 \\ J_{p,2}(R) &= \left(T_{p,2}(\varepsilon_t, R) - Q(\varepsilon_t, R) \right)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де R – шукані параметри управління.

Величини $J_{p,1}, J_{p,2}$ в просторі L_2 за такої постановки можна розглядати як функції змінних R . Їх числове значення визначає відстань у функціональному просторі L_2 між заданими $f(\varepsilon_t, R), Q(\varepsilon_t, R)$ величинами, відомими з експерименту та модельованими $T_{p,1}(\varepsilon_t, R), T_{p,2}(\varepsilon_t, R)$ за керованими ММ (3,4).

У кожному конкретному випадку можна з якоюсь достовірністю на основі апріорної інформації описати деяку допустиму безліч вхідних параметрів R . Тоді, якщо розглядати ММ як керовані, то параметри управління слід підібрати так, щоб функціонали (5) були мінімальними. Якщо допустимі інтервали зміни параметрів управління покрити сітковими вузлами R_v , то при заданих їх значеннях функціонали (5) можуть бути обчислені. Таким чином, послідовність $\{J(R_v)\}$ мінімізуючою, якщо границя $J(R_v), v = 1, 2, \dots$ дозволяє визначити його мінімум. При цьому в околиці мінімуму значення функціонала може бути представлене розкладанням в ряд Тейлора:

$$J_{v+\varepsilon_q}(q) = J_{v,1} + \varepsilon_q J_{v,2} + \varepsilon_q^2 J_{v,3} + \dots, \quad (6)$$

де $\varepsilon_q = \frac{R - R_v}{R_{v+1} - R_v}$ – нормований аргумент функції; $J_{v,2}, J_{v,3}, \dots$ – тейлорівські компоненти першого та другого порядку.

Зберігши в розкладанні (6) троє доданків і скориставшись центральними різницями для тейлорівських компонент

$$\left. \begin{aligned} J_{v,2} &= \frac{1}{2} (J_{v+1,1} - J_{v-1,1}) \\ J_{v,3} &= \frac{1}{2} (J_{v+1,1} + J_{v-1,1} - 2J_{v,1}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

після визначення похідної та прирівнюванню її значення нулю, виникає можливість побудови інтерполяційної формули:

$$R = R_v - \frac{1}{2} (R_{v+1} - R_v) \frac{J_{v+1} - J_{v-1}}{J_{v+1} + J_{v-1} - 2J_v}, \quad (8)$$

за якими можна організовувати ітераційний цикл. З цього алгоритму виходить, що як тільки буде встановлений відрізок відділення шуканого параметра управління $\{R_{p+1}, R_{p-1}\}$, на якому нев'язка у функціоналі (5) змінює знак, то подальше уточнення параметра управління при рішенні ОЗТ може бути уточнене рекурентно за формулою (8) з будь-якою наперед заданою точністю.

Експериментальні дані і їх обробка. Важливим етапом досліджень стала розробка пакету прикладних програм (ППП) для розв’язування коефіцієнтних задач теплопровідності методами математичного моделювання [10]. Створення пакету виконане з урахуванням вимог об’єктно-орієнтованого програмування. Процедура моделювання була реалізована на основі застосування багатопроцесорної обчислювальної системи [11]. Пакет прикладних програм призначено для обробки теплофізичних експериментів оберненими методами. Основною метою, яка ставилася при його створенні, було надання практичної допомоги дослідникові на усіх етапах обробки експериментальних даних.

У цьому розділі досліджень розглядаються додаткові умови, які дозволяють розділити досліджувані задачі на дві – температурну та потокову. Перша з них дає можливість розв’язувати коефіцієнтні задачі в усьому заданому діапазоні зміни температури з параметром управління у вигляді коефіцієнта температуропровідності (модель 1), друга – у вигляді коефіцієнтів теплопровідності або теплоємності (модель 2). Такий підхід відповідає класичним методам технічної теплофізики. Дослідження математичних моделей 1 і 2 проведено із застосуванням методу прямих. При цьому модель 1 (наприклад, алгебраїчна або функціональна) і модель 2 (градієнтна) дозволяють розв’язувати коефіцієнтну задачу в екстремальній постановці. В якості тестового завдання було запропоновано визначення теплофізичних властивостей конкретного промислового матеріалу [3]. Досліджувалися властивості коксу, виготовленого з газового вугілля. Для цього моделювали температурне поле зразка, що має форму циліндра. При розв’язуванні такої коефіцієнтної задачі застосовувалися наступні початкові дані: коефіцієнт температуропровідності $a_0 = a$, $N = 5$. Результати моделювання, виконаного засобами багатопроцесорної обчислювальної системи, представлені на рисунку 1. Розв’язок коефіцієнтної задачі проводилося з управлінням відносно обезрозміреного коефіцієнта температуропровідності при $R = a / a_0$. З аналізу результатів моделювання (рисунок 1) виходить, що мінімум нев’язки відповідає значенню параметра $R \approx 1$. Точне ж значення параметра управління $R = 1$. Для задачі теплопровідності за табличними даними $\lambda = 0.16$. Ідентифікація такого параметра відображена на рисунку 2.

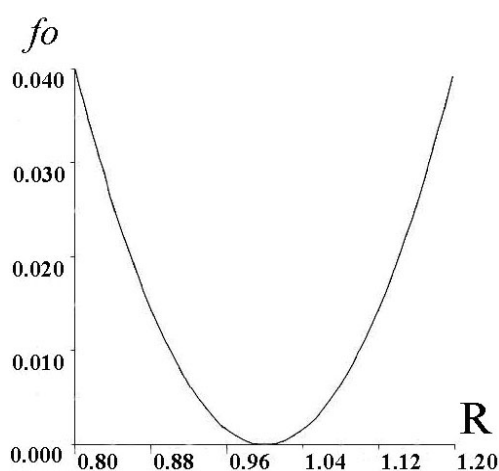


Рисунок 1 – Графік результатів розрахунку коефіцієнтної задачі при $R = a/a_0$ з параметром управління відносно коефіцієнта температуропровідності

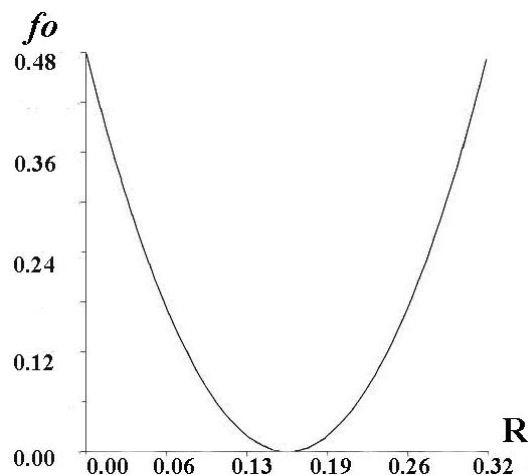


Рисунок 2 – Графік результатів розрахунку коефіцієнтного завдання при $R = \lambda$ з параметром управління відносно коефіцієнта теплопровідності

Розроблений алгоритм розв’язування коефіцієнтної задачі можна вважати задовільним, оскільки його варіант з використанням точних вхідних даних абсолютно співпадає з точним результатом аналітичного розв’язку, а похибки результатів розрахунку відновлюваних причинних характеристик, в яких врахована похибка вхідних даних, приблизно дорівнюють похибці вихідних даних.

Висновки

Розв’язок оберненої коефіцієнтної задачі в запропонованій постановці зводиться до прямого визначення послідовностей значень функціоналів (5) на математичних моделях (3) і обчислення в них мінімальних носіїв $J_{\min}$. Процедура визначення $J_{\min}$ може бути реалізована за допомогою простого сортування або за зміною знаку $J^*(a) \cdot J^*(b)$ на відрізку $R=a, R=b$, де для лінійного значення функціонала (5) ($a < b$). Зрозуміло, що $J^*(R)=0$ на відокремленому відрізку $R \in [a, b]$ матиме корінь. Уточнення значень цього кореня може бути реалізоване з будь-якою наперед заданою точністю за залежністю (8) або, наприклад, за допомогою методу хорд або дотичних.

Помітимо, що розбиття повного часового інтервалу на самостійні інтервали з рішенням обернених задач в кожному з них за вказаною вище схемою дозволяє визначити значення шуканих параметрів як функцій температури $T_{p,1}(T)$. Тому наступний етап обробки експериментальних даних полягає в побудові температурних залежностей $\lambda_{p,1}(T), C_V(T)$ у вигляді деяких

поліноміальних розкладань деяких порядків методом математичного планування та регресійного аналізу. На цьому етапі для перевірки та встановлення адекватності доцільно використовувати дискретну нелінійну математичну модель на повному просторово-часовому інтервалі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Информационная система интеллектуальной поддержки принятия решений для процесса прокатки [Текст] / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, А.В. Соболенко, Д.В. Протопопов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 3. – С. 4 – 9.
2. Коздоба, Л. А. Вычислительная теплофизика [Текст] / Л.А. Коздоба. – Киев: Наук. Думка, 1992. – 224с.
3. Теплофизические свойства промышленных материалов: [Справочник] / [К. Д. Ильченко, В. А. Чеченев, В. П. Иващенко, В. С. Терещенко]. – Днепропетровск: Січ, 1999. – 152 с.
4. Роуч, П. Вычислительная гидромеханика [Текст] / П. Роуч; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
5. На, Ц. Вычислительные методы решения прикладных граничных задач [Текст] / Ц. На; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 296 с.
6. Воеводин, В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах [Текст] / В.В. Воеводин. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
7. Системы параллельной обработки: Пер. с англ. [Текст] / Под редакцией Д. Ивенса. – М.: Мир, 1985. – 416 с.
8. Яненко, Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики [Текст] / Н.Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.
9. Ковеня, В. М. Метод расщепления в задачах газовой динамики [Текст] / В. М. Ковеня, Н. Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 304 с.
10. Швачич, Г.Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроцессорных параллельных вычислительных систем [Текст] / Г.Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2008. – № 1 (18). – С. 60 – 65.
11. Швачич, Г.Г. ППП исследования решений некоторого класса задач нестационарной теплопроводности [Текст] / Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин, Д.В. Протопопов // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. трудов НМетАУ в 2-х кн. – Кн. 2. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – С. 448 – 453.
12. Башков, Є.О. Високопродуктивна багатопроцесорна система на базі персонального обчислювального кластера [Текст] / Є.О. Башков, В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. Серія “Проблеми моделювання та автоматизації проектування”. – Вип. 9 (179). – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – С. 312 – 324.

REFERENCES

1. Ivashchenko, V.P., Shvachych, G.G., Sobolenko, A.V. & Protopopov, D.V. (2003). Informative system for the intellectual support in making decision for the rolling process. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 4 – 9.
2. Kozdoba, L. (1992). Computing thermophysics. Kyiv: Scientific conception, 224.
3. Il'chenko, K.D., Chechenev, V.A., Ivashchenko, V.P. & Tereshchenko, V.S. (1999). Thermophysical properties of industrial materials. Dnepropetrovsk: Cut, 152.
4. Rouch, P. (1980). Computing hydromechanics. Moscow: The World, 616.
5. Na, C. (1982). Computing methods for solving applied boundary problems. Moscow: The World, 296 c.
6. Voevodin, V.V. (1986). Mathematical models and methods in parallel processes. Moscow: Science, 296.
7. Ivens, D. (1985). Systems of the simultaneous processing. Moscow: the World, 416.

8. Yanenko, N.N. (1967). Method of fractional steps in solving multidimensional problems of mathematical physics. Novosibirsk: Science, 196.
9. Kovenya, V. M. (1981). Splitting method in the problems of gas dynamics. Novosibirsk: Science, 304.
10. Shvachych, G.G. (2008). Mathematical simulation of one-class problems in metallurgical thermophysics on the basis of the multiprocessor parallel computing systems. The Mathematical design, 1(18), 60-65.
11. Shvachych, G.G., Shmukin, A.A. & Protopopov D.V. (2005). Packages of solving some problems in the field of non-stationary heat conductivity. Metallurgical of thermotechnics: Proceedings of NMetAU, 448 – 453.
12. Bashkov, E.O., Ivashchenko, V.P. & Shvachych, G.G. (2011). High-productive multiprocessor system on the basis of the personal computing cluster. Proceedings of the National technical university of Donetsk. – Ser. “Problem of simulating and computer-aided design, 9(179), 312 – 324.

Received 19.01.2021.

Accepted 01.02.2021.

UDK 681.3.012:621.1

V. Ivashchenko, G. Shvachych, O. Ivashchenko

DISTRIBUTED ALGORITHMS FOR SOLVING APPLIED PROBLEMS IN AN EXTREME SETTING

The corresponding class of mathematical models was derived from studying the thermophysical properties of materials using inverse methods. It was shown that one-dimensional formulation of thermal conductivity problems is the primary computational mathematical model, which requires building effective solutions of the inverse thermal conductivity problem and algorithms for processing experimental data to determine the material's thermophysical features. The processing mathematical models procedure is reduced to an extreme formulation allowing to development of practical algorithms for solving coefficient problems of arbitrary order of accuracy. Herein, the algorithm's variety of accurate input data entirely coincides with the exact result of analytical solutions, and the computational results errors of the recoverable causal features, including the input data error, are approximately equal to the original data errors. The paper presents the results of solving test problems based on the proposed approach. Additional conditions are derived, dividing the studied problem into two tasks: a) temperature; b) streaming. The first allows solving the coefficient problem over the entire given range of temperature changes by the control parameter as the diffusion coefficient (model 1); the other aims at determining the coefficients of thermal conductivity or heat capacity (model 2). Studies of mathematical models 1 and 2 were performed by the direct method. The proposed models allow solving problems in extreme situations. That approach is that the heat transfer process' desired causal features are considered the control parameters that are part of the direct problems solution. To solve the given problems by mathematical modeling methods, we developed a package of applied problems, which primary purpose was to provide practical assistance to the researcher at all experimental data processing stages. The package covered the requirements for object-oriented programming. The simulation procedure was implemented

based on the multiprocessor computing system. The application package is designed to process thermophysical experiments by inverse methods.

Keywords: coefficient problems, extreme formulation, mathematical models, thermal conductivity, thermal conductivity, heat transfer.

Іващенко Валерій Петрович – доктор технічних наук, професор, перший проректор, Національна металургійна академія України.

Швачич Геннадій Григорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки, Національна металургійна академія України.

Іващенко Олена Валеріївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки, Національна металургійна академія України.

Иващенко Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Национальная металлургическая академия Украины.

Швачич Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и вычислительной техники, Национальная металлургическая академия Украины.

Иващенко Елена Валерьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и вычислительной техники, Национальная металлургическая академия Украины.

Ivashchenko Valery – Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Shvachych Gennady – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Applied Mathematics and Computer Science, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Ivashchenko Olena – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecture of the Department Applied Mathematics and Computer Science, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

ВПЛИВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ВИЛИВКА НА ЕВОЛЮЦІЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДЕФЕКТІВ

Формування властивостей заготовок під час заливання та кристалізації рідкого розплаву вимагає застосування ефективних критеріїв комплексної оцінки деградації матеріалу при формоутворенні виливків. Запропоновано застосувати метод ЛМ-твердості та критерій технологічної пошкоджуваності для аналізу структурних змін при виготовленні литих заготовок, згідно якого визначається схильність матеріалу до формування технологічних дефектів за ступенем розсіювання характеристик твердості матеріалу на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Показано доцільність використання розробленої методики при аналізі впливу розміщення конструктивних елементів виливка із алюмінієвого сплаву на прогнозування розвитку структурних дефектів і неоднорідностей у матеріалі виробу.

Ключові слова: заготовка, виливок, життєвий цикл виробу, технологічний процес, технологічне успадковування, гомогенність, технологічна пошкоджуваність

Постановка проблеми

Експлуатаційні характеристики та показники надійності виробів разом із регламентованими технічними умовами (ТУ) їх параметрами якості тісно пов'язані з важливими етапами та стадіями життєвих циклів деталей машин [1, 2]. Еволюція технології машинобудування базується на таких основних напрямках [3]: розроблення наукових основ цілеспрямованої формозміни заготовки; економія дорогих матеріалів, забезпечення експлуатаційних характеристик та показників надійності виробів; скорочення етапу технологічної підготовки виготовлення нових виробів при дотриманні ТУ; моделювання технологічних процесів механічного оброблення деталей і складання машин тощо. Істотні розбіжності між прогнозованими та реальними значеннями функціональних параметрів поведінки виробів на важливих етапах і стадіях їх життєвих циклів свідчать про нефективність вирішення поставлених проблем лише за допомогою теоретичних методів [1, 2]. Відзначається [4, 5], що дослідження фізичних процесів зношування, втоми, корозії тощо у поєднанні із імовірнісними методами є найраціональнішим напрямком подальшого розвитку технологічного забезпечення параметрів якості виробів, їх експлуатаційних характеристик і показників надійності.

На сьогоднішній день не завжди ефективними є існуючі критерії комплексної оцінки деградації матеріалу виробу як при його виготовленні, так і при подальшій експлуатації із врахуванням спадкових властивостей матеріалу у технологічному ланцюжку заготовка-кінцевий виріб [6].

Відсутність раціонального критерію комплексної оцінки деградації матеріалу виробу є особливо відчутною на етапі виробництва заготовок виробів. Недосконалою є традиційна методика вибору заготовки при розробленні технологічних процесів, що зводиться до порівняння альтернативних методів отримання заготовки за критерієм технологічної собівартості, нехтуючи сформованими в заготівельних цехах відправними експлуатаційними характеристиками деталей машин. В сучасній науково-технічній літературі недостатньо враховується роль заготівельних операцій і при аналізі впливу технологічної спадковості на параметри якості кінцевого виробу. Відправну структуру та початкові властивості заготовок потрібно розглядати в тісному взаємозв'язку із спадковістю металу, починаючи із виплавки розплаву. Першим етапом виготовлення будь-якої заготовки є отримання виливків на металургійному підприємстві. Відомо, що усього 25 % властивостей вихідної шихти передається заготовці, а близько 75 % формується під час заливки та кристалізації при охолодженні [3, 6]. Технологічні фактори, що виникають у відправному металургійному процесі і при здійсненні ковальсько-штампувальних і термічних операцій у кузні, проходять в подальшому через повний технологічний ланцюг формозміни виробів і суттєво впливають на формування необхідних експлуатаційних характеристик виконавчих поверхонь [3].

Розроблення та дослідження раціональних критеріїв комплексної оцінки деградації матеріалу виробу по технологічному ланцюжку відправна заготовка-кінцевий виріб інтенсифікувало б роботи стосовно створення науково обґрунтованої методології із ефективним керуванням усього циклу робіт з проектування та вдосконалення взаємозв'язків заготовка (виріб) – технологічна система.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботах [1, 2, 7, 8] встановлено, що локальна природа руйнування в процесі зняття шару металу лезовою обробкою визначає потребу в аналізі процесу накопичення технологічних дефектів у матеріалах і сплавах при їх механічному обробленні та прогнозування їх «переродження» у технологічні пошкодження при несприятливих умовах експлуатації виробів. Загалом процес руйнування включає такі етапи [9]:

- 1) нагромадження дефектів, формування технологічних пошкоджень і порушення цілісності матеріалу у полі дії напружень та деформацій;
- 2) розвиток мікротріщин у дефектному середовищі;

3) розвиток тріщин і відокремлення частинок матеріалу при заданих на межах заготовки питомих навантаженнях і переміщеннях.

Під пошкоджуваністю розуміють еволюційний процес нерівномірної зміни геометричної форми і розмірів контактуючих поверхонь спряжених деталей, структури і властивостей матеріалу поверхневих шарів. Наслідком пошкоджуваності є пошкодження, що характеризується зміною структури, геометричних і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів виробу під час його експлуатації [10, 11].

Для механіки пошкоджуваного середовища справедлива математична залежність [12]:

$$\tilde{M} = M / (1 - D_M), \quad (1)$$

де M , $\tilde{M}$ – відповідно величини істинної та ефективної властивостей оброблюваного матеріалу виробу; D_M – кінетика накопичення пошкоджень (пошкоджуваність) для заданої властивості матеріалу деталі.

У класичних роботах механіки, що описують пошкоджуваність виробів, її формування не пов'язують із структурою матеріалів. Лише при застосуванні енергетичних концепцій для опису процесів нагромадження пошкоджень встановлено [9], що в результаті в'язко-пластичної деформації формуються два види мікропошкоджень – по тілу і по границях зерен.

Визначальну роль у формуванні технологічних пошкоджень і процесах міжзеренного руйнування сплавів мають великокутові границі зерен. Вплив меж розподілу різного походження на процеси деформування та руйнування сплавів є невивченим. Значною мірою це пояснюється неврахуванням в існуючих моделях меж зерен будови і структурно-фазового стану приграничних зон зерен [13].

У практиці матеріалознавства та технології машинобудування відомі методи оцінки ступеню пошкоджуваності матеріалу на підставі напрацювання за результатами як прямих (методи виважування, металографії тощо), так і непрямих (омічного опору, акустичної емісії тощо) вимірювань механічних характеристик металу без руйнування [14]. Застосування вказаних способів для оцінювання деградації матеріалу в результаті накопичення пошкоджень під час напрацювання супроводжується великими похибками, оскільки взаємозв'язок між вимірюваними параметрами та характеристиками структурно-фазового стану для широкої номенклатури матеріалів неоднозначний та ґрунтовно не вивчений.

З відомих методів оцінки найпридатнішим за своїм технічним змістом є спосіб вимірювання твердості матеріалу виробу на визначених стадіях напрацювання. Після цього, враховуючи кореляції механічних характеристик, зокрема твердості, із параметрами структури, оцінюють ступінь

пошкоджуваності матеріалу. Даний спосіб є неінформативним і неточним, оскільки між твердістю матеріалу та його технологічною пошкоджуваністю кореляція слабка та не завжди однозначна [13].

Поряд з тим при вирішенні прикладних інженерних завдань застосовують метод ЛМ–твердості, розроблений під керівництвом академіка А.О. Лебедева. Характерною особливістю методу ЛМ–твердості є використання для аналізу пошкоджуваності матеріалу не абсолютного значення, а ступеня розсіювання характеристик механічних властивостей матеріалу на зруйнованих зразках після напрацювання при різних рівнях напружень. Даний метод найпростіше реалізувати, використовуючи як механічну характеристику твердість, значення якої застосовують для непрямої оцінки властивостей матеріалів [14-17].

Параметром, що інтегрально характеризує стан матеріалу під час опрацювання результатів вимірювань твердості, є гомогенність, яка оцінюється за коефіцієнтом Вейбулла (m) [14, 16]:

$$m = \frac{d(n)}{2.30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (2)$$

де $d(n)$ – параметр, що визначається кількістю вимірювань n ;

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (3)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (4)$$

Аналіз деградації властивостей матеріалу деталей машин проводять також при застосуванні коефіцієнта варіації [14, 16]:

$$v = \frac{1}{\bar{H}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}}, \quad (5)$$

де $\bar{H}$ – середнє значення твердості.

Для аналізу фактичної пошкодженості матеріалу виробів в результаті перетворення технологічних дефектів у технологічні пошкодження при несприятливих умовах експлуатації авторами [15, 17] запропоновано параметр Δm , а для оцінки інтенсивності зростання пошкодженості – характеристику δ :

$$\Delta m = \frac{m_n - m_{nm}}{m_n}, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{m_n - m_{nm}}{m_{nm}}, \quad (7)$$

де m_n , m_{nm} – значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m), виміряні відповідно для початкового і поточного стану матеріалу виробу.

При механічному обробленні виробу за відомим розподілом коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) доцільно аналізувати деградацію структури матеріалу за його технологічною пошкоджуваністю D [6, 11, 13]:

$$D = 1 - \frac{m_i}{m_{matr.}}, \quad (8)$$

де m_i – значення коефіцієнта Вейбулла для i -го із n перерізів; $m_{matr.}$ – значення коефіцієнта Вейбулла для основного матеріалу виробу.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є дослідження впливу конструктивних елементів виливка для .

Викладення основного матеріалу дослідження

З огляду на складнощі теоретичних методів аналіз впливу конструктивних елементів виливка на деградацію структури його матеріалу проведено на підставі експериментальних досліджень.

Підготовка та реалізація експериментальних досліджень

В піщано-глинясту форму було відлито плоску заготовку із розмірами 165x155x22 мм з матеріалу АК21М2.5Н2.5 ГОСТ 1853–93 (табл. 1, рис. 1). Край виливка, його випори і ливник було відрізано пилою при подачі МОР у зону різання. Температурний режим охолодження виливка – 690-710° С.

Таблиця 1

Хімічний склад матеріалу виливка

Хімічний елемент	Відсоток, %	Хімічний елемент	Відсоток, %
Al	70.953±0.080	Mn	0.255±0.008
Si	23.219±0.078	Cr	0.184±0.008
Cu	2.895±0.012	S	0.114±0.007
Fe	1.119±0.011	Ni	0.084±0.003
Zn	1.096±0.006	Ti	0.083±0.013

Після кристалізації виливка профрезерували його базову поверхню на вертикально-фрезерному верстаті мод. 6P12 кінцевою фрезою Ø 30 мм. Окрім того розділили відправну заготовку на три зразки з концентраторами напружень: з ливником, малим і великим випорами (рис. 2). Метою експериментальних досліджень було встановити вплив розміщення ливника та малого випора на еволюцію технологічних дефектів у матеріалі від поверхні до матриці та виявити дефектний шар із максимальною кількістю технологічних пошкоджень, що підлягає видаленню у стружку.

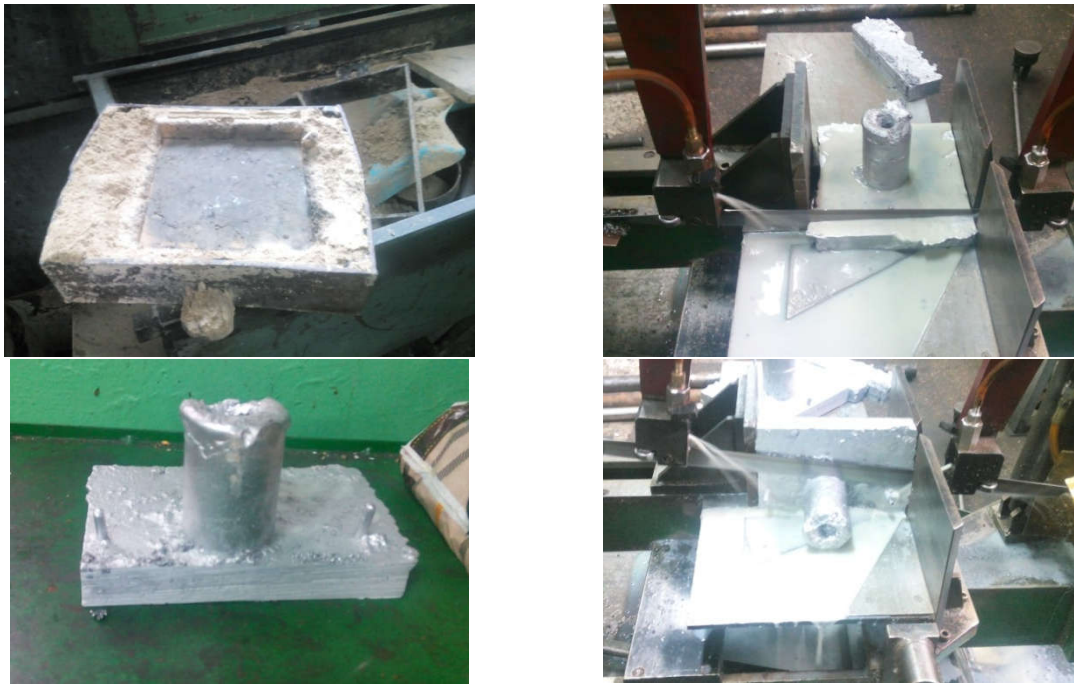


Рисунок 1 – Технологічний процес виготовлення виливка у піщано-глинястій формі

Торцеві сторони 1 і 2 зразків (рис. 2) двічі по чергово фрезерували на універсально-фрезерному верстаті мод. 676 ($B=2$ мм; $t=45$ мм; $S_{хв.}=42$ мм/хв; $n=640$ хв⁻¹) кінцевою фрезою $\varnothing 45$ мм ($z=2$). Після кожного фрезерування вимірювали твердість у п'яти перерізах (по 30 значень) на відстанях 2, 4, 7, 12, 17 мм від поверхні виливка. Вимірювання здійснювали на приладі ТР-5006 ГОСТ 23677-79 за шкалою Н за допомогою кульки $\varnothing 3.175$ з навантаженням 588.4 Н за стандартною методикою [6, 18].

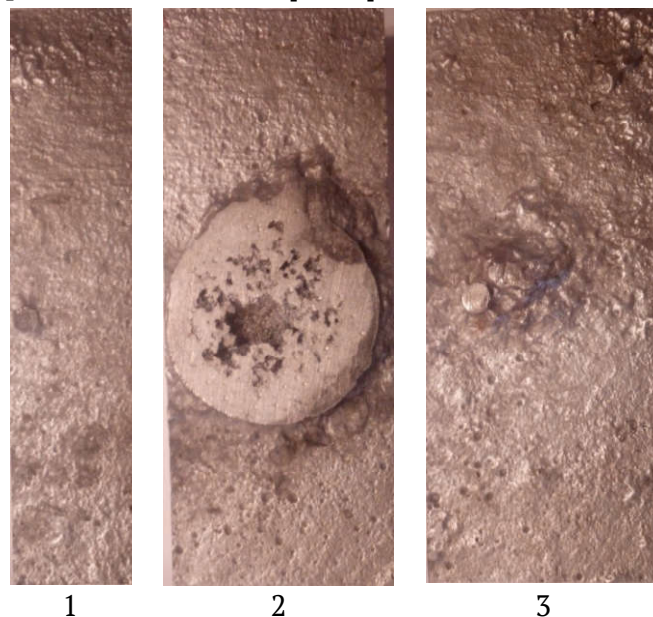


Рисунок 2 – Зразки для експериментальних досліджень:
№ 1– з малим випором; № 2– з ливником; № 3– з великим випором

Статистичне опрацювання та обговорення результатів досліджень

На підставі експериментальних досліджень у середовищі Mathcad 15 обчислили коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) за формулами (2–4) і технологічну пошкоджуваність матеріалу вилівка D за формулою (8). Зміна коефіцієнта гомогенності (m) і технологічної пошкоджуваності D по товщині (глибині) вилівка приведена на рис. 3.

Результати експериментальних досліджень структури та пошкоджуваності литої заготовки свідчать про наступне.

1. Найбільша кількість технологічних дефектів характеризує структурні зони матеріалу вилівка на глибині до 2 мм від поверхні для зразка із ливником порівняно із зразком з малим випором. Зі сторони малого випора цей вплив інтенсивніший, зі сторони великого випора - слабший (рис. 3). Це визначається особливостями кристалізації матеріалу, наявністю домішок і неоднорідностей у поверхневому шарі та усадкової раковини, зміщеної від вісі симетрії та зорієнтованої у напрямку до малого випора, та підтверджується мінімальними значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), а також максимальними значеннями технологічної пошкоджуваності D . У зв'язку з цим шар металу на глибині 2 мм від поверхні підлягає механічному обробленню для всіх видів заготовок.

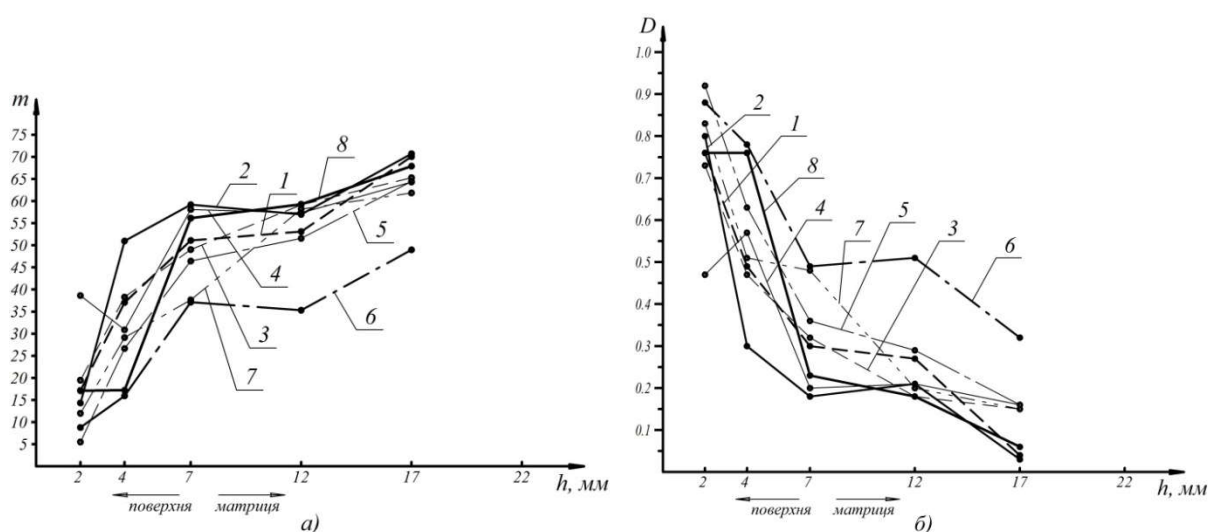


Рисунок 3 – Графіки залежностей коефіцієнта гомогенності m (а) і пошкоджуваності матеріалу D (б) по висоті для зразків № 1 і № 2: 1, 2 – від випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 3, 4 – з протилежного торця від випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 5, 6 – для ливника зі сторони випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 7, 8 – для ливника зі сторони випора великого для першої та другої серії дослідів

2. При переміщенні від поверхні до основного матеріалу у перерізах від 2 до 4 мм спостерігається тенденція до зменшення технологічної

пошкоджуваності для зразка з малим випором при переході від першої до другої фрезерної обробки (рис. 3). Поряд з тим в розглянутих перерізах зі сторони від ливника пошкоджуваність є вищою, що свідчить про вплив елементів конструкції форми на розподіл домішок і неоднорідностей у структурних зонах виливка. Для зразка із ливником технологічна пошкоджуваність зростає при переміщенні до усадкової раковини для другої серії дослідів.

3. Подальше переміщення від поверхні заготовок до основного матеріалу у перерізах від 4 до 17 мм супроводжується зменшення технологічної пошкоджуваності матеріалу D . Стабілізація процесу (зменшення динаміки зміни величини D) починається із глибини 7 мм, що підтверджується зростанням значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і їх наближенням до раціональних значень (рис. 3). Однак для перерізу ливника (зі сторони малого випора) переміщення до його центру супроводжується зменшенням значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) при переході від першої до другої серії. Такі результати пояснюються впливом наявної усадкової раковини на еволюцію домішок та фізико-хімічних дефектів структури.

4. На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень (рис. 3) встановлено, що для зразка із випором мінімальна глибина дефектного шару із максимальною кількістю технологічних пошкоджень рівна 4 мм зі сторони власне випора і 7 мм з протилежного від малого випора торця. Для заготовки із ливником мінімальне значення припуску зі сторони великого випора складає 7 мм. Переріз ливника зі сторони малого випора характеризується значною схильністю до технологічної пошкоджуваності при менших порівняно з іншими перерізами значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) за навіть на глибині до 17 мм, що пояснюється близькістю усадкової раковини. З огляду на це раціональним варіантом буде утилізація зразка із ливником.

Висновки

Розроблено методику оцінювання впливу елементів конструкції виливка на прогнозування розвитку структурних дефектів і неоднорідностей у його матеріалі. Запропоновано критерій технологічної пошкоджуваності при застосуванні методу ЛМ-твердості для аналізу структурних змін при виготовленні литих заготовок за ступенем розсіювання характеристик твердості матеріалу. На підставі результатів експериментальних досліджень встановлено мінімальні значення припусків на оброблення литих заготовок із концентраторами напружень із алюмінієвого сплаву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пронилов А.С. Надежность машин / А.С. Пронилов. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
2. Пронилов А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Пронилов. – М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. Божидарнік В.В., Григор'єва Н.С., Шабайкович В.А. Технологія виготовлення деталей виробів: навч. посібник / В.В. Божидарнік, Н.С. Григор'єва, В.А. Шабайкович. – Луцьк: Надстир'я, 2006, 612 с.
4. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 / V. Strelnikov // RAC Journal. – 2001. – № 1. – P. 1–4.
5. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 2 / V. Strelnikov // RAC Journal. – 2001. – № 2. – P. 8–10.
6. Kusiya Ya.M. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle / Ya.M. Kusiya, A.M. Kuk // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1426. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>. doi:10.1088/1742-6596/1426/1/012034.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
8. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
9. Кузін О.А., Кузін М.О. Структура і міжзеренна пошкоджуваність сталей / О.А. Кузін, М., О. Кузін // Українська академія друкарства, наукові записки. – 2013. – № 4 (45). – С. 99–115.
10. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
11. Кусий Я.М. Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за критерієм однорідності структури матеріалу / Я.М. Кусий // Системні технології. 2021. № 1(132). С. 76–91.
12. Murakami S. Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. / S. Murakami – Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012. – 402 p.
13. Кусий Я.М., Кузін О.А., Кузін М.О. Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкоджуваності виливків / Я.М. Кусий, О.А. Кузін, М.О. Кузін // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 1/5 (79). – С. 39–47.
14. Lebedev A.A., Muzyka N.R., Volchek N.L. A new method of assesment of material degradation during its operating time / A.A. Lebedev, N.R. Muzyka, N.L. Volchek // Zaliznychnyi Transport Ukrainy. – Vol. 5. – 2003. – P. 30–33.
15. Швець В.П., Музыка М.Р., Маковецкий І.В. [і ін.] Контроль поточного стану металу стрілкового переводу в процесі напрацювання. Проблеми прочності. 2011. № 1. С. 104–108.
16. Лебедев А.А., Ламашевский В.П., Музыка Н.Р. [и др.] Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях. Проблеми прочності. 2011. № 5. С. 32–44.
17. Muzyka N.R., Shvets V.P. Effect of a Loading Mode on Damage Accumulation in the Material. Strength of Materials. 2014. № 46(1). P. 105–109.
18. Kusiya Ya., Stupnytskyi V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting / Ya. Kusiya, V. Stupnytskyi // Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine. – 2020. – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering. – P. 276-284.

REFERENCES

1. Pronikov A.S. Machines reliability / A.S. Pronikov. – Moscow: Mechanical engineering, 1978. – 592 p. (in Russian)
2. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines / A.S. Pronikov. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2002. – 560 p. (in Russian)
3. Bozydarnik V.V, Grygorjeva N.S., Shabajkovych V.A. Technology of manufacturing parts of products: a textbook / V.V. Bozydarnik, N.S. Grygorjeva, V.A. Shabajkovych. – Lutsk: Nadstyrja, 2006, 612 p. (in Ukrainian)
4. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 / V. Strelnikov // RAC Jorنال. – 2001. – № 1. – P. 1–4.
5. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 2 / V. Strelnikov // RAC Jorنال. – 2001. – № 2. – P. 8–10.
6. Kusyi Ya.M. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle / Ya.M. Kusyi, A.M. Kuk // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1426. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>. doi:10.1088/1742-6596/1426/1/012034.
7. Bolotin V.V. Prediction of machines and structures resource / V.V. Bolotin. – Moscow: Mechanical engineering, 1984. – 312 p. (in Russian)
8. Bolotin V.V. Resource of machines and structures / V.V. Bolotin. – Moscow: Mechanical engineering, 1990. – 448 p. (in Russian)
9. Kuzin O.A., Kuzin N.O. Structure and intergrain damageability of steels / O.A. Kuzin, N.O. Kuzin // Ukrainian Academy of Book Printing, scientific notes. – 2013. – № 4 (45). – P. 99–115. (in Ukrainian)
10. Zakalov O.V., Zakalov I.O. Fundamentals of friction and wear in machines: a textbook / O.V. Zakalov, I.O. Zakalov. – Ternopil: Publishing of TNTU named I.Puluj, 2011. – 322 p. (in Ukrainian)
11. Kusyi Ya.M. Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за критерієм однорідності структури матеріалу / Ya.M. Kusyi // System Technologies. 2021. № 1(132). P. 76–91. (in Ukrainian)
12. Murakami S. Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. / S. Murakami – Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012. – 402 p.
13. Kusyi Ya.M., Kuzin O.A., Kuzin N.O. Influence of treatment technological route on castings grain damaged forming / Ya.M. Kusyi, O.A. Kuzin, N.O. Kuzin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 1/5 (79). – P. 39–47. (in Ukrainian)
14. Lebedev A.A., Muzyka N.R., Volchek N.L. A new method of assesment of material degradation during its operating time / A.A. Lebedev, N.R. Muzyka, N.L. Volchek // Zaliznychnyi Transport Ukrainy. – Vol. 5. – 2003. – P. 30–33.
15. Shvets V.P., Muzyka N.R., Makovetskii I.V. [at all] Control of the current state of the turnout metal in the operational process. Strength of Materials. 2011. № 1. P. 104–108. (in Ukrainian)
16. Lebedev A.A., Lamashevskii V.P., Muzyka N.R. [at all] Kinetics of scattered damages accumulation in polycrystalline materials with different grain sizes at small deformations. Strength of Materials. 2011. № 5. P. 32–44. (in Russian)
17. Muzyka N.R., Shvets V.P. Effect of a Loading Mode on Damage Accumulation in the Material. Strength of Materials. 2014. № 46(1). P. 105–109.
18. Kusyi Ya., Stupnytskyy V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting / Ya. Kusyi, V. Stupnytskyy // Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine. – 2020. – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering. – P. 276–284.

Received 01.02.2021.

Accepted 11.02.2021.

**INFLUENCE OF DESIGN ELEMENTS OF THE CASTING ON
THE EVOLUTION OF TECHNOLOGICAL DEFECTS**

The formation of product quality parameters, their performance characteristics and reliability indicators are closely related with the important substages and stages of the Products Life Cycles. The differences between the predicted and real values of the functional parameters of products during their Life Cycles indicate the disadvantages in the solving of the tasks using only the theoretical methods. The initial structure and initial properties of the blanks should be considered in close relations with the heredity of the material, starting from the melt smelting. About 25% of the quality parameters of the original material are transferred from the blank, and about 75% are formed during casting and crystallization of the liquid melt during cooling. The local nature of fracture during cutting determines to needs to analyze the process of accumulation of technological defects in materials (alloys) and predict their degeneration into the technological damages under adverse operating conditions of products. The method of LM-hardness, developed under the guidance of Academician A.O Lebedev, are used effectively to solve applied engineering problems. A characteristic feature of the LM – hardness method is to use of the degree of scattering of the characteristics of the mechanical properties of the material samples after operation at different stress levels, such as hardness, for the analysis of material damages degree. The actual damages degree of the product material and the intensity of its increasing are used to analyze the processes of material degradation during the operation stage of the machine parts. In this paper a criterion of technological damageability of the product material for the analysis of structural changes during castings manufacturing is proposed. Experimental researches for casting in sand molds from aluminum alloy AK21M2.5H2.5 GOST 1853-93 are realized. Based on the results of experimental studies, the distribution of technological defects in the material is determined and the minimum values of allowances for processing of aluminum alloy castings with stress concentrators are established.

Keywords: blank, casting, Product Life Cycle, technological process, technological inheritability, homogeneity, technological damageability.

Кусий Ярослав Маркіянович – к.т.н., доцент, докторант кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка».

Личак Олег Васильович – к.т.н., с.н.с. відділу № 9 методів та засобів відбору й обробки діагностичних сигналів ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Кусый Ярослав Маркиянович – к.т.н., доцент, докторант кафедры робототехники и интегрированных технологий машиностроения Национального университета «Львовская политехника».

Лычак Олег Васильевич – к.т.н., с.н.с. отдела № 9 методов и средств отбора и обработки диагностических сигналов ФМИ им. Г.В. Карпенка НАН Украины.

Kusyi Yaroslav – PhD, associate professor, Doctoral Candidate of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies of Lviv Polytechnic National University (Ukraine).

Lychak Oleh – PhD, senior researcher at Karpenko Institute for Physics and Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ РУДНОЇ ПОРОДИ В БАРАБАННОМУ МЛИНІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Анотація. Розглянуто особливості руху рудних матеріалів в барабанному млині. Розроблено математичну модель процесу подрібнення рудних матеріалів з позиції балансу енергетичних величин процесу руйнування. За використанням методу скінчених елементів показано, що виділений в будь-якому місці елемент завантаження піддається деформації з боку сусідніх елементів завантаження (шматків руди) в умовах всебічного нерівнокомпонентного стиснення контактними силами. Проаналізовано вплив напрямку сил контактного тертя при стисненні на ефективність руйнування рудної маси. Данні сили суттєво впливають на появу максимальних зсувних (дотичних) напружень, які залежать від максимальних нормальних напружень, що виникають в шматках рудної породи. Показана можливість керування режимами навантаження для підвищення ефективності процесу подрібнення.

Ключові слова: рудна маса, трубний кульовий млин, контактне тертя подрібнення, руйнування, напруження, моделювання.

Вступ

Дезінтеграція шихтових матеріалів для подальшого вилучення рудної сировини є складний та енергоємний процес. Від багатьох факторів цього процесу залежить якість подрібнення та рентабельність всього виробництва в цілому. Тому пошук шляхів підвищення ефективності процесу дезінтеграції в барабанних млинах є актуальною задачею. Математичне моделювання в сукупності з застосуванням сучасних комп'ютерних технологій та інженерного аналізу, які базуються на чисельному рішенні рівнянь фізики процесу з використанням методу скінчених елементів дає можливість на основі геометричних параметрів деформування, властивостей контактуючих матеріалів та умов роботи трубчастого млина побудувати математичну модель процесу подрібнення з високим ступенем адекватності.

Постановка проблеми

Останні публікації з дезінтеграції руд [1, 2, 3] в барабанних млинах довели, що рух рудного матеріалу завантаження (рис.1) складається з трьох етапів: підйом по круговій траєкторії DA, падіння по параболічній траєкторії AB і

відкат по контуру п'яти DC. При цьому існують характерні області переходу з однієї траєкторії на іншу. Тому розглянемо поперечний переріз барабану.

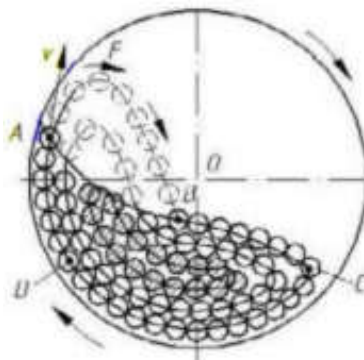


Рисунок 1 – Схема руху кульок та рудного матеріалу в трубчастому млині

Модель будемо робити по традиційній концепції – розбиття всього об'єму млина на елементи завантаження камери, які рухаються під силою тяжіння від маси шматків породи та кульок завантаження, відцентрових сил інерції та реакції поверхні обмеження простору. Однак, раніше створені моделі не в повному обсязі враховували сили внутрішнього та зовнішнього тертя між шарами матеріалу, від взаємодії шматків породи між собою, між шматком та кулькою при вологому та сухому подрібненню з неповною завантаженістю барабана [4, 5]. В запропонованій моделі основну увагу приділемо силам тертя, між шарами матеріалу та силам взаємодії між матеріалом та кульками в вище згаданих умовах.

Внутрішню ємність барабанного млина із завантаженням породи та кульками розбиваємо на плоскі шари поперечним перерізом які, в свою чергу, складаються з шарів елементарних елементів завантаженого матеріалу та кульок, що рухаються по вище згаданих траєкторіях. Вважаємо, що зазначені елементи завантаження, на які розбитий весь обсяг млина, мають однакову форму з одиничним ребром так як було запропоновано у роботі [6].

Руйнування частинок твердого тіла відбувається в тому випадку, якщо підведеної енергії досить для подолання сил внутрішнього опору матеріалу частинки. В той же час сукупні величини різних видів деформацій та міцностей для цих деформацій, при інших рівних умовах, будуть визначати складний напружено-деформований стан частинки гірської породи, що характеризується взаємодією кожного шматка породи з іншими шматками та кульками, а також з футеровкою млина

Для інженерних розрахунків використовуються, так звані, критерії руйнування (або криві «поздовжня деформація – поздовжнє напруження та їх позамежні частини»), за якими і визначається момент руйнування частинок породи в процесі дезінтеграції. Для цього потрібно дослідити характеристики

міцності матеріалу, внутрішнього та контактного тертя, модуль пружності та межу міцності. Ці дані отримують експериментально в умовах сучасних механічних лабораторій шляхом дослідження руйнування зразків гірських порід при різних видах деформування. Останніми роками розроблені методики аналітичної побудови кривих «поздовжня деформація – поздовжнє напруження з їх позамежними частинами» при одновісному стисканню зразків гірських порід для різних форм руйнування, з достатньо високою достовірністю [7].

Треба також враховувати, що мінералогічні різновиди руд різних родовищ мають відносно великі розбіжності фізико-механічних властивостей в порівнянні з лабораторними даними [3], та ще й з урахуванням масштабного фактору та тріщинуватості, що виникає в результаті проведення буропідричних робіт в процесі видобутку корисних копалин.

Аналіз результатів досліджень показав, що міцність гірської породи на стиск в 5-10 разів вище межі міцності на зсув і в 8-15 разів вище межі міцності на розтягування. Також відомо, що зі зменшенням розміру зразків від 100 мм до 1 мм міцність при одноосьовому стисканні міцних рудовмістних порід збільшується приблизно в 3-8 разів. Авторами [5], наприклад, встановлено, що енергоємність при руйнуванні стандартних зразків магнетитових руд на ПАТ «Північний ГЗК» при деформаціях стиску в 17,4 рази більше, ніж при руйнуванні зсувними напруженнями.

При руйнуванні породи в кульових млинах присутнє розчавлювання і стирання шматків від кочення куль, зіткнення шарів завантаження між собою, виникають зсувні деформації в шматках в середині шару завантаження та на поверхні футеровки, удари від падіння шматків та куль. Від того, який спосіб буде переважаючим і який внесок кожного з них, залежить кількість енергії, що витрачається на появу одиниці нової поверхні, тобто ефективність подрібнення

Експериментальні дослідження [9] та аналітичні методи [7] розрахунку напруженого стану при великих незворотних деформаціях та залишкової міцності дозволили встановити, що з ростом бічного тиску ступінь подрібнення порід при деформації має межу. При зменшенні розміру, частинки дроблення після де-якого розміру практично перестають подрібнюватись. Це визначається розмірами структурних елементів: зерен і кристалів.

Таким чином, враховуючи вище наведене, а також конструктивні і технологічні особливості роботи трубчастих кульових млинів треба усвідомлювати, що результати їх ефективності подрібнювання та енергозаощадження залежать від безлічі факторів. Основними з них є:

крупність вхідних шматків породи, розмір і розподіл кульок, швидкість обертання барабана, форма і матеріал футеровки, а також обсяг завантаження при сухому та вологому подрібнюванні.

В роботі реалізована ідея підвищення ефективності подрібнення за рахунок використання сили внутрішнього та контактного тертя частинок породи між собою, з металевими кульками та з футеровкою внутрішніх стінок барабану за принципом: руйнування гірської породи за рахунок створення переважно зсувних напружень.

Метою роботи є пошук найбільш ефективного співвідношення технологічних та конструктивних параметрів процесу дезінтеграції (подрібнення) рудних матеріалів у барабанному млині, на основі моделювання самого процесу руйнування матеріалу.

Для розрахунку напруженого стану та деформації породи в шарі прийємо слідуючи припущення: руйнування гірської породи відбувається коли значення зсувної складової напруженого стану досягає межі міцності; в якості граничного по зсувними напруженням значення використовується межа пружності, так як межі міцності і позамежної міцності мають у більшості видів гірських порід на порядок меншу зону (область) існування, а також високий коефіцієнт крихкості; для вивчення напруженого стану гірських порід в умовах нерівнокомпонентного стиснення використовуються дані про властивості гірських порід, отримані експериментально в умовах одновісного стиску, або аналітично по методикам [7].

Змоделюємо процес взаємодії шматків гірської породи в технологічному процесі подрібнення для аналізу ефективності та визначення рівня енерговитрат у вигляді потенційної енергії деформації породи в шарі. Моделювання плоского напруженого стану виконується на основі методу скінчених елементів (МКЕ) [8] з застосуванням пакета програм Solidworks.

Математичне моделювання побудовано на основі чисельного рішення МКЕ, де основні залежності напружено-деформованого стану елементів завантаження в барабанному млині представлені в опису типу скінченого елементу.

Скінчено-елементну модель напружено-деформованого стану завантаження млина будемо за наступними етапами:

1. Формування геометрії моделі, що включає визначення геометричних місць характерних зон кульового млина, врахування хаотичного стану шматків руди з можливим падінням куль, руху шарів елементів завантаження.
2. Генерація сітки скінчених елементів, шматків руди, що деформуються, кульок, внутрішніх стінок футеровки млина.
3. Виділення граничних умов взаємодії елементів.

4. Завдання властивостей матеріалів гірської породи, розмірів кульок, властивостей футеровки барабану млина.

5. Моделювання діючого навантаження на виділені елементи завантажень.

6. Графічна інтерпретація отриманих результатів по напруженню.

Аналіз великого числа експериментальних результатів [3, 5] показав, що в умовах об'ємного нерівнокомпонентного стиснення гірської породи руйнування відбувається за рахунок проростання критично орієнтованих зсувних тріщин.

На основі вище представленого аналізу можна підтвердити гіпотезу про наявність зсувного механізму руйнування матеріалу в млині, який підсилюється при вологому подрібненні (рис. 2) та при сухому - з неповним заповненням пустот між кулями, що відповідає моделі більш ефективного ковзного стиснення, який є основним фактором ефективного процесу дезінтеграції [10].

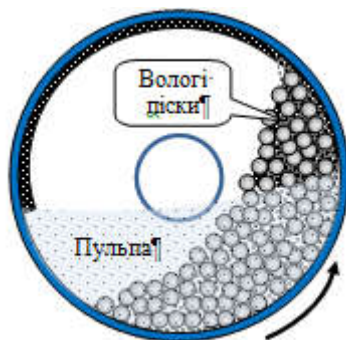


Рисунок 2 – Схема руху кульок та рудного матеріалу в трубчастому млині при вологому подрібненні

На користь прийнятого твердження свідчить і встановлений експериментально та аналітично механізм самоорганізації руйнування та розвитку деформації за межею міцності [7] по площинах зсуву, які формуються на майданчиках контакту [3].

При побудові моделі враховувалися особливості навантаження шматків руди в барабанному млині.

При сухому подрібненні в режимі неповного заповнення породою стінки барабана захоплюють вгору кулі, а кулі, в свою чергу захоплюють частинки породи. При скочуванні навантаження по похилому схилу частинки породи не скочуються разом з кулями, а прагнуть провалитися в порожнечі між ними вертикально вниз. Це призводить до зсувного стискання, а отже до виникнення зсувних деформацій.

При вологому подрібненні енергія руху куль більш ефективно використовується у верхній, збезводненій зоні, в якій є можливість руйнування

декількох частинок, а не однієї, як у пульпі. Це призводить до більш ефективного руйнування за рахунок збільшення зсувних деформацій [10].

Також при використанні хвилястого профілю футерування виникає бічний тиск, в зв'язку з цим існує можливість зсуву зерен один відносно одного через неоднорідність по крупності всього шару матеріалу. Тому при оцінці опору гірської породи руйнуванню найбільш доцільно прийняти концепцію оцінки її міцності за максимальними зсувними напруженнями.

Дані різних досліджень [4, 6] показують, що в зсувному потоці можуть існувати три основні механізми появи напружень: контактний тертя між частинками, тертя між частинками та кульками та між частинками і футеровкою, перенесення імпульсу за рахунок переміщення елементів породи з одного шару в інший та перенесення імпульсу за рахунок зіткнення між елементами. Всі ці механізми діють при русі елементів завантаження в камері барабанного млина. Хоча вони діють одночасно, особливості роботи барабанного млина дозволяють виділити області руху елементів завантаження, де переважає один з видів напруження.

Розглянемо процес передачі імпульсу углиб елементів завантаження. Представимо елементи завантаження, розташовані в площині перетину, у вигляді похилого ланцюжка, які рухаються разом з іншою частиною завантаження, піддаються тиску від опору сусідніх елементів. З певним ступенем точності такі напруження можна вважати плоскими.

Внутрішній об'єм барабанного млина із завантаженням розбивається на плоскі поперечні перерізи які, в свою чергу, складаються з шарів елементарних елементів завантаження, що рухаються по траєкторіях. Вважаємо, що зазначені елементи завантаження, на які розбитий весь обсяг млина, мають однакову форму з ребром Δl .

Прийmemo, що на тіло, яке знаходиться в стані рівноваги, діють зовнішні сили. Для нього задається деяке віртуальне поле переміщень, яке будемо шукати. Переміщення характеризується в кожній точці простору значенням вектору. Рівновага буде тільки тоді, коли при довільних варіаціях переміщень віртуальна робота зовнішніх сил дорівнює роботі внутрішніх сил опору деформованого тіла. При цьому поле віртуальних переміщень на континуумі деформованого тіла має бути представлено безперервними функціями просторових координат і задовольняти кінематичним умов на його кордонах.

За теорії пружності деформованого тіла відомо, що сума змін потенційної енергії зовнішніх навантажень і внутрішньої енергії деформації при деякому полі переміщень дорівнює нулю. Тобто, як і в роботі [6] маємо:

$$d(\Lambda + W_p) = d(\Pi) = 0. \quad (1)$$

Робота зовнішніх навантажень W дорівнює потенційній енергії опору тіла, що деформується, тобто $W_p = -W$. Таким чином, енергетичний стан механічної системи, яка деформується характеризується виразом вигляду $\frac{\partial(\Pi)}{\partial\{\delta\}} = 0$. Кожне з складових потенційної енергії деформування Π є деякою функцією від вектору переміщень $\{\delta\}$. Функціонал потенційної енергії для дискретної області визначення деформованого тіла запишемо у вигляді

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (\Lambda^e - W^e) = \sum_{e=1}^E \Pi^e \quad (2)$$

де E – число елементів дискретної області визначення; $\Pi^{(e)}$ – частка потенційної енергії окремого скінченного елемента. Тоді запишемо необхідні вирази для складових повної потенційної енергії тіла, що деформується на скінченному елементі. Внутрішня енергія деформації для моделювання середовища гірських порід визначається виразом вигляду:

$$\Lambda^e = \int_{V^e} 1/2 \{\varepsilon\}^T \{\delta\} dv, \quad (3)$$

де інтегрування ведеться за обсягом скінченного елемента – V^e .

Обчислення вектору напружень $\{\delta\}$ проводиться після рішення основної системи рівнянь, здійснюється за відомими вузловими значеннями поля переміщень і деформацій скінченного елемента. Для представлення результатів розрахунку досить обчислити напруження в вузлах і в центрі скінченного елемента. Вектор напруження в вузлі скінченного елемента записується у вигляді $\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^{(e)}$, де $[B]$ – матриця деформацій.

Вирішення цього завдання перевірено на прикладі фрагмента шару, скінчено-елементна модель якого побудована із застосуванням об'ємного напружено-деформованого стану, де товщина фрагмента (в напрямку осі Z) дорівнює 1 мм.

При моделюванні плоско-навантаженого стану середовища, як і в роботі [6] виділимо три характерних положення елемента завантаження.

У першому випадку елементи завантаження в зоні п'яти знаходяться на гумовій футеровці під тиском верхніх куль навантаження і падіння кулі, діаметром 100мм зі швидкістю в момент удару – 0,4 м/с. Враховується, що діють переважно нормальні напруження. На рисунку 3 показані розрахункові напруження, які виникають в елементах завантаження на гумовій поверхні футеровки після удару їх кулями, які падають в районі п'яти.

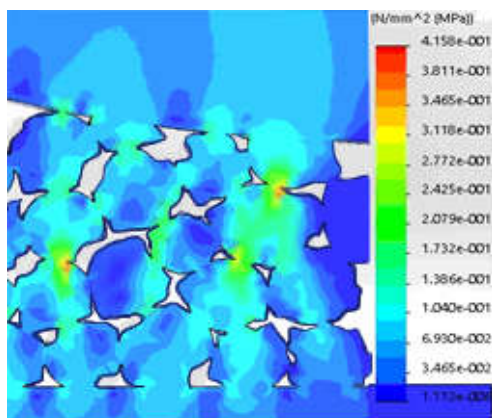


Рисунок 3 – Напруження в елементах частинок породи в момент падіння кульки

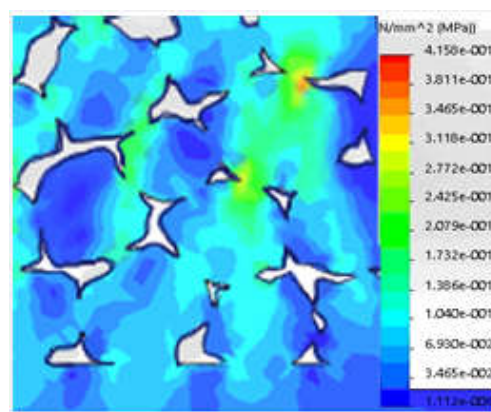


Рисунок 4 – Напруження в частинках породи в середині шару під тиском верхніх елементів завантаження

У другому випадку діє тиск тільки верхніх куль завантаження, який визначається насипною щільністю матеріалу породи і висотою шару. Для розрахунку прийнята щільність $\rho = 5250 \text{ кг/м}^3$, і висота шару – 1м. В даному характерному випадку (рисунок 4) – розрахункове навантаження нижніх елементів (шматків) завантаження під тиском верхніх елементів завантаження заданої висоти шару і щільності елементів. При цьому нормальні напруження всередині елементів завантаження в області контакту з кульками слабшають, зате збільшуються навантаження з боку елементів шару.

У третьому випадку діє тиск, який сформований таким же чином, але вже під деяким кутом. Відбувається підйом елементів завантаження, і необхідно враховувати появу дотичних напружень і, відповідно, напружень зрушення. На рис. 5 показані напруження в частинках породи в результаті деформацій зсуву всередині завантаження в зоні підйому з позиції балансу енергетичних величин процесу подрібнення: роботи зовнішнього силового впливу і значення внутрішньої потенційної енергії деформації шматків руди та засноване на використанні методу скінчених елементів, аналізу напружено-деформованого стану елементів завантаження, обліку складної структури взаємодії шматків руди в шарі частинок під тиском.

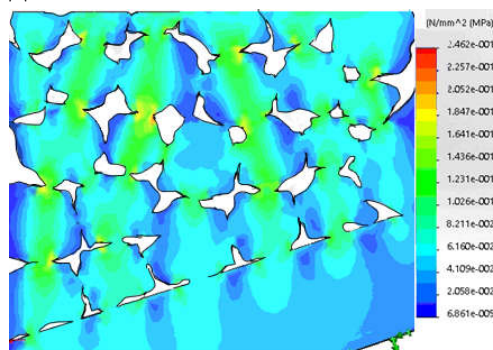


Рисунок 5 – Напруження в елементах завантаження при появі зсувних напружень на межі міцності матеріалу

Виділений в будь-якому місці шматка породи елемент завантаження піддається деформації з боку сусідніх елементів (шматків породи або кульок) в умовах всебічного нерівнокомпонентного стиснення контактними силами. Данні сили визначають появу максимальних зсувних (дотичних) напружень, які залежать від максимальних нормальних напружень, що виникають на контактних майданчиках шматків породи. Для цього елемента побудовані епюри напружень.

На рисунку 6 показані епюри максимальних нормальних напружень, які виникають на вказаний елемент в трьох розрахункових положеннях.

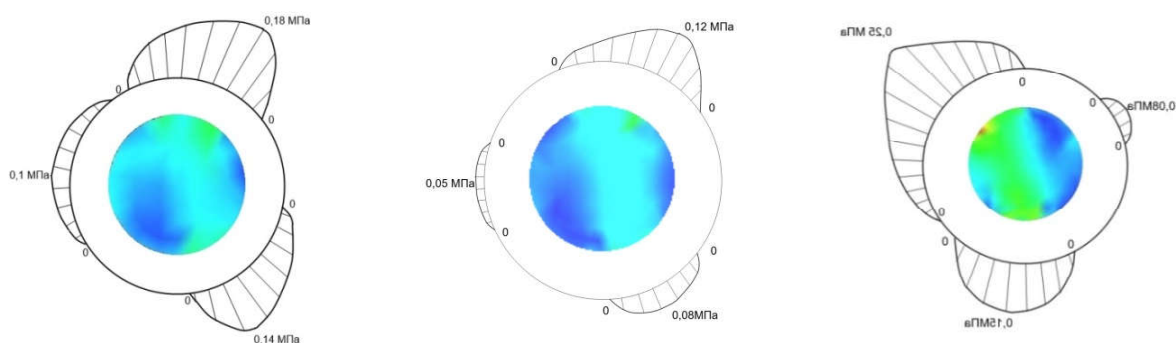


Рисунок 6 – Епюри нормальних напружень для наведених вище положень елементів завантаження

Розрахунки показали, що найбільші нормальні напруження в елементі в середині розрахункової області, знаходяться в третьому випадку. В різних дослідженнях та в роботі [11] показано, що при збільшенні σ_2 відбувається перехід напруженого стану елемента породи з всебічного нерівнокомпонентного стиснення в область узагальненого зсуву і розтягування, об'ємна міцність порід різко зменшується.

Це підтверджує, що при використанні вологого подрібнення та сухого з неповним завантаженням [10] складаються більш сприятливі умови до зсувного стиснення частинок породи, що в свою чергу призводить до появи руйнівних дотичних напружень, які перевищують межу міцності за критерієм Кулона на лініях зсуву. Відбувається процес ефективного руйнування породи.

Таким чином, моделювання процесу руйнування породи в кульовому млині на основі дослідження напружень в шматках породи в шарі завантаження методом скінчених елементів на базі пакету Solidworks показало, що основним впливом на руйнування є поява зсувних напружень в частинках породи.

Розроблена модель підтверджена отриманими експериментальними результатами дезінтеграції міцних залізних руд на ВАТ «Полтавський ГЗК» на

мілину-Ницаха МШР-4,0*5,0 першої стадії подрібнення з кулями діаметром 100 мм. Це дозволило в технологічних схемах рудопідготовки з вхідним класом породи 6-8мм знизити питомі витрати кульок на 10% і знизити питомі витрати електроенергії в цілому на технологічну секцію на 5-6%.

Висновки

1. Розроблена математична модель процесу подрібнення рудних матеріалів в кульовому млині з позиції балансу енергетичних величин процесу руйнування: роботи зовнішнього силового впливу і значення внутрішньої потенційної енергії деформації шматків руди з використанням методу скінчених елементів, аналізу напружено-деформованого стану елементів завантаження, взаємодії шматків руди в шарі частинок під тиском за умови зміни зсувних і ударних навантажень. Математична модель дозволяє розрахувати максимальні навантаження в елементах завантаження (руда, кулі, вода).

2. Показано, що виділений в будь-якому місці елемент завантаження піддається деформації з боку сусідніх елементів завантаження (шматків руди) в умовах всебічного нерівнокомпонентного стиснення контактними силами. Данні сили визначають появу максимальних зсувних (дотичних) напружень, які залежать від максимальних нормальних напружень, що виникають в шматках породи.

3. Результати моделювання напружено-деформованого стану елементів завантаження підтвердили, що при застосуванні вологого подрібнення та сухого подрібнення з неповним завантаженням складаються більш сприятливі умови до зсувного стиснення частинок породи, що в свою чергу призводить до появи руйнівних дотичних напружень, які перевищують межу міцності за критерієм Кулона на лініях зсуву. Відбувається процес ефективного руйнування породи, що в свою чергу веде до зниження енергоємності процесу подрібнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки / П.В. Маляров - Ростов - на-Дону, 2004. – 185 с.
2. Андреев Е.Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник / Е.Е. Андреев, О.Н. Тихонов - Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб. – 2007. – 439 с.
3. Блохин В.С., Большаков В.И., Малич Н.Г. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: Учебное пособие ч.1 – Днепропетровск; ИМА - пресс.- 2006. - 404с.
4. Науменко Ю.В. Основы теорії режимів роботи барабанних млинів: Монографія / Ю.В. Науменко. – Рівне: Вид-во СПД Зелент О.І., 2009.–282с.

5. Дырда В.И. Кинетика измельчения минерального сырья в шаровых мельницах с резиновой футеровкой / В.И. Дырда, В.А. Калашников, И.В. Хмель, Е.В. Калганков // Геотехнічна механіка.– 2013. № 108.– с. 89 – 96.
6. Хмель И.В. Моделирование процесса дезинтеграции магнетитовых кварцитов в барабанной мельнице на основе использования метода конечных элементов / И. В. Хмель // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 17 (1189). – С. 83-88.
7. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г., Ангеловский А.А. Механика образования форм разрушения образцов горных пород: Монография.- Днепро, ИМА-пресс.-2018-172с.
8. Морозов Е.М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков– М.: Наука, – 1980. – 254 с.
9. Олейник Т.А. Исследование влияния резиновых футеровочных плит на эффективность измельчения руды Северного ГОКа / Т.А. Олейник., И.В. Хмель // Вісник КНУ- Вип. 34.- Кривий Ріг.-2013.- С. 123-127.
10. Малич Н.Г., Усов О.А. Анализ характера напряженного состояния породы в процессах измельчения полезных ископаемых // Металлург. и горнорудн. пром-сть. - 2018. - №7. - С. 51 - 56.
11. Деформирование и разрушение горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия / В.Н. Ревва // Физико-технические проблемы горного производства: Сб. науч. тр. — 2008. — Вип. 11. — С. 98-110.

REFERENCES

1. Malyarov P.V. Fundamentals of intensification of ore preparation processes / P.V. Malyarov - Rostov - on - Don, 2004. - 185 p.
2. Andreev E.E. Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment: Textbook / HER. Andreev, O. N. Tikhonov - Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University). St. Petersburg - 2007. - 439 p.
3. Blokhin V.S., Bolshakov V.I., Malich N.G. The main parameters of technological machines. Machines for disintegration of solid materials: Study guide, part 1 - Dnepropetrovsk; IMA-press. - 2006. - 404 p.
4. Naumenko Yu.V. Fundamentals of the theory of modes of operation of drum mills: Monograph / Yu.V. Naumenko. - Rivne: Publishing house SPD Zelent OI, 2009. - 282 p.
5. Dyrda V.I. Kinetics of grinding mineral raw materials in rubber-lined ball mills / V.I. Dyrda, V.A. Kalashnikov, I.V. Khmel, E.V. Kalgankov // Geotechnical mechanics.– 2013. No. 108.– p. 89 - 96.
6. Khmel I.V. Simulation of the disintegration process of magnetite quartzite in a drum mill based on the use of the finite element method / I. V. Khmel // Bulletin of the National Academy of Sciences. tech. un-tu "KhPI": zb. sciences. pr. Ser. : Mechanical and technological systems and complexes. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. - No. 17 (1189). – p. 83-88.
7. Vasiliev L.M., Vasiliev D.L., Malich N.G., Angelovsky A.A. Mechanics of Formation of Forms of Fracture of Rock Samples: Monograph. - Dnipro, IMA-press. -2018-172 p.
8. Morozov E.M. Finite element method in fracture mechanics / E.M. Morozov, G.P. Nikishkov - M. : Nauka, - 1980. - 254 p.
9. Oleinik T.A. Study of the Influence of Rubber Lining Plates on the Efficiency of Ore Grinding of Severny GOK / T.A. Oleynik., I.V. Khmel // Bulletin of KNU-Vip. 34.-Curve Rig.-2013. - p. 123-127.
10. Malich N.G., Usov O.A. Analysis of the nature of the stress state of the rock in the processes of grinding minerals // Metallurg. and mining prom-st. - 2018. - No. 7. - p. 51 - 56.
11. Deformation and destruction of rocks in conditions of volumetric unequal-component compression / V.N. Revva // Physical and technical problems of mining: Sat. scientific. tr. - 2008. - VIP. 11. - p. 98-110.

Received 02.02.2021.

Accepted 10.02.2021.

MODELING OF THE PROCESS OF DISAGGREGATION OF ORE ROCK IN A DRUM MILL USING THE FINISHED ELEMENT METHOD

Peculiarities of ore materials movement in a drum mill are considered. A mathematical model of ore materials grinding process in a drum ball mill is developed from the position of balance of energy quantities of destruction process: work of external force influence and value of internal potential energy of deformation of ore pieces. Using the finite element method, the analysis of the stress-strain state of the loading elements, the interaction of pieces of ore in the layer of particles under pressure under the condition of changes in shear and shock loads. The mathematical model allows to calculate the maximum loads in the loading elements (ore, spheres).

It is shown that the loading element selected anywhere is subject to deformation by the neighboring loading elements (pieces of ore) under conditions of comprehensive non-uniform component compression by contact forces. These forces determine the appearance of maximum shear (tangential) stresses, which depend on the maximum normal stresses occurring in the pieces of rock.

The results of modeling the stress-strain state of the loading elements confirmed that the use of wet grinding and dry grinding with incomplete loading creates more favorable conditions for shear compression of rock particles, which in turn leads to destructive tangential stresses exceeding the Coulomb strength. shear lines. There is a process of effective destruction of the rock, which in turn leads to a decrease in the energy consumption of the grinding process.

Keywords: ore mass, tube ball mill, contact grinding friction, fracture, stress, modeling.

Маліч Микола Григорович – к.т.н., доцент, Національна металургійна академія України, Україна.

Малич Николай Григорьевич – к.т.н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины, Украина.

Malich Mykola – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

ПІДВИЩЕННЯ ПІСЛЯРЕМОНТНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ НАСОСІВ ПІДЖИВЛЕННЯ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВИХ ГІДРОМАШИН

Проводиться експериментальне підтвердження ефективності впровадження конструктивних заходів по зниженню об'ємних витрат в качаючому вузлі насоса підживлення через його торцевий зазор. Запропоновано конструкцію стенду та методик для обкатки і випробування насосів підживлення.

Ключові слова: насос підживлення, торцевий зазор, об'ємні витрати, коефіцієнт подачі, післяремонтна довговічність.

Постановка проблеми

Мобільні машини, що останнім часом широко застосовуються в гірничо-металургійному комплексі, за конструктивними рішеннями оснащені гідравлічними трансмісіями. В значній мірі це обумовлюється конструктивними перевагами гідравлічних трансмісій в порівнянні з механічними, як з точки зору зручності керування мобільною машиною так і її експлуатаційної надійності. Основними агрегатами гідравлічної трансмісії являються аксіально-поршневі гідромашини (аксіально-поршковий гідронасос НП-90 з регульованим об'ємом та не регульований аксіально-поршковий гідромотор МП-90).

Впровадження гідравлічних трансмісій в мобільних машинах передбачає їх високу експлуатаційну надійність в порівнянні з механічними трансмісіями, за рахунок особливості конструкції об'ємних гідромашин, качаючі вузли яких складаються з деталей, виготовлених з високою точністю геометричних розмірів. Разом з тим, проведений аналіз експлуатаційної надійності гідравлічних трансмісій мобільних машин показує, що на гідравлічний привід трансмісії припадає до 30% відмов [1].

Проведений нами детальний аналіз відмов, показує, що основна їх частина (60-75%) припадає на експлуатаційні відмови, які обумовлюються наступними причинами:

- експлуатація гідравлічних машин на робочих рідинах, які за класом чистоти не відповідають технічним вимогам (40-45%);
- не своєчасна заміна робочих рідин та фільтруючих елементів, які передбачені регламентом планово-запобіжної системи з технічного обслуговування та ремонту (15-20%);

- експлуатація гідравлічних трансмісій з низьким рівнем робочої рідини в гідравлічному баку гідросистеми (3-5%);
- експлуатація гідравлічних машин на робочих рідинах з завищеним вмістом в них води (1-3%);
- експлуатація гідравлічних трансмісій на робочих рідинах з завищеним вмістом повітря в робочій рідині в результаті порушення герметизації в гідравлічній системі (1-2%).

Є очевидним, що вказані причини впливають на зміну структурних параметрів технічного стану деталей, які в свою чергу обумовлюють зростання об'ємних втрат робочої рідини та зменшення об'ємного коефіцієнту подачі аксіально-поршневого гідронасоса і втрату роботоздатності при досягненні його граничного значення.

Для забезпечення коефіцієнта подачі аксіально-поршневого гідронасоса, в відповідності до його технічної характеристики, на протязі тривалої експлуатації, в конструкції гідронасоса передбачається застосування насоса підживлення, головними функціями якого являється, компенсація об'ємних втрат в качаючому вузлі аксіально-поршневого гідронасоса та забезпечення роботи системи керування його робочим об'ємом.

Таким чином, можна припустити, що зміна структурних параметрів деталей насоса підживлення аксіально-поршневого гідронасоса буде також впливати на його роботоздатність і безпосередньо на експлуатаційну довговічність. Відновлення роботоздатності насосів підживлення, як правило проводиться в сервісних підприємствах, а післяремонтна довговічність буде обумовлюватись якістю ремонтних операцій технологічних процесів, які застосовуються на виробництві.

Детальний аналіз технологічних процесів показує, що запропонований в них метод відновлення роботоздатного стану насосів підживлення, ґрунтується на методі вільних ремонтних розмірів, який характеризується забезпеченням заданої форми робочої поверхні деталі, зняттям з її поверхні зношеного шару металу. Є очевидним, що його реалізація обумовлює зменшення коефіцієнта подачі та експлуатаційного ресурсу у відремонтованого насоса в порівнянні з новим, в результаті зміни геометричних розмірів деталей.

Усунення вище наведених недоліків можливе за рахунок впровадження передових методів відновлення роботоздатності насосів підживлення, реалізація яких забезпечить високу якість ремонту та експлуатаційну довговічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ресурсна відмова насоса підживлення аксіально-поршневого гідронасоса обумовлюється гідроабразивним зношенням робочих поверхонь деталей його качаючого вузла, що приводить до зростання зазорів в спряженнях і відповідно об'ємних втрат.

В роботах [2, 3], автори відмітили, що зміна структурних параметрів деталей в спряженнях «торець шестерні-верхня кришка» і «торець шестерні-нижня кришка» формує торцевий зазор, а в спряженні «колодязь корпусу-зуб шестерні» - радіальний зазор, що обумовлює зростання об'ємних втрат робочої рідини, а значить приводить до зменшення подачі насоса (Q) л/хв і його об'ємного коефіцієнта корисної дії η .

Для компенсації торцевого зазору, в роботі [4], авторами запропоновано конструктивне рішення компенсації торцевого зазору, що включає в себе пластину з робочою поверхнею і пружнодемпфуючого елемента, у якому додатково розташовані канали й камери гідростатичного піджиму, при цьому, камери гідростатичного піджиму розміщені по колу через 90° і з'єднані між собою каналами, отвори яких сполучені з камерою нагнітання. Водночас, в роботі рекомендується, для зменшення об'ємних втрат робочої рідини через торцевий зазор, забезпечити мінімальний зазор, який би формувався з врахуванням геометричного розміру абразивних частиць (50 мкм), кількість яких максимальна для десятого класу чистоти робочої рідини, на якій в відповідності до технічних вимог, експлуатуються насоси підживлення аксіально-поршневих гідромашин.

Дані конструктивні рішення представлені теоретично і не мають практичної реалізації, впровадження якої характеризується особливостями фізичного моделювання качаючого вузла насоса підживлення аксіально-поршневого гідронасоса, конструктивними особливостями стенду для проведення лабораторних досліджень, методики виявлення функціональної залежності між ресурсом насоса і його об'ємним коефіцієнтом корисної дії.

Мета дослідження

Мета дослідження – підтвердження ефективності впровадження конструктивних заходів по зниженню об'ємних втрат в качаючому вузлі насоса підживлення через його торцевий зазор, в процесі ремонту, проведенням експериментальних досліджень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Експлуатаційна довговічність насосів підживлення, що входять до складу регульованих аксіально-поршневих гідронасосів, в значній мірі обумовлюється

технічним станом структурних параметрів деталей його качаючого вузла, які змінюються в результаті зношення деталей і обумовлюють зростання об’ємних втрат робочої рідини через торцевий зазор в качаючому вузлі насоса, що приводить до зменшення його об’ємного коефіцієнта подачі до граничних значень ($K_Q \leq 0,62$) і ресурсної відмови [5].

Для відновлення роботоздатного стану насоса підживлення, на сервісних підприємствах застосовують метод вільних ремонтних розмірів, який характеризується видаленням слідів спрацювання на робочих поверхнях деталей торцевого зазору, з застосуванням операцій чорнового і чистового притирання робочих поверхонь верхньої та нижньої кришок насоса та торців зуба ведучої і веденої шестерень. Даний метод може бути реалізований для деталей з не значним зношенням, так як при значному зношенні суттєво змінюються геометричні розміри деталей після проведення притирочних операцій, що обумовлює зменшення об’ємного коефіцієнта його подачі і відповідно післяремонтного ресурсу.

Одним із ефективних заходів, який дозволяє збільшити післяремонтну довговічність насоса підживлення, при поступанні до ремонту, являється застосування в качаючих вузлах механізму компенсації торцевого зазору [4].

Для його реалізації автори рекомендують, при проведенні ремонтних робіт, установити в верхній кришці насоса пластину для компенсації торцевого зазору, яка складається з робочої поверхні і пружнодемпфуючого елемента, у якому додатково розташовані канали й камери гідростатичного піджиму, при цьому камери гідростатичного піджиму розміщені по колу через 90° і з’єднані між собою каналами, отвори яких сполучені з камерою нагнітання (рисунок 1).

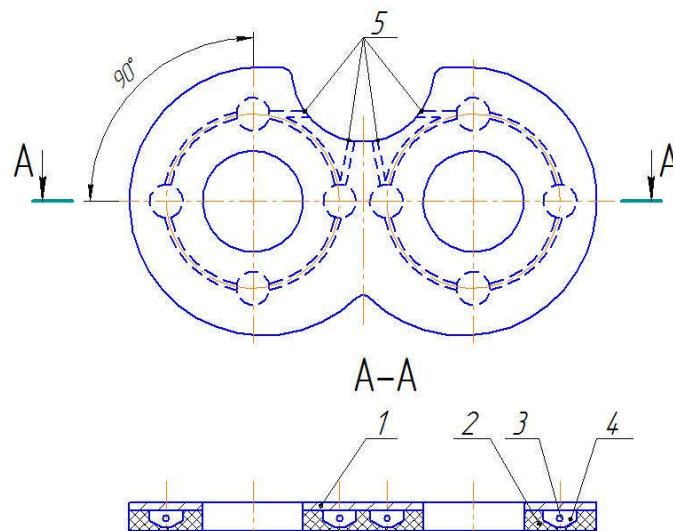


Рисунок 1 – Конструкція пластини компенсації торцевого зазору: 1 - робоча поверхня; 2 - опорна поверхня; 3 - пружнодемпфуючий елемент; 4 - камери піджиму; 5 – канали для подачі рідини

Для підтвердження ефективності даного способу ремонту насоса підживлення, з точки зору збільшення його післяремонтної довговічності, в порівнянні з застосуванням існуючої технології ремонту насоса, яка базується на застосуванні вільних ремонтних розмірів і характеризується видаленням слідів зношення на робочих поверхнях деталей, які формують торцевий зазор («торець шестерень-верхня кришка насоса», «торець шестерень-нижня кришка насоса») проводяться лабораторні дослідження.

У відновлених насосів запропонованими способами визначалась функціональна залежність між об'ємним коефіцієнтом подачі насоса (K_Q) і його наробітком в перші 50...60 годин його роботи, які характеризуються інтенсивністю зношення робочих поверхонь деталей, що формують торцевий зазор, в результаті їх припрацювання і впливають на післяремонтний ресурс насоса в умовах експлуатації.

Об'ємний коефіцієнт подачі насоса (K_Q) визначався з застосуванням виразу [6]:

$$K_Q = \frac{Q_\phi}{Q_m}, \quad (1)$$

де Q_ϕ – фактична подача насоса при номінальних тиску і частоті обертання вала, $\text{см}^3 / \text{об}$; Q_m – теоретична (розрахункова) подача насоса при номінальній частоті обертання валу насоса, $\text{см}^3 / \text{об}$.

Для виконання лабораторних досліджень була проведена модернізація стенда КИ-4815М, гідравлічна схема якого наводиться на рисунок 2 [5].

Модернізована конструкція стенду має розширені функціональні можливості для випробовування гідравлічних насосів в порівнянні з існуючими марками стендів (КИ-4815М, КИ-4200), до яких можна віднести безступеневе регулювання швидкості ведучої шестерні насоса за допомогою застосування гідравлічного приводу ведучого валу насоса, який також забезпечує випробування насосів з лівим і правим напрямом обертання ведучої шестерні та створювати стато-динамічний режим роботи насоса за швидкісним режимом.

Випробовування насосів проводились на маслі для гідравлічних приводів МГЕ-46В (ТУ 38.10150-70), при температурі $50 \pm 5^\circ\text{C}$ на робочих швидкостях приводного валу в інтервалі ($n = 700 \dots 1450 \text{ хв}^{-1}$), а їх технічний стан визначався по фактичній подачі за допомогою гідравлічного лічильника ШЖУ-25М-16 (ДСТУ 12671-01), при номінальному тиску робочої рідини в нагнітаючій магістралі ($P_H = 1,44 \pm 0,01 \text{ МПа}$) і частоті обертання ведучого валу $n = 1450 \text{ хв}^{-1}$.

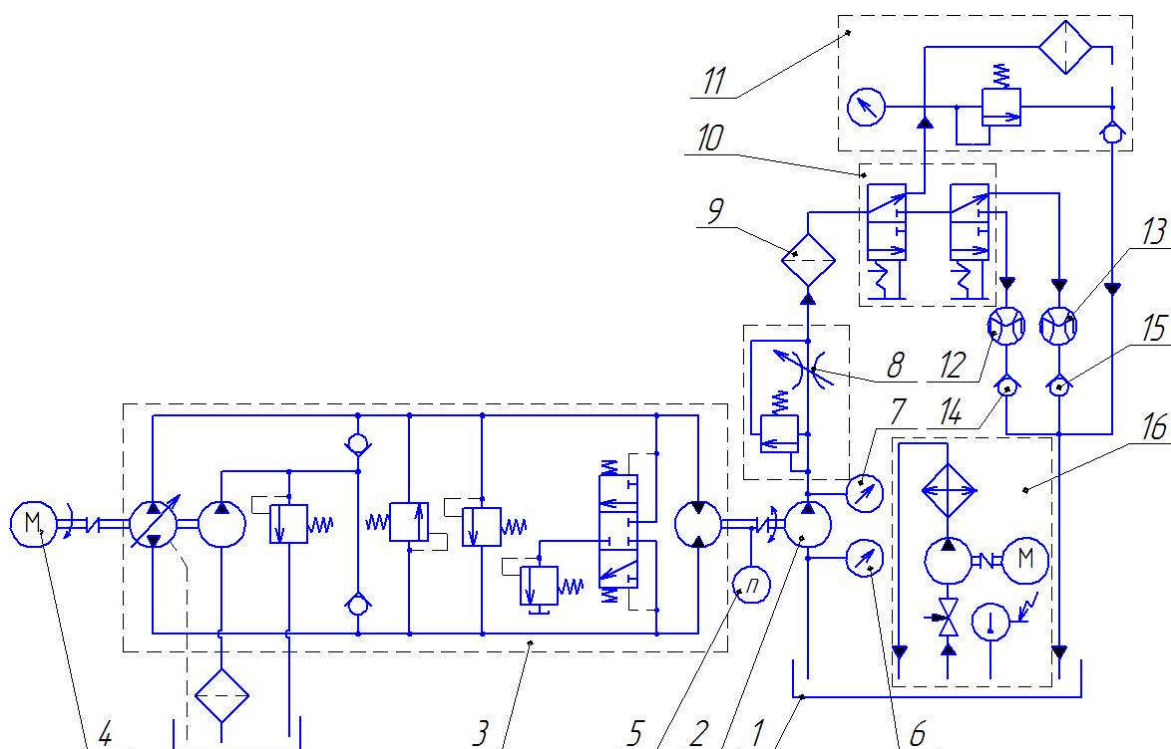


Рисунок 2 – Гідравлічна схема стенда для обкатки та випробовування насосів підживлення аксіально-поршневої гідромашини [5]: 1 - гідравлічний бак; 2 - насос, що випробовується; 3 - гідравлічний привод ведучого валу насоса; 4 - електродвигун; 5 - лічильник обертів; 6 – вакуумметр; 7 – манометр; 8 - регульований дросель; 9 - фільтр тонкої очистки; 10 - розподільний блок; 11 - блок очищення робочої рідини; 12, 13 - лічильниками рідини; 14, 15 - зворотні клапани; 16 - блок охолодження

При проведенні експериментальних робіт на стенді витримуються наступні загальні умови: рівень робочої рідини стенду періодично контролюється, а її забруднення не допускається; після проведення на стенді демонтажних робіт, що включають в себе роз'єднання трубопроводів, із системи видаляється повітря; підключення до стенду додаткових пристроїв, необхідних для проведення експерименту, не повинно змінювати гідравлічний опір та об'єм нагнітаючої магістралі, а також впливати на тиск в зливній магістралі.

Фактична подача насосів визначалась через кожні десять годин їх випробовування, при номінальних значеннях тиску рідини в нагнітаючій магістралі ($P_n = 1,44 \pm 0,01 \text{ МПа}$) і частоті обертання ведучого валу $n = 1450 \text{ хв}^{-1}$. В проміжках часу, коли подача насоса не контролювалась, моделювались умови його роботи, які максимально відтворювали режим роботи в умовах експлуатації таблиці 1.

Таблиця 1

Режим роботи насоса на експериментальному стенді прогом інтервалу десять годин

Тривалість випробовування насоса в год.	Тиск нагнітаючий магістралі насоса, МПа	Температура робочої рідини, °C	Частота обертання приводного валу стенда, хв^{-1}
1,0	$0,22 \pm 0,01$	50 ± 5	700
2,0	$0,36 \pm 0,01$	50 ± 5	783
3,0	$0,50 \pm 0,01$	50 ± 5	866
4,0	$0,64 \pm 0,01$	50 ± 5	949
5,0	$0,76 \pm 0,01$	50 ± 5	1032
6,0	$0,90 \pm 0,01$	50 ± 5	1075
7,0	$1,04 \pm 0,01$	50 ± 5	1115
8,0	$1,18 \pm 0,01$	50 ± 5	1198
9,0	$1,32 \pm 0,01$	50 ± 5	1250
10,0	$1,44 \pm 0,01$	50 ± 5	1450

Експлуатація насоса на даних режимах підвищувала достовірність результатів експериментальних досліджень з виявлення функціональної залежності між коефіцієнтом подачі насоса і часу напрацювання.

Результати стендових досліджень випробування насосів підживлення від часу напрацювання наведено в (таблицях 2, 3) і наглядно представлені в рисунку 3.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень зміни коефіцієнта подачі насоса підживлення з механізмом компенсації торцевого зазору від часу напрацювання

Час обкатки насоса, год.	Теоретична подача насоса при номінальній частоті обертання $\text{см}^3 / \text{об}$	Номінальний тиск, МПа	Дійсна подача насоса при номінальній частоті обертання валу, $\text{см}^3 / \text{об}$	Коефіцієнт об'ємної подачі насоса, K_Q
10	19,50	$1,44 \pm 0,01$	17,47	0,896
20	19,50	$1,44 \pm 0,01$	17,41	0,893
30	19,50	$1,44 \pm 0,01$	17,36	0,890
40	19,50	$1,44 \pm 0,01$	17,34	0,889
50	19,50	$1,44 \pm 0,01$	17,32	0,888
60	19,50	$1,44 \pm 0,01$	17,30	0,887

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень зміни коефіцієнта подачі насоса підживлення відновленого за типовою технологією від часу напрацювання

Час обкатки насоса, год.	Теоретична подача насоса номінальний обертання $см^3 / об$	подача при частоті валу,	Номінальний тиск, МПа	Дійсна подача насоса при номінальній частоті обертання валу, $см^3 / об$	Коефіцієнт об'ємної подачі насоса, K_Q
10	19,50		$1,44 \pm 0,01$	17,12	0,878
20	19,50		$1,44 \pm 0,01$	17,04	0,874
30	19,50		$1,44 \pm 0,01$	16,91	0,867
40	19,50		$1,44 \pm 0,01$	16,83	0,863
50	19,50		$1,44 \pm 0,01$	16,75	0,859
60	19,50		$1,44 \pm 0,01$	16,63	0,853

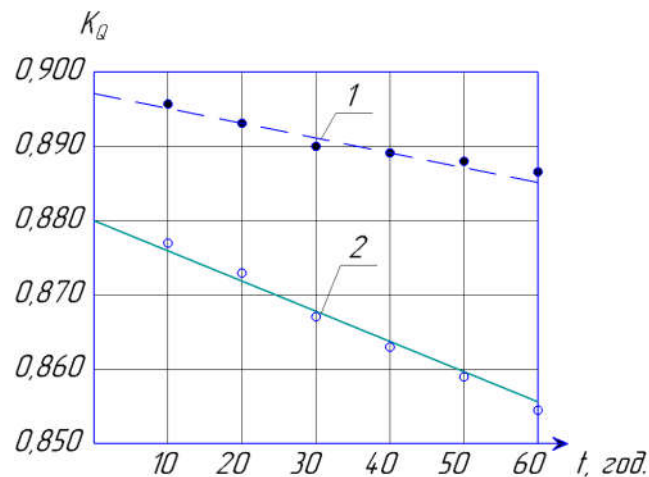


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта подачі (K_Q) насоса підживлення від наробітку (t):

1 – насос підживлення відремонтовано з застосуванням механізму компенсації торцевого зазору; 2 – насос підживлення відремонтовано за типовою технологією

Проведений аналіз отриманих результатів, наведених в (табл.2, табл.3) показує, що після наробітку десять годин коефіцієнт подачі насоса, у якого в качаючому вузлі встановлено механізм компенсації торцевого зазору, становить $K_Q = 0,896$, що практично прирівнюється до нового насоса ($K_Q = 0,90...0,92$), тоді як у насоса, відремонтованого за типовою технологією, коефіцієнт подачі становить $K_Q = 0,878$.

Поява такої різниці в показниках коефіцієнта подачі на початкових етапах експлуатації насосів вказує на те, що запропонована технологія ремонту з застосуванням механізму компенсації торцевого зазору, забезпечує мінімальне значення торцевого зазору в спряженні «поверхня притискної пластини –

торець шестерні», який формується співвідношенням сили притискання пластини до торцевої частини шестерні, і сил відтискання, які будуть відтискати пластину від торцевої поверхні шестерень за рахунок сили несучої здатності масляної плівки робочої рідини в торцевому зазорі.

Відносна зміна коефіцієнта подачі для насоса, з механізмом компенсації торцевого зазору, від початку випробувань його на стенді і до їх завершення становить 1,0%, що вказує на стабільну роботу механізму компенсації торцевого зазору в качаючому вузлі насоса.

Водночас, у насоса підживлення, відновленого за типовою технологією, значення торцевого зазору має величину, яка обумовлюється величиною геометричних розмірів деталей, що сформувались після їх притирання в процесі ремонту. Є очевидним, що в процесі подальшої експлуатації даного насоса, розмір торцевого зазору буде збільшуватись в результаті зношення деталей, що підтверджується значенням коефіцієнта подачі, який становить $K_Q = 0,853$ за 60 год. обкатки насоса на експериментальному стенді.

Відносна зміна коефіцієнта подачі для даного насоса від початку випробувань його на стенді і до їх завершення становить 2,9%, що вказує на інтенсивність зміни торцевого зазору в результаті припрацювання деталей в спряженнях на початку роботи насоса і відповідно зменшення ресурсу насоса в період його експлуатації.

Детальний аналіз отриманих графіків показує, що на момент завершення стендових випробувань коефіцієнт подачі насоса, відремонтованого, з застосуванням механізму компенсації торцевого зазору, на 4% більший, в порівнянні з коефіцієнтом подачі насоса відремонтованого за типовою технологією.

Являється явним, що забезпечення відносно високого показника коефіцієнта подачі насоса підживлення, відновленого з застосуванням механізму компенсації торцевого зазору, в період його обкатки та випробовування забезпечить γ -ресурс (80% від ресурсу нового насоса) для відремонтованого насоса в умовах експлуатації.

Висновки

1. Проведений детальний аналіз відмов аксіально-поршневих гідромашин, показав, що основна їх частина (60-75%) припадає на експлуатаційні відмови, які в основному обумовлюються технічним станом робочої рідини, що приводить до гідроабразивного зношення робочих поверхонь деталей качаючого вузла насоса підживлення аксіально-поршневого гідронасоса, зростання зазорів в спряженнях і відповідно об'ємних втрат.

2. Для забезпечення післяремонтної довговічності насосів підживлення при відновленні їх роботоздатності, рекомендується застосування в їх качаючих вузлах механізму компенсації торцевого зазору, який представляє собою пластину, що складається з робочої поверхні і пружнодемпфуючого елемента, у якому додатково розташовані канали й камери гідростатичного піджиму.

3. Розроблена конструкція стенду для обкатки та випробовування насосів підживлення, яка забезпечує безступеневе регулювання швидкості ведучої шестерні насоса за допомогою застосування гідравлічного приводу ведучого валу, випробування насосів з лівим і правим напрямом обертання ведучої шестерні, та створює stato-динамічний режим роботи насоса за швидкісним режимом.

4. Відносна зміна коефіцієнта подачі для насоса, з механізмом компенсації торцевого зазору, від початку випробувань його на стенді і до їх завершення становить 1,0%, що вказує на стабільну роботу механізму компенсації торцевого зазору в качаючому вузлі насоса і ефективність запропонованих рішень з точки зору збільшення його післяремонтної довговічності.

5. Відносна зміна коефіцієнта подачі для насоса підживлення, відновленого за типовою технологією, від початку випробувань його на стенді і до їх завершення становить 2,9%, що вказує на інтенсивність зміни торцевого зазору в результаті припрацювання деталей в спряженнях на початку роботи насоса і відповідно зменшення ресурсу насоса в період його експлуатації.

6. На момент завершення стендових випробувань коефіцієнт подачі насоса, відремонтованого, з застосуванням механізму компенсації торцевого зазору, на 4% більший, в порівнянні з коефіцієнтом подачі насоса відремонтованого за типовою технологією, що збільшує ймовірність забезпечення γ -ресурсу (80% від ресурсу нового насоса) для відремонтованого насоса в умовах експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельянцов П. Т. Опыт ремонта гидропривода ГСТ-90 на ремонтных предприятиях [Текст] / П. Т. Мельянцов, Б. Г. Харченко, И. Г. Голубев. - М.: АгроНИИТЭИИТО, 1989. - 42 с.
2. Лосіков О. М. «Вид та характер зношення деталей качаючого вузла насоса підживлення аксіально-поршневої гідромашини». Металургическая и горнорудная промышленность. - 2015.-№7.-С.170-173
3. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М. «Вплив торцевого зазору качаючого вузла насоса підживлення гідроприводу трансмісії ГСТ-90 на сумарні об'ємні втрати». Металургическая и горнорудная промышленность. -2015.-№7.-С.174-177.
4. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М., Мовчан В. Ф. Конструктивні рішення по зниженню об'ємних втрат робочої рідини в шестеренних насосах підживлення аксіально-поршневих гідромашин. Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. 2019 № 22. С. 52-61.

5. Стенд для обкатки та контролю технічного стану насоса підживлення аксіально-поршневої гідромашини / Мельянтсов П. Т., Лосіков О. М.: пат. 98408 Україна: МПК (2015.1) F15B 19/00. № u201412365; заявл. 17.11.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.
6. Юдин Е. М. Шестеренные насосы. - М.: Машиностроение, 1964.- 235 с.

REFERENCES

1. Melyantsov P.T. Experience of repair of the GST-90 hydraulic drive at repair enterprises [Text] / P.T. Melyantsov, B.G. Kharchenko, I.G. Golubev. - М.: AgroNIITEIITO, 1989. - 42 p.
2. Losikov O.M. "Type and nature of wear of parts of the oscillating unit of the booster pump of axial-piston hydraulic feed pumps". Metallurgical and mining industries. - 2015.-№7.-p.170-173.
3. Melyantsov P.T., Losikov O.M. "The influence of the end clearance of the oscillating unit of the booster pump of transmission hydraulic drive GST-90 on total volume losses." Metallurgical and mining industries. - 2015.-№7.-p.174-177.
4. Melyantsov P.T., Losikov O.M., Movchan V.F. Design solution for reduction of volume losses of hydraulic fluid in the gear booster pumps of axial-piston hydraulic feed pumps. Current problems in metallurgy. Science news. 2019 No. 22. p. 52-61.
5. The stand for running-in and technical condition control of booster pump of axial-piston hydraulic feed pumps / Melyantsov P.T., Losikov O.M.: пат. 98408 Ukraine: IPC (2015.1) F15B 19/00. № u201412365; declared 17.11.2014; publ. 27.04.2015, Bull. № 8.
6. Yudin E.M. Gear pumps. - М.: Mashinostroenie, 1964.- 235 p.

Received 09.02.2021.

Accepted 15.02.2021.

UDC 629.7:658.512.2

P. Melyantsov, O. Losikov, V. Nazarets, V. Sidorenko

THE INCREASING OF POST-REPAIR DURABILITY OF AXIAL-PISTON HYDRAULIC FEED PUMPS

The influence of constructive decisions on compensation of an end gap in the pumping unit of the pump of feeding of the axial-piston hydraulic pump, at restoration of its working condition, on its post-repair durability is considered.

The influence of the end gap in the couplings of the pumping unit of the feed pump on the volumetric losses of the working fluid and on the volumetric coefficient of its supply is investigated. A method of conducting experimental and laboratory studies to identify the functional relationship between the supply coefficient of the pump and its operating time.

The proposed design of the stand for experimental research on running-in and testing of feed pumps, which provides stepless speed control of the pump drive gear using a hydraulic drive shaft, testing pumps with left and right direction of rotation of the drive gear, and creates a static dynamic mode speed mode, which ensures the efficiency of the running-in mode of the parts in the couplings of the pumping unit of the feed pump.

The developed design of the stand for running-in and testing of feed pumps can be realized at the enterprises on technical service of hydraulic units.

A detailed analysis of failures of axial-piston hydraulic machines, which showed that most of them (60-75%) are operational failures, which are mainly due to the technical condition of the working fluid, which leads to hydroabrasive wear of the working surfaces of the pumping unit of the axial feed pump piston hydraulic pump, increasing gaps in the couplings and, accordingly, volume losses.

The relative change of the supply factor for the pump is determined, with the mechanism of compensation of the end gap, which indicates the stable operation of the compensation mechanism and the efficiency of the proposed solutions in terms of increasing its post-repair durability.

It is shown that the change in the supply factor of the pump, restored by standard technology, is due to the intensity of the change of its end gap as a result of running in the couplings at the beginning of the pump and accordingly to reduce the pump life during its operation.

From the comparative assessment of the supply coefficients of pumps repaired using the end clearance compensation mechanism and the typical technology, it follows that the proposed technology is more likely to provide 80% of the resource in service conditions for the repaired pump.

Key words: booster pump, end clearance, volume losses, charge efficiency, post-repair durability.

Мельянцов Петро Тимофійович – к.т.н., доцент, кафедра надійності і ремонту машин, Дніпровський державний аграрно-економічний університет.

Лосіков Олександр Михайлович – старший викладач, кафедра колісних та гусеничних транспортних засобів, Національна металургійна академія України.

Назарець Віктор Семенович – к.т.н., доцент, кафедра колісних та гусеничних транспортних засобів, Національна металургійна академія України.

Сидоренко Віктор Кононович – старший викладач, кафедра колісних та гусеничних транспортних засобів, Національна металургійна академія України.

Мельянцов Петр Тимофеевич – к.т.н., доцент, кафедра надежности и ремонта машин, Днепровский государственный аграрно-экономический университет.

Лосиков Александр Михайлович – старший преподаватель, кафедра колесных и гусеничных транспортных средств, Национальная металлургическая академия Украины.

Назарец Виктор Семенович – к.т.н., доцент, кафедра колесных и гусеничных транспортных средств, Национальная металлургическая академия Украины.

Сидоренко Виктор Кононович – старший преподаватель, кафедра колесных и гусеничных транспортных средств, Национальная металлургическая академия Украины.

Melyantsov Petr – Ph.D., associate professor, department of reliability and repair of machines, Dnipro State Agrarian-Economic University.

Losikov Olexander – senior lecturer, department of wheeled and full-track vehicles, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Nazarets Viktor – Ph.D., associate professor, department of wheeled and full-track vehicles, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Sidorenko Viktor – senior lecturer, department of wheeled and full-track vehicles, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

STUDY OF THE DESIGNS OF BOTTOM BLOWING DEVICES FOR OXIDATIVE BLOWING IN TEEMING LADLES

It is discussed in the article the concept proposed for the production of ultra-low carbon steel, which involves the production of crude steel in basic oxygen furnace followed by oxidative blowing with an oxygen-argon mixture in a teeming ladle to decrease a carbon content in steel to less than 0.03%. The objective of this article is to study the influence of design of the blowing devices, namely, the position and shape of the pores, on the efficiency of metal homogenization in the teeming ladle. Based on the water modeling, the most efficient design of the blowing devices has been selected.

Keywords: steel, homogenization, ultra-low carbon steel, oxidative blowing

Introduction

Ultra Low Carbon (ULC) steels have good formability and a superior surface quality. These advantages provide their use as automobile panels since the latter half of the 1980s. This automobile panel material is normally produced by cold rolling and annealing after hot rolling, in which hot rolling is usually finished in the austenite region at the elevated temperature [1].

Conventional IF steels which following the introduction of vacuum degassing technology contained carbon in the range of 40-70 ppm and nitrogen in the range of 30-50 ppm. Later, niobium and/or titanium were added to these steels to stabilize the interstitial carbon and nitrogen atoms [1].

Carbon and nitrogen in sheet steel results in higher mechanical properties, age hardening, and deterioration of the r-value (measure of resistance to thinning and drawability). Liquid steel is processed through a vacuum degasser to reduce carbon and nitrogen to levels low enough that the remainder can be “stabilized” by small additions of titanium and niobium [1].

Titanium and niobium are strong carbide/nitride formers, taking the remaining carbon and nitrogen out of solution in liquid iron, after which these latter two elements are no longer available to reside in the interstices between solidified iron atoms. Non-ageing IF steel has no yield point elongation, which means fluting and stretcher strains are never a problem [1].

The IF steel made using only titanium is very common and is used to produce the best mechanical properties for deep drawing. Also, a very popular type of IF steels is stabilized with both titanium and niobium. The synergy of these two elements allows complete stabilization to be achieved at lower levels of each element. Depending on the relative amounts of titanium and niobium, the steel needs to be annealed at a higher temperature during galvanizing and has slightly inferior mechanical properties to the Ti type [1].

Literature Review

There are 3 technological routes for the production of ULC steel: 1) smelting of crude steel in an EAF followed by refining in AOD converter; 2) smelting of crude steel in BOF or LBE-converter followed by processing in RH-OB, VOD or VD-OB and 3) LWS-process [2-4]. The third route is not used outside of France [5]. Both technological routes significantly increase the cost of steel through application of additional units for deep decarburization of steel below a critical concentration of 0.03%. A cheaper alternative to the above-mentioned technologies is smelting of crude steel in BOF to carbon content of 0.03%, followed by oxidative blowing in a teeming ladle with oxygen-argon mixture [6].

Important indicators for the implementation of the proposed technology are the durability of the blowing devices and the mixing time of the metal in the ladle. The high durability of blowing devices can be achieved by a rational blowing mode and gases flow rates. The mixing time depends of many factors, including the design of the blowing devices, their location, the blowing mode, etc. [6].

It has been carried out number of studies aimed to determine the optimal location of the blowing devices and blowing modes [7-13]. But the effect of pores location and type of porosity in the blowing devices on the averaging mixing time still remains unexplored.

The aim of the study is to determine the effect of pores location in the blowing devices on the mixing time.

Material and methods

Investigation of the pores shape effect on the mixing time is possible by two methods: 1) mathematical modeling using special commercial programs [8-11] and 2) physical modeling on water models [8, 10, 12-14]. In the present study, the second method has been used, which has been successfully applied in previous studies [6-8,

10, 12-14]. Estimation of mixing time during physical modeling on water models is possible in three ways: temperature, optical, and chemical (conductive) [15]. Since the temperature method has a high inertness, and the results obtained with the conductive method can differ depending on the location of the electrodes in the ladle model, an optical method has been chosen to estimate the mixing time, which has a sufficiently high accuracy and visibility.

The object of the study was a unit cell mixing of the teeming ladle of 250 t capacity, in which the distribution of the additive occurs. According to the principles of similarity theory, the gas flow rate can be described by the dimensionless volumetric flow rate [13] and the mixing time by the modified homochromous number [6]

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g \cdot d^5}}, \quad (1)$$

$$Ho' = \frac{g \cdot \tau^2}{d}, \quad (2)$$

where q – gas flow rate; g – acceleration of gravity; d – diameter of porous plug; τ – mixing time.

By using the linear scale of the model, it can be determined from formula (1) the gas flow rate for the model, as well as the homogenization time for the prototype

$$q_m = q_p \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^{2.5}, \quad (3)$$

$$\tau_p = \tau_m \sqrt{\frac{d_p}{d_m}}. \quad (4)$$

Table 1

Parameters for prototype and model

Parameter	Prototype	Model
Fluid level, m	3,768	0,45
Diameter of porous plug, m	0,120	0,014
Gas flow rate, l/min	100-500	0,49-2,46
Usual processing time, min	10	3,5
Q number	0,11-0,53	0,11-0,57

For the experiment, an experimental facility (Fig. 1) was assembled on a 1:8 scale, consisting of a compressor 1 that pumps air into the receiver 2, which is

necessary for maintenance of constant pressure and smooth regulation by valve 4. A pressure gauge 3 is installed to measure air pressure and a float-type area flowmeter 5 PM-0.63 to measure its flow rate. As a model of a unit cell of mixing, a cylindrical tank 6 of acrylic plastic was used. It consists of a chamber and a socket in which a model of the porous plug was installed. Specifically, for the experiment, porous plug with round pores (4 pores of 1 mm in diameter), rectangular (4 parallel slots 5×1 mm in size and spaced 1 mm apart) and with non-oriented porosity were made. To make a high-quality video, the model was installed in the dark chamber 9, which reduces the light glare on the model walls. Artificial lighting allows getting a directed beam of light.

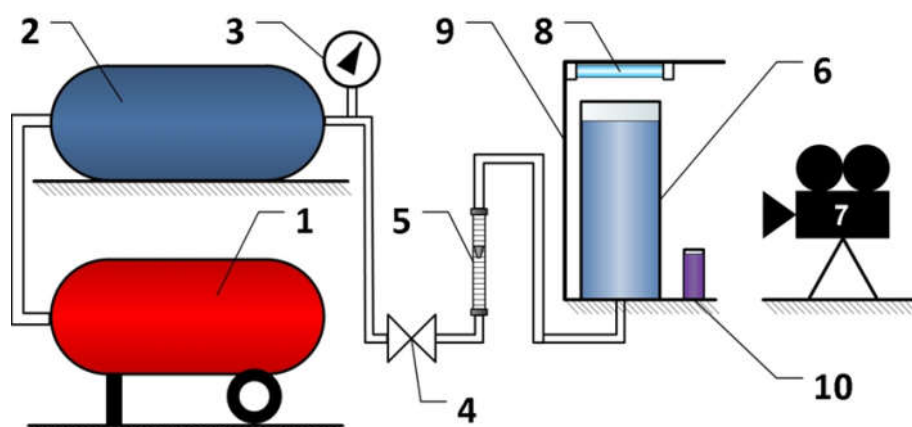


Figure 1 – General scheme of the experimental facility: 1 – compressor; 2 – receiver; 3 – pressure gauge; 4 – valve; 5 – float-type area flowmeter PM-0.63; 6 – the model of an elementary mixing cell; 7 – video camera; 8 – a lamp; 9 – the dark chamber; 10 – control sample

As a tracer imitating chemical heterogeneity of the melt, we used a 30% aqueous solution of KMnO_4 , in an amount of 100 ml. A tracer was poured at the top of the model. The completion of melt homogenization was judged by approximating the color intensity of the solution to the color of a 3.5% KMnO_4 aqueous solution installed in a transparent container on the other side of the transparent model.

Results

Using the video, the time was estimated for which the entire volume of liquid reached a uniform color, the same as the color of the control sample. Frames corresponding in time to 0, 2, 3, 4, and 5 seconds after adding a tracer for each design of the blowing devices are shown in Fig. 2. To obtain adequate results, 5 series of experiments were carried out using each design of the blowing devices.

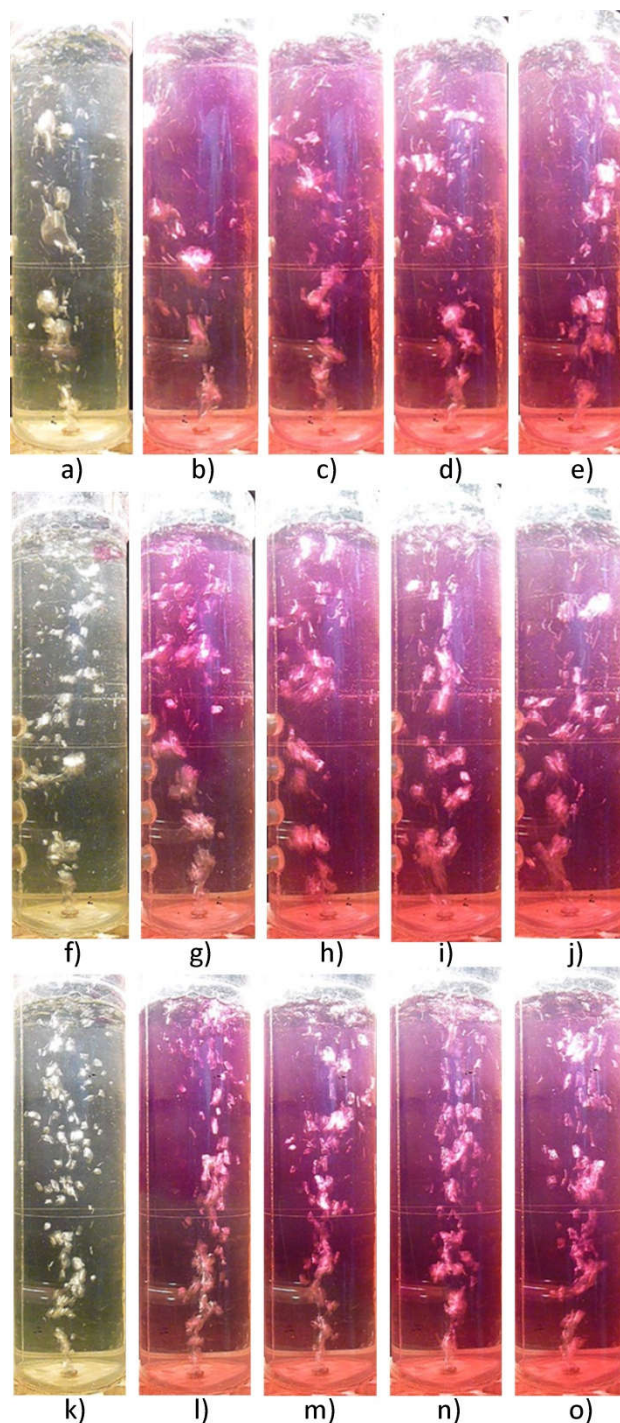


Figure 2 – Change in water color right after adding a tracer (a, f, k), after 2 s (b, g, l), 3 (c, h, m), 4 s (d, i, n) and 5 s (e, j, o) when using blowing units with pores of round (a-e) and rectangular (f-j) shapes and with non-oriented porosity (k-o)

Discussion

Figure 3 shows a comparison of the average tracer mixing time in water. As can be seen from the comparison, blowing devices with non-directional porosity provide the shortest mixing time. This is probably due to the larger total specific area of the bubbles that form on the surface of the blowing device with non-oriented porosity.

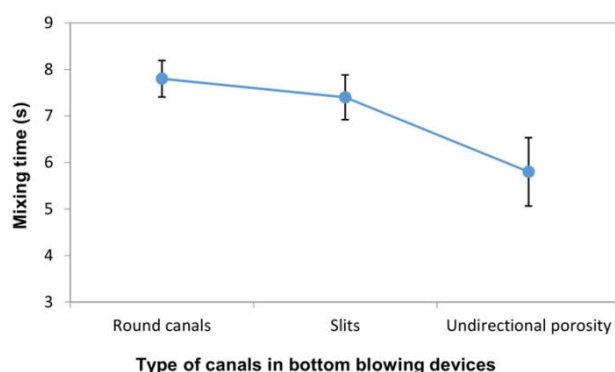


Figure 3 – Comparison of mixing time when using porous devices of various designs

At the same time, plugs with non-oriented porosity have two significant disadvantages [16]. The first is the rapid wear of the working part of the blowing devices in contact with the metal. The second disadvantage is their low throughput. The last one is eliminated when using plugs with slot porosity. However, when using such plugs, there is a risk of deep infiltration of liquid metal into the slots during an uneven argon supply.

Conclusions

Using the method of physical modeling in a water model, it has been found that the best results on mixing the chemical composition of liquid metal in a ladle show blowing devices with non-oriented porosity. They are ideally suited for oxidative blowing in a teeming ladle with an argon-oxygen mixture necessary for the production of ultra-low carbon steel with an oxygen content of less than 0.03%. The aim of further research is the development of the design of the mixing chamber of the blowing device, in which oxygen and argon are pre-mixed before being blown into the liquid metal.

REFERENCES

1. Ultra low carbon interstitial free steels. (n.d.). Retrieved December 04, 2020, from <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=449>
2. Yu Huang, Guo-guang Cheng, Qiming Wang, Shi-jian Li & Wei-xing Dai (2019). Mathematical model for decarburization of ultra-low carbon steel during RH treatment, *Ironmaking & Steelmaking*, doi: 10.1080/03019233.2019.1567999.
3. Wimer H.E. (1998). Обзор технологий и агрегатов ковшовых металлургии (Overview of Ladle Metallurgy Technologies and Units). Чёрные металлы (Ferrous Metals), No. 6, pp. 26-28 (in Russian).
4. Brachet D., Gatellier C., Zbaczyniak Y., Nadif M., Chapellier Ph., Leclercq A. (1993). Metallurgical comparison of various production routes for low and ultra-low carbon steels, *Revue de Metallurgie*, Vol. 90, No. 1, pp. 77-83, doi: 10.1051/metal/199390010077
5. Sujay Kumar Dutta, Yakshil B. Chokshi (2020). *Basic Concepts of Iron and Steel Making*. Singapore, Springer, doi: 10.1007/978-981-15-2437-0
6. Molchanov L., Sheremeta N., Synehin Y. (2018). Study of efficiency of liquid steel homogenization with blowing through blocks of various designs. *Theory and Practice of Metallurgy*, doi: 10.34185/tpm.6.2018.10

7. Haiyan Tang, Jinwen Liu, Shuo Zhang, Xiaochen Guo, Jiaquan Zhang (2019). A novel dual plugs gas blowing mode for efficient ladle metallurgy, *Ironmaking & Steelmaking*, doi: 10.1080/03019233.2019.1576270
8. Ramasetti E., Visuri V.-V., Sulasalmi P., Palovaara T., Gupta A. K., Fabritius T. (2019). Physical and CFD Modeling of the Effect of Top Layer Properties on the Formation of Open-Eye in Gas-Stirred Ladles With Single and Dual-Plugs, *Steel Research International*, doi: 10.1002/srin.201900088
9. Liu H., Qi Z., Xu M. (2011). Numerical simulation of fluid flow and interfacial behavior in three-phase argon-stirred ladles with one plug and dual plugs, *Steel Research International*, doi: 10.1002/srin.201000164
10. Liu W., Tang H., Yang S., Wang M., Li J., Liu Q., Liu J. (2018). Numerical simulation of slag eye formation and slag entrapment in a bottom-blown argon-stirred ladle, *Metallurgical and Materials Transactions B*, doi: 10.1007/s11663-018-1308-6
11. Chen Y., Pang Y., Zhang X. (2011). Numerical study on effects of molten steel flow about different blowing argon position in ladle furnace, *Advanced Materials Research*, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.146-147.1031
12. Hai-yan Tang, Jingshe li, Cui-hong Xie, Shufeng Yang, Kai-ming Sun, De-song Wen (2009). Rational argon stirring for a 150-t ladle furnace, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials B*, doi: 10.1016/S1674-4799(09)60068-6
13. Krishnapisharody K, Irons G.A. (2006). Modeling of slag eye formation over a metal bath due to gas bubbling, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials B*, doi: 10.1007/s11663-006-0058-z
14. Mandal J, Patil S., Madan M., Mazumdar D. (2005). Mixing time and correlation for ladles stirred with dual porous plugs, *Metallurgical and Materials Transactions B*, doi: 10.1007/s11663-005-0039-7
15. Yeronko S.P., Bykovskykh S.V. (1998). Fizychnye modelyuvannya protsesiv pozapichnoyi obrobky ta rozlyvannya stali (Physical modeling of the processes of ladle processing and casting of steel). Kyiv, Tekhnika (in Ukrainian).
16. Egorov, I.V., Matvienko, A.S. (2011). Blow plugs from ООО Keralit. *Refractories and Industrial Ceramic*, Vol. 51, No. 6, pp. 411-415, doi: 10.1007/s11148-011-9339-4

Received 19.01.2021.

Accepted 29.01.2021.

УДК 669

Л.С. Молчанов, Н.А. Арендач, Є.В. Синегін

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДОННИХ ПРОДУВОЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУВКИ У СТАЛЕРОЗЛИВНИХ КОВШАХ

У статті обговорюється концепція, запропонована для виробництва ультранизьковуглецевої сталі, яка передбачає виробництво сирової сталі в кисневому конвертері з подальшою окислювальною продувкою сумішшю кисню та аргону в сталерозливному ковші для зменшення вмісту вуглецю в сталі до менш ніж 0,03%. Висока ефективність запропонованої технології можлива лише за умови інтенсивного протікання процесу зневуглецювання металу, який складається з трьох ланок: підведення реагентів до газової бульбашки, хімічна взаємодія реагентів на міжфазній поверхні і відведення від неї продуктів реакції. За низької концентрації вуглецю в металі лімітуючою ланкою процесу стає масопереніс вуглецю до міжфазної поверхні, який може бути інтенсифікований перемішуванням розплаву. Завдання цієї статті полягає у вивченні впливу конструкції продувочних пристроїв, а саме розташування та форми пір, на ефективність гомогенізації металів у сталерозливному ковші. Для

вирішення поставленої задачі було обрано метод фізичного моделювання на водній прозорій моделі. Розглянуто продувочні пристрої з круговим отвором, шпариною та ненаправленою пористістю. Для проведення фізичного моделювання за теоремою Букінгема було обрано числа подоби для описання досліджуваного процесу. Зокрема запропоновано використовувати безрозмірну об'ємну витрату і модифікований критерій гомохронності. Використовуючи метод фізичного моделювання на водяній моделі, було встановлено, що найкращі результати з усереднення хімічного складу рідкого металу в ковші демонструють продувочні пристрої з неорієнтованою пористістю. Вони ідеально підходять для окисного продування в переповненому ковші сумішшю аргону та кисню, необхідною для виробництва наднизьковуглецевої сталі з вмістом кисню менше 0,03%. Метою подальших досліджень є розробка конструкції змішувальної камери продувочного пристрою, в якій кисень і аргон попередньо змішуються перед вдуванням у рідкий метал.

Ключові слова: сталь, гомогенізація, наднизьковуглецева сталь, окисне продування.

UDC 669

L. Molchanov, N. Arendach, Y. Synehin

STUDY OF THE DESIGNS OF BOTTOM BLOWING DEVICES FOR OXIDATIVE BLOWING IN TEEMING LADLES

It is discussed in the article the concept proposed for the production of ultra-low carbon steel, which involves the production of crude steel in basic oxygen furnace followed by oxidative blowing with an oxygen-argon mixture in a teeming ladle to decrease a carbon content in steel to less than 0.03%. High efficiency of the proposed technology is possible only under the intensive process of metal decarburization, which consists of the three stages: supply of reagents to the gas bubble, chemical interaction of reagents on the interfacial surface and removal of reaction products. At low carbon concentrations in the metal, the limiting link of the process is carbon mass transfer to the interfacial surface, which can be intensified by melt stirring. The objective of this article is to study the influence of design of the blowing devices, namely, the position and shape of the pores, on the efficiency of metal homogenization in the teeming ladle. Blowing devices with a circular hole, a slit and undirectional porosity were considered. To perform physical simulation by Buckingham's theorem, similarity numbers were chosen to describe the considered process. In particular, it is proposed to use dimensionless volume flow and a modified homochronicity number. Based on the physical simulation on the “water” model, it was found that the best results of homogenization of the chemical composition of the liquid metal in the teeming ladle show blowing devices with undirected porosity. They are ideal for oxidative purging in a crowded ladle with a mixture of argon and oxygen required for the production of ultra-low carbon steel with an oxygen content of less than 0.03%. The purpose of further research is to develop the design of the mixing chamber of the purge device, in which oxygen and argon are pre-mixed before injection into the liquid metal.

Keywords: steel, homogenization, ultra-low carbon steel, oxidative blowing

Молчанов Лавр Сергійович – к.т.н., завідувач відділом фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України.

Арендач Наталя Анатоліївна – аспірантка кафедри металургії чавуну і сталі, Національна металургійна академія України.

Синегін Євген Володимирович – доцент, к.т.н., доцент кафедри металургії чавуну і сталі, Національна металургійна академія України.

Молчанов Лавр Сергеевич – заведующий отделом физико-технических проблем металлургии стали, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины.

Арендач Наталья Анатольевна – аспирантка кафедры металлургии чугуна и стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Синегин Евгений Владимирович – доцент, к.т.н., доцент кафедры металлургии чугуна и стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Molchanov Lavr – PhD, Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Arendach Natalia – PhD Student, Department of Iron and Steel Metallurgy, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Synehin Yevhen – PhD, Associate Professor, Department of Iron and Steel Metallurgy, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ ЗАПИЛЕНOSTІ СЕРЕДОВИЩА НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ГАЗОВОГО, ПАЛАЮЧОГО ФАКЕЛУ

Процес кисневого конвертування супроводжується виділенням значного обсягу газів, що містять в основному продукти реакцій окислення вуглецю, які формують палаючий факел над горловиною конвертера. При цьому з конвертера виділяється значна кількість пилу різного складу і фракції в залежності від технологічних особливостей продувки, дослідження і облік впливу якої необхідний для розуміння якісних характеристик факела і конвертерного процесу в цілому. У роботі наведені результати дослідження на фізичній моделі, що імітує палаючий факел в запиленому середовищі, шляхом введення твердих порошків різних речовин, на якісні показники горіння факела: візуальні і теплопередачу. Досліджено подачу в палаючий факел порошків хлориду натрію, оксидів заліза, кремнію та алюмінію, чистих порошків заліза, кремнію та алюмінію, сажі і графіту. Встановлено, що введення різних компонентів в факел з температурою нижче, ніж температура факела, навіть при можливому візуальному збільшенні яскравості характеристик, що зокрема встановлено при введенні хлориду натрію або порошку заліза, сприяють зниженню теплопередачі від факела за рахунок відбору тепла на нагрівання і згорання частинок, що вводяться.

Ключові слова: фізичне моделювання факелу допалювання конвертерних газів, порошкові матеріали, візуальні характеристики факелу, теплопередача.

Вступ

Киснево-конвертерний процес заснований на тісній взаємодії рідкої і газової фаз [1, 2]: основним чинником, що обумовлює протікання всіх процесів, служить спрямований потік кисню, а сам процес конвертування супроводжується виділенням значного обсягу газів, що містять продукти реакцій окислення вуглецю (CO і CO_2), а також азот, водень і кисень. Зазначені процеси при температурних і хімічних умовах конвертування супроводжуються горінням з утворенням факела: в порожнині конвертера в реакційній зоні і допалювання газів, що відходять, над горловиною конвертера [1, 2].

Кисневий факел, що забезпечує фізико-хімічні процеси в реакційній зоні, і факел допалювання газів, що відходять, тісно взаємопов'язані між собою [3]. Отже, вивчення і контроль останнього, як легше реєстрованого за ходом

продувки в умовах реальних високотемпературних процесів, може дати якісну інформацію про теплові і масообмінні процеси, що протікають в порожнині конвертера.

Значний газовий потік виносить з собою з конвертера також велику кількість пилу [4-6]. При верхній кисневій продувці пилевинос можна охарактеризувати наступними показниками [6]: концентрація загального заліза в пилу (57-79%), металевого заліза (1,8-62%), вміст вуглецю (0,7-2,6%), діапазон розмірів частинок пилу складає 0,1-1000 мкм. Різномірні частинки пилу, коли вони присутні в значній кількості, повинні впливати на властивості газового факелу, а значить актуальним є дослідження впливу запиленості середовища на його характеристики.

З огляду на вище наведене, в роботі було проведено дослідження на фізичній моделі впливу введення твердої порошкової фази на характеристики факела.

Методика проведення досліджень

Для проведення досліджень була виготовлена фізична модель, що дозволяє імітувати процес горіння газів, що відходять, в умовах запиленого середовища. Експериментальна установка представлена на фото на рисунку 1. Основним конструктивним елементом установки був газовий пальник, що формує палаючий факел. Сопло пальника і безпосередньо формуємий факел розміщувалися як в кварцовій трубці, що виключало вплив конвективних потоків при теплопередачі між факелом і мідною пластиною, яка реєструвала тепловий потік, для можливості виміру впливу вдуваних порошків на теплопередачу від факелу випромінюванням, так і без неї для реєстрації загального теплового потоку. Порошок (з кімнатною температурою) для створення газопорошкової суміші надходив з бункера безпосередньо в палаючий факел за допомогою вдування повітрям, що подавалося від компресора. В ході дослідів безперервно вимірювали температуру повітря в кімнаті в районі колби, температуру мідної пластини і температуру зовнішньої поверхні колби під факелом. Витрата порошку була постійною і визначалася зі зміни його маси.

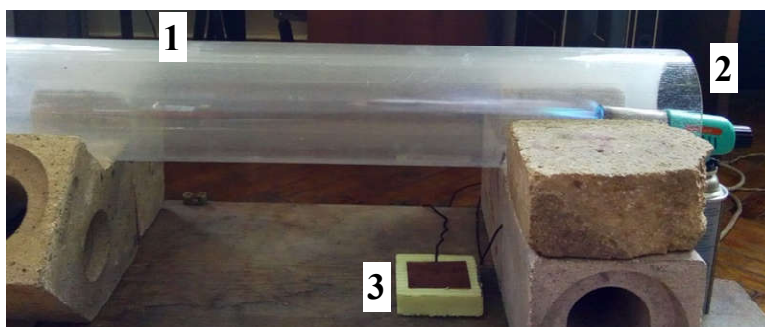


Рисунок 1 – Фото експериментальної установки: 1 – кварцова колба;
2 – газовий пальник; 3 – мідна пластина

Оскільки в ході кожного дослідження кварцова труба неминує нагрівалася і сама ставала джерелом теплопередачі до мідної пластини, перед кожним дослідом її охолоджували до кімнатної температури потоком прохолодного повітря.

Для імітації запиленості факела використовували порошки FeO , Al_2O_3 , NaCl , графіт, пісок, сажу, порошки заліза, алюмінію і кремнію. Діапазон розмірів частинок використовуваних порошків 50-460 мкм.

Результати досліджень

На рисунку 2 для прикладу наведені найбільш яскраво ілюструючі фото експериментів: з продувкою без порошку, з вдуванням в факел сажі, порошку заліза і хлориду натрію.

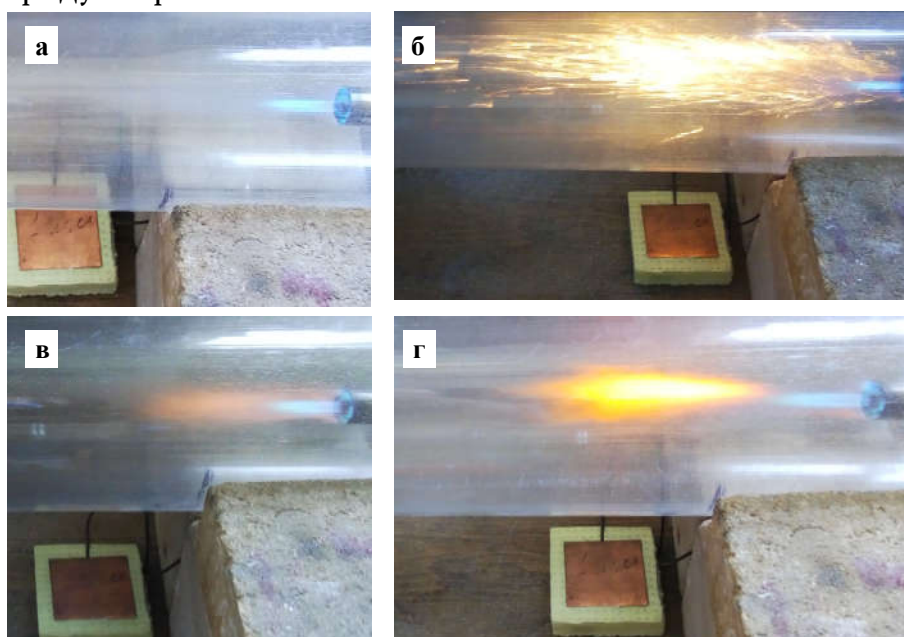


Рисунок 2 – Фото ділянок утворення факела для продувок: а - без порошку, б - подача порошку заліза, в - сажі, г - хлориду натрію

Було відзначено, що введення різних твердих, дрібнодисперсних компонентів в палаючий факел порізно відбивається на його видимих характеристиках. Так, при вдуванні в факел сажі і графіту відзначалося деяке візуальне збільшення його яскравості. Більш значуще збільшення візуальної яскравості відзначено при подачі порошку хлориду натрію з характерним жовтим світінням, а найбільше збільшення яскравості факела відповідало варіантові з подачею залізного порошку з утворенням великої кількості іскор палаючих частинок порошку (рисунок 2).

Крім збільшення візуальних показників яскравості відзначено зміну довжини видимого факела. Під час продування без подачі порошку в даних дослідях довжина видимої частини факела становила близько $57 \cdot 10^{-3}$ м,

при подачі графіту або сажі довжина видимого факелу збільшувалася приблизно вдвічі. Введення порошку хлориду натрію призводило до збільшення довжини факелу у 4,7 рази, а при введенні порошку заліза відзначено найбільше збільшення довжини, з урахуванням іскор, приблизно в 6,7 разів (рисунок 3). Збільшення довжини видимої частини факелу свідчить про можливість деяких порошоків випромінювати при нагріванні та згорянні при досягненні температури факелу (що в умовах даного експерименту складала близько 1000 °С).



Рисунок 3 – Зіставлення довжини видимої частини факела при подачі в нього різних порошкових речовин

Порівняння ефективності теплопередачі випромінюванням, як основним шляхом передачі тепла від факела, при вдуванні в нього різних порошоків було розраховано, виходячи з зареєстрованих даних, по величині середнього теплового потоку до мідної пластини за формулою [7]:

$$q = \frac{c_{Cu} m_{Cu} (t_{кін}^{Cu} - t_{поч}^{Cu})}{f_{Cu} \tau} \pm 3,26 \cdot \left| \bar{t}_{Cu} - \bar{t}_{оточ} \right|^{5/4}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

де c_{Cu} – питома теплоємність мідної пластини, Дж/(кг·°С); m_{Cu} – маса мідної пластини, кг; $t_{поч}^{Cu}$ и $t_{кін}^{Cu}$ – відповідно початкова і кінцева температура мідної пластини, °С; f_{Cu} – площа поверхні пластини, м²; τ – час одного досліду, с; $\bar{t}_{Cu}$ и $\bar{t}_{оточ}$ – відповідно середня температура мідної пластини і навколишнього середовища протягом досліду. На рисунку 4 наведено результати розрахунку. Як видно найбільша величина надлишкової щільності теплового потоку випромінюванням відповідає варіанту без подачі порошоків. Введення порошкових матеріалів проявилось в зниженні величини теплового потоку випромінюванням, що пов'язано як з відбором тепла частинками порошку на нагрівання та згорання, так і з тим, що введення порошоків здійснювалося за допомогою перенесення потоком холодного повітря, що знижує температуру

факела. При обліку того, що витрата повітря в усіх дослідках підтримувалася на однаковому рівні, за отриманими результатами можна якісно судити про вплив тієї чи іншої дослідженої речовини на теплопередачу випромінюванням. Так найменший вплив щодо всіх досліджених речовин чинила подача хлориду натрію (зниження величини теплового потоку випромінюванням в 1,42 рази). Далі по меншій величині впливу слідували порошки алюмінію, заліза, пісок і вуглець вмістні матеріали (сажа та графіт) (зниження величини теплового потоку в 1,70, 1,83, 1,93, 2,13 і 2,43 рази відповідно). Найбільший вплив серед досліджених речовин чинив порошок оксидів заліза і алюмінію (зниження щільності теплового потоку в 3,12 і 5,01 разів відповідно).



Рисунок 4 – Порівняння щільності теплового потоку випромінюванням при вдуванні різних порошків

Для кожного з варіантів подачі твердих матеріалів у палаючий факел був визначений також загальний тепловий потік і вклад різних типів теплопередачі: конвекцією, випромінюванням або контактним теплообміном у загальному обсязі теплового потоку (рисунок 5).

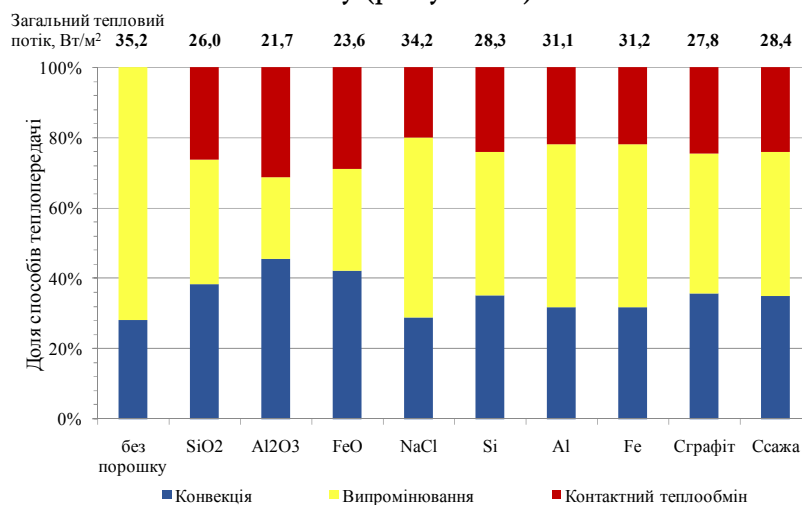


Рисунок 5 – Співвідношення різних типів теплопередачі при вдуванні різних порошків

Аналіз отриманих даних свідчить про наступне. Не зважаючи на той факт, що вдування твердих «холодних» відносно температури палаючого факелу порошоків значно (у рази) знижують показник випромінювання факелу, вплив на загальний тепловий потік твердих часток дещо інший. Це обумовлено додатковою можливістю перенесення тепла конвективними потоками та контактним теплообміном часток, що прогріваються палаючим факелом, з мідною пластиною (у разі продування без кварцової труби). Встановлено, що серед переліку випробуваних порошоків найменший вплив чинить вдування порошку NaCl (зниження загального теплового потоку на 2,8%), а найбільший вплив чинить вдування порошоків оксидів заліза і алюмінію (зниження загального теплового потоку на 33,0 та 38,3%).

Висновки

Таким чином, проведені дослідження на фізичній моделі дозволили якісно дослідити вплив введення різних порошкових матеріалів на такі характеристики палаючого факелу, як візуальні показники і теплопередачу від факелу. Виявлено, що подача будь-якого твердого матеріалу з температурою значно нижчою за температуру факела найбільш негативно відбивається на теплопередачі від факела випромінюванням навіть при можливому візуальному збільшенні яскравості показників. Проте на загальний тепловий потік подача твердих матеріалів у палаючий факел чинить значно менший вплив. Отже, для розуміння реально протікаючих в конвертері процесів допалювання газів, що відходять (наприклад, при оцінці теплопередачі факела ванні), необхідно враховувати поточні умови горіння факела, які залежать від технологічних особливостей ведення плавки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бигеев А. М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали / А. М. Бигеев. - Челябинск: - Metallurgia, 1988. - 479 с.
2. Баптизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский - М.: Metallurgia, 1975. - 376 с.
3. АСУТП в конвертерном производстве: Учебник / А.Г.Величко, В.П.Иващенко, А.А.Верховская, В.И.Головко, А.Н.Селегей. – Днепропетровск: НМетАУ, 2016. - 245 с.
4. Симонян Л. М. Особенности пылеобразования при кислородной продувке расплава и возможные пути использования уловленной пыли / Л. М. Симонян, Н. М. Говорова // Metallurg. - 2011. - № 6. - С. 78-85.
5. Кожухов А. А. Моделирование газоструйной пылеочистки над зоной продувки кислородного конвертера / А. А. Кожухов, Э. Э. Меркер, А. А. Шевченко // Metallurg. - 2010. - № 9. - С. 41-44.
6. Охотский В. Б. Характеристика пылеуноса при продувке металла окислительным газом / В. Б. Охотский // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 2000. - № 5. - С. 100-102.
7. Румянцев В.Д. Теория тепло - и массообмена/ В.Д. Румянцев.- Днепропетровск: Пороги, 2006. - 532 с.

REFERENCES

1. Bigeev A. M. (1988) *Metalurgiiia stali. Teoriya i tehnologiiia plavki stali*, Cheliabinsk: Metallurgiiia, 479 p. [in Russian]
2. Baptizmanskiy V. I. (1975) *Teoriia kislorodno-konverternogo processa*, Moscow: Metallurgiiia, 376 p. [in Russian]
3. Velichko A.G., Ivashenko V.P., Verhovskaia A.A., Golovko V.I., Selegey A.N.(2016) *ASUTP v konverternom proizvodstve*, Dnepropetrovsk: NmetAU, 245 p. [in Russian]
4. Simonian L. M., Govorova N.M. (2011) Osobennosti pileobrazovaniia pri kislorodnoy produvke rasplava i vozmozniie puti ispolzovaniia ulovlennoy pyli, *Metallurg* , no.6, P. 78-85. [in Russian]
5. Kozhuhov A. A., Merker E.E., Shevchenko A.A. (2010) Modelirovaniie gazostruynoy puleochistki nad zonoy produvki kislorodnogo konvertera, *Metallurg*, no. 9, P. 41-44. [in Russian]
6. Okhotskiy V.B.(2000) Haracteristiki pileunosa pri produvke metalla oksilitelnyim gazom, *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, no. 5, P. 100-102. [in Russian]
7. Rumiantsev V.D. (2006) *Teoriia teplo- i massoobmena*, Dnepropetrovsk: Porogi, 532 p. [in Russian]

Received 12.01.2021.

Accepted 21.01.2021.

UDC 669.184

L. Molchanov, Ye. Sinegin, T. Golub, S. Semykin

**INVESTIGATIONS ON THE PHYSICAL MODEL OF THE PECULIARITIES
OF THE INFLUENCE OF DUST ON THE QUALITY INDICATORS
OF A GAS BURNING TORCH**

The oxygen converter process is accompanied by the release of a significant amount of gases, containing mainly the products of carbon oxidation reactions, which form a burning torch over the neck of the converter. A significant amount of dust of different composition and fraction is also released from the converter depending on the technological features of the blowing, the study and accounting of the impact of which is necessary to understand the qualitative characteristics of the torch and the converter process in general. The paper presents the results of a study on a physical model simulating a burning torch in a dusty environment, by introducing solid powders of various substances, on the qualitative indicators of torch combustion: visual and heat transfer. The supply of powders of sodium chloride, oxides of iron, silicon and aluminum, pure powders of iron, silicon and aluminum, carbon black and graphite to the burning torch was investigated. It was established that the introduction of various components into the torch with a temperature lower than the temperature of the torch, even with a possible visual increase in brightness characteristics, in particular when introducing sodium chloride or iron powder, reduce heat transfer from the torch due to the heat absorption for heating and combustion of introduced particles.

Keywords: physical modeling of postcombustion converter gas torch, powder materials, visual characteristics of torch, heat transfer.

Молчанов Лавр Сергійович – к.т.н, завідуючий відділом Фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Синегін Євген Володимирович – к.т.н., доцент кафедри Металургії чавуну і сталі, Національна металургійна академія України.

Голуб Тетяна Сергіївна – к.т.н., старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Семикін Сергій Іванович – к.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Molchanov Lavr – Ph.D., Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Synegin Yevhen –Ph.D., Associate Professor of the Department of Iron and Steel Metallurgy, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Golub Tetiana –Ph.D., senior researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Semikin Sergiy – Ph.D., senior researcher, senior researcher of the Department of Physical and Technical Problems, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНО ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТРУКТУР АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЗАДАЧ

В данной работе на примере решения тепловых задач математической физики показана возможность создания максимально параллельной формы вычислительных алгоритмов решения тепловых задач и их отображение на архитектуру многопроцессорных систем. Показано, что эффективным средством исследования задач тепло- и массообмена в металлургическом производстве можно считать применение технологий параллельных вычислений на распределенных системах кластерного типа, которые имеют сравнительно небольшую стоимость и достаточно легко масштабируются как по количеству процессоров, так и по объему оперативной памяти. Распараллеливание систем трехдиагональной структуры реализовывалось численно-аналитическим подходом, что предопределило их максимально параллельную алгоритмическую форму. Такой подход способствует минимально возможное время реализации разработанного алгоритма на параллельных вычислительных системах. Кроме этого, во время параллельных вычислений арифметических выражений, в разработанном алгоритме погрешность выходных данных отделяется от операций округления. Такой подход способствует минимально возможное время реализации разработанного алгоритма на параллельных вычислительных системах.

Ключевые слова: тепловые задачи, параллельные вычисления, многопроцессорная система, параллельный алгоритм, метод прямых.

Постановка проблемы

Практика последних лет показывает, что ни интенсификация процессов горно-металлургического производства, ни конструктивное усовершенствование соответствующего оборудования невозможны без изучения и анализа тепло- и массообмена методами математического моделирования. Математическое моделирование базируется на использовании вычислительной техники. Его значимость возрастает в связи с тем, что современная наука и техника постоянно требует данных о таких процессах, экспериментальное изучение которых в лабораторных или натурных условиях очень сложно и дорого, а в некоторых случаях и просто невозможно. Классический подход к решению тепловых задач металлургии и горного дела не всегда оказывается пригодным для использования многопроцессорных вычислительных систем из-за низкой скорости решения задачи, невысокой

точности, большого объема памяти вычислительных ресурсов. В этой связи средства вычислительной математики стимулируют развитие и реализацию новых идей. И тогда, как следствие, создается новый подход для конструирования численных экспериментов на основе более совершенного математического аппарата, который ориентируется на использование многопроцессорных вычислительных систем.

В настоящее время новые вычислительные систем характеризуются возможностью одновременного и параллельного использования большого количества процессоров для обработки соответствующей информации. Создание таких систем определило одно из важнейших направлений повышения скорости решения сложных и трудоемких задач. Опыт эксплуатации первых параллельных систем показал, что для их эффективного использования нужно радикально изменять структуру числовых методов.

Очевидно, что класс задач, которые можно решать, используя параллельные алгоритмы, отмечается не только разнообразием, такие задачи очень важны для промышленности и экономики. Однако следует учитывать, что параллельность задачи зависит не только от ее физического смысла, но и от выбранного числового алгоритма. В данной работе, на примере решения тепловых задач математической физики, показана возможность создания максимально параллельной формы вычислительных алгоритмов.

Анализ последних достижений в данной области

Проблема разработки численных методов для исследования тепловых процессов горно-металлургического комплекса на сегодняшний день не вызывает никаких сомнений. Так, необходимость учета теплообменных процессов в вентиляционных расчетах освещена в работах в [1, 2], достаточно перспективный подход к описанию тепловых процессов в металлургии представлен в работах [3, 4].

Вместе с тем, отметим, что сервисные пакеты, которые используются для исследования тепловых процессов, базируются на обработке массивов данных, упорядоченных относительно узлов сеточной области. При этом в практике использования методов конечно-разностной аппроксимизации сложилось устойчивое мнение о неопределенности изменения искомой функции в интервалах между узловыми точками сеточной области. Так, по мнению авторов работ [5, 6] простые идеи, которые лежат в основе примитивной замены производных конечными разностями, без анализа и учета специфических свойств решений конкретного класса задач, не могут быть успешными. При составлении вычислительного алгоритма необходимо использовать априорную информацию о задаче, и в первую очередь – о ее принадлежности к тому или другому классу гладкости функций, которые описывают соответствующие процессы. Отмеченный подход стал базовым для

распределенного моделирования векторов решений прикладных задач горно-металлургического комплекса.

Значительное ускорение вычислений конечно-разностных программ достигается за счет эффекта распараллеливания [7]. Отдельного внимания заслуживают численно-аналитические алгоритмы решения поставленных задач [8]. Высокое ускорение вычислений по сравнению с конечно-разностным подходом можно объяснить использованием аналитических решений, которые позволяют проводить вычисление одновременно и параллельно по всем временным слоям, не используя при этом комбинированную память. Следовательно, наиболее перспективным подходом к математическому моделированию задач, которые исследуются в данной работе, следует считать тот, который основывается на численно-аналитических решениях.

В этой связи эффективным средством исследования задач тепло- и массообмена в горно-металлургическом производстве можно считать применение технологий параллельных вычислений на распределенных системах кластерного типа [9 – 11], которые имеют сравнительно небольшую стоимость и достаточно легко масштабируются как по количеству процессоров, так и по объему оперативной памяти. В данной работе на примере решения задачи теплопроводности представлены алгоритмы решения таких задач, которые отличаются наибольшей степенью параллелизма.

Цель исследования

Классические методы решения тепловых задач горно-металлургического комплекса при использовании многопроцессорных вычислительных систем решаются не быстрее, а порой и гораздо медленнее, чем при применении однопроцессорной вычислительной техники. Это обстоятельство объясняется рекуррентным подходом, который положен в основу классических методов. В этой связи цель данной работы является конструирование максимально параллельных структур алгоритмов решения тепловых задач и их отображение на архитектуру многопроцессорных систем.

Изложение основного материала исследований

Для уравнения теплопроводности вида

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2}, \quad x \in [x_0, x_L], \quad t \in [t_0, T] \quad (1)$$

рассматривается решение краевой задачи Дирихле с начальным

$$Y|_{t=t_0} = \phi(x) \quad (2)$$

и граничными условиями

$$Y|_{x=x_0} = YW(t), \quad Y|_{x=x_L} = YL(t). \quad (3)$$

Области определения искомой функции $Y(t, x)$ в задаче (1)–(3) сопоставим сеточную область

$$\left. \begin{aligned} t_j &= J \times Dt1, \quad j = \overline{1, M}, \quad Dt1 = T / M, \quad M \in Z \\ x_p &= p \times Dx1, \quad p = \overline{0, 2m} \quad Dx1 = (x_L - x_0) / 2m, \quad m \in Z \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где m – целочисленный параметр в топологии построения сеточных узлов по пространственной переменной x .

Метод конечных разностей. Воспользовавшись неявной схемой по временной переменной и аппаратом центральных разностей по переменной x , приходят к следующей системе уравнений

$$C_p Y_{p+1,1} - Y_{p,1} + D_p Y_{p-1,1} = f_{p,1}, \quad p = \overline{1, 2m-1}, \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_p &= D_p = \frac{A}{(1+2A)}, \quad A = \frac{\alpha}{Dx1^2} Dt1 \\ f_{p,1} &= -\frac{YOp,1}{(1+2A)} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Здесь сеточные функции $Y_{0,1} = fW(t_j)$, $Y_{2m,1} = fL(t_j)$ определяют граничные условия (3), а правые части $f_{p,1}$ – начальные условия, так как сеточные функции $YOp,1$ берутся с предыдущего $j-1$ -го временного слоя. Следовательно, численный алгоритм (5),(6) является эволюционным и состоит из актов перехода от одного момента времени t_{j-1} к другому $t_j = t_{j-1} + Dt1$.

Схема метода прямых. Применяя по отношению уравнения (1) процедуру дискретизации по времени, приходят к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$Y''_{p+\varepsilon_{x,1}}(\varepsilon_x) - \frac{1}{A} Y_{p+\varepsilon_{x,1}}(\varepsilon_x) = -\frac{1}{A} YOp_{p+\varepsilon_{x,1}}(x), \quad (7)$$

где $YOp_{p+\varepsilon_{x,1}}(x)$ – функция, определяемая начальными условиями,

$\varepsilon_x = \frac{(x - x_p)}{(x_{p+1} - x_p)} \in [-1, +1]$ – нормированная пространственная переменная.

В своем конечном виде решением уравнения (7) является следующая зависимость:

$$Y_{p+\varepsilon_{x,1}}(\varepsilon_x) = Y_{p+\varepsilon_{x,1}}^*(\varepsilon_x) + C_p C\eta \beta(\varepsilon_x) + D_p S\eta \beta(\varepsilon_x), \quad (8)$$

где C_p, D_p – константы интегрирования; $Y_{p+\varepsilon_{x,1}}^*(x)$ – частное решение неоднородного уравнения (7); $\beta = \sqrt{\frac{1}{A}}$ – собственные числа характеристического уравнения.

Константы интегрирования C_p, D_p определяются исходя из условий вида $\varepsilon_x = \pm 1$:

$$Y_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x)|_{\varepsilon_x \pm 1} = Y_{p \pm 1,1}, \quad (9)$$

тогда получают решение уравнения (7) в виде следующей зависимости:

$$Y_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x) = \left\{ Y_{p+\varepsilon_x,1}^*(\varepsilon_x) + \frac{S\eta\beta(1+\varepsilon_x)}{S\eta\beta(\varepsilon_x)} [Y_{p+1,1} - Y_{p+1,1}^*] + \right. \\ \left. + \frac{S\eta\beta(1-\varepsilon_x)}{S\eta\beta(\varepsilon_x)} [Y_{p-1,1} - Y_{p-1,1}^*] \right\}. \quad (10)$$

Положив в выражении (10) $\varepsilon_x = 0$, перейдем от распределенной формы решения к его дискретному аналогу в виде системы линейных алгебраических уравнений (5), но с другим функциональным наполнением:

$$\left. \begin{aligned} C_p = D_p = \frac{S\eta\beta(\varepsilon_x)}{S\eta\beta(\varepsilon_x)} = \frac{1}{2C\eta\beta(\varepsilon_x)} \\ f_{p,1} = C_p Y_{p+1,1}^* - Y_{p,1}^* + D_p Y_{p-1,1}^* \end{aligned} \right\}, p = \overline{1, 2m-1}, \quad (11)$$

отличающегося от рассмотренного конечно-разностного подхода, имеющего форму (6).

Распараллеливание математической модели при помощи численно-аналитического метода прямых. Данный этап исследований направлен на реализацию процесса распараллеливания системы уравнений (5) при условии, что ее функциональное наполнение соответствует виду (11). Здесь гиперболическим функциям поставлены в соответствие линейные комбинации базисного решения краевой задачи (7), а правые части представляют собой совокупность его частных решений.

Разрабатываемый алгоритм конструируется на основе кусочно-аналитических решениях. Вполне очевидно, что это обстоятельство необходимо принять во внимание при реализации процесса распараллеливания системы уравнений (5). Такую идею можно развить на основании применения метод прогонок [8]. При этом процесс прямой прогонки направлен на определение коэффициентов $E_p, G_p, (p = \overline{1, 2m-1})$, которые определяются на основании соотношений вида:

$$E_p = \frac{C_p}{1 - D_p E_{p-1}}, \quad G_p = \frac{D_p G_{p-1} - f_{p,1}}{1 - D_p E_{p-1}}, \quad (12)$$

где начало решения такой задачи обеспечивается следующими параметрами

$$E_0 = 0, \quad G_0 = Y_{0,1} = fW(t_j). \quad (13)$$

Прямая прогонка протекает по направлению возрастания индекса p до значения $p = 2m - 1$. В тоже время, обратную прогонку реализуют по следующей рекуррентной формуле:

$$Y_{p,1} = E_p Y_{p+1,1} + G_p. \quad (14)$$

При этом обеспечивается направление изменения индекса p от $p = 2m - 1$ до $p = 1$. Начало вычислений осуществляется на основании выполнения условия $Y_{2m,1} = fL(t_j)$, которое задает в алгоритм прогонок правое граничное условия (3).

Оказывается, что использование функционального наполнения для коэффициентов C_p, D_p и правых частей $f_{p,1}$, в форме (11), позволяет выполнить расчеты по прямой прогонке и сформировать выражения для вычисления коэффициентов E_p, G_p по формулам (12) как функций номера сеточных узлов:

$$\left. \begin{aligned} E_p &= \frac{s\eta\beta(p)}{s\eta\beta(p+1)}, \\ G_p &= \frac{1}{s\eta\beta(p+1)} \left[Y_{0,1} - \sum_{i=1}^p f_{i,1} s\eta\beta(i) \right] \end{aligned} \right\}, \quad p = \overline{1, 2m-1}. \quad (15)$$

Именно это обстоятельство далее направлено на то, чтобы на основании подстановки выражений (15) в рекуррентное соотношение для обратной прогонки (14), можно было бы определить решение системы уравнений (5) для любого узла сеточной области (4):

$$Y_{2m-v,1}(v) = \frac{1}{s\eta\beta(2m)} \left\{ \begin{aligned} &s\eta\beta(2m-v) \left[Y_{2m,1} - \sum_{i=1}^v \frac{s\eta\beta(i)}{s\eta\beta(i+1)} f_{2m-i,1} \right] + \\ &+ s\eta\beta(v) \left[Y_{0,1} - \sum_{i=1}^{2m-1-v} \frac{s\eta\beta(i)}{s\eta\beta(i+1)} f_{i,1} \right] \end{aligned} \right\}, \quad v = \overline{1, 2m-1}, \quad (16)$$

где гиперболические функции представляют собой решение однородных систем уравнений (7), а комплексы $f_{p,1} = Y_{p+1,1}^* - 2c\eta\beta(p)Y_{p,1}^* + Y_{p-1,1}^*$ – совокупность его частных решений.

Разработанный подход к распараллеливанию математической модели отличается устойчивостью для различного типа входных данных. Кроме того, он имеет максимально параллельную форму и отличается минимальным временем решения задачи применительно к многопроцессорным вычислительным системам. Это объясняется следующим образом. Если гипотетически предложить, что на один узел расчетной сеточной области можно назначить один процессор назначить

один процессор, то вычисления могут проводиться параллельно и одновременно сразу для всех узлов расчетной сеточной области.

Экспериментальные данные и их обработка

Предложенный подход к решению задач теплопроводности реализован в виде процедуры математического моделирования при помощи многопроцессорной вычислительной системы. При этом рассмотрим один из вариантов его реализации.

Тестовая задача. Пусть на поверхности пластины заданы граничные условия 1-го рода. При этом для определенности граничную функцию $TW(t)$ будем рассматривать как известную, а $TL(t)$ будет искомой функцией в решении задачи теплопроводности. В квазилинейном приближении уравнению (1) в сеточной области сопоставляется система его дифференциальных следствий, которые приобретают вид СОДУ, то есть

$$T'_{p,n+1}(\varepsilon_t) = \{A_p(n+4)(n+2)T_{p,n+3}(\varepsilon_t) + B_p(n+1)T_{p,n+2}(\varepsilon_t)\}, \quad (17)$$

для $n = 0, 1, 2, \dots$, при этом

$$A_p = Dt1 \frac{\lambda_{p,1}}{CV_{p,1}Dx1^2}, \text{ если } p = \overline{1, 2m-1}; \quad (18)$$

$$B_p = Dt1 \frac{\lambda_{p,2}}{CV_{p,1}Dx1^2}.$$

Считая неявную по времени схему первого порядка приближенной и определив замыкающие связи, получают центральные разности следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} T_{p,2} &= \frac{1}{2}T(T_{p+1,1} - T_{p-1,1}) \\ T_{p,3} &= \frac{1}{2}(T_{p+1,1} + T_{p-1,1} - 2T_{p,1}) \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

далее получают систему уравнений трехдиагональной структуры, т.е.

$$C_p T_{p+1,1} - T_{p,1} + D_p T_{p-1,1} = f_{p,1}, \quad (20)$$

при этом

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{(A_p + B_p / 2)}{(1 + 2A_p)}, \quad D_p = \frac{(A_p + B_p / 2)}{(1 + 2A_p)}, \\ f_{p,1} &= -\frac{TO_{p,1}}{(1 + 2A_p)}, \text{ если } p = \overline{1, 2m-1}. \end{aligned} \quad (21)$$

Решение системы уравнений (20) реализуется методом прогонок. Для решения прямой задачи в системе уравнений (20), (21) следует допустить, что

$T_{0,1} = TW(t_j)$ и $T_{2m,1} = TL(t_j)$. Когда же $TW(t_j)$ – заданная, а $TL(t_j)$ – искомая граничная функция, то, решая задачу теплопроводности, необходимо функцию $TL(t_j)$ подобрать таким образом, чтобы в решениях систем уравнений (20), (21) функционал со среднеквадратичной невязкой был бы минимальным. Весь временной интервал, в котором искомая функция $T(t, x)$ определяется постановкой условий (2), (3), разбивают на временные интервалы Δt_1 по схеме дискретизации. Шаг же сканирование во время решения граничной задачи теплопроводности не обязательно должен совпадать с шагом дискретизации Δt_1 , принятым в управляемой системе уравнений (20), (21). Алгоритм решения граничной задачи теплопроводности начинается с первого шага сканирования. Пусть в качестве нулевого приближения принимается некоторое значение, когда $R = TL$, оно известно с априорной информации и явно больше искомой граничной функции. Это обстоятельство проверяется экспериментально методом математического моделирования. После подстановки значения R в решение управляемой математической модели (20), (21) получают расчетную величину температурной функции $T_p(t_j)$ в том же месте по координате, где задано функцию $T_e(t_j)$, которая известна из эксперимента. Это дает возможность найти числовое значение невязки $(T_p(t_j) - T_e(t_j))$. Если невязка $(T_p(t_j) - T_e(t_j)) > 0$, то значение R уменьшается на некоторую величину ΔT . В других случаях увеличивается на ту же величину (ΔT). Далее этот процесс развивается до тех пор, пока невязка не изменит свой знак на противоположный. Установление этого факта означает, что искомым приближенное решение задачи теплопроводности лежит в интервале $[a, b]$, где a и b означают числа, при которых значения функций в этих точках имеет разные знаки. Вычислив величину невязки в срединной точке, которая лежит между a и b , можно дальше уточнить значение искомой граничной функции при помощи интерполяционной формулы. Повторив эту итерационную процедуру необходимое количество раз, вычисляют значение параметра управления с любой наперед заданной точностью. Естественно, что при этом необходимо иметь в виду, что функция $T_e(t_j)$ известна по результатам эксперимента и имеет некоторую погрешность ε . Таким образом, искомое решение задачи теплопроводности происходит по шагами сканирования и, предположив линейную по временным слоями аппроксимацию, записывают, что

$$TL_{v+\varepsilon_t,1}(\varepsilon_t) = TL_{v,1} + \varepsilon_t TL_{v,2}, \quad (22)$$

при этом

$$\left. \begin{aligned} TL_{v,2} &= (TL_{v+1,1} - TL_{v,1}) \\ \varepsilon_t &= \frac{t - t_v}{t_{v+1} - t_v} \in [0,1] \end{aligned} \right\}, \text{ если } v = 1, 2, \dots, . \quad (23)$$

Тогда получают возможность решения задачи теплопроводности на полном временном интервале, когда $t \in [t_0, t_k]$ по v – ми временными слоями. Такая возможность возникает, во-первых, в силу того, что алгоритм прогонок реализует искомое нестационарное решение на любом временном слое. Переход же в системах уравнений (17) – (21) к временной переменной ε_t унифицирует алгоритм относительно любого временного интервала при помощи автоматического учета начальных значений. Процесс моделирования был реализован на персональном вычислительном кластере. Из анализа результатов моделирования следует, что разработанный метод решения задачи теплопроводности достаточно эффективно обеспечивает минимизацию невязок. Отметим также, что разработанный алгоритм в рассматриваемой постановке является абсолютно устойчивым.

Выводы

В данной работе представлены алгоритмы решения тепловых задач металлургии и горного дела с использованием максимально параллельных вычислительных форм. Распараллеливание систем трехдиагональной структуры реализовывалось численно-аналитическим подходом, что предопределило их максимально параллельную алгоритмическую форму. Такой подход способствует минимально возможное время реализации разработанного алгоритма на параллельных вычислительных системах. Кроме этого, во время параллельного вычисления арифметических выражений, в разработанном алгоритме погрешность выходных данных отделить от операций округления. Такая процедура стала возможной, потому что при таком подходе исключается рекуррентная структура вычисления векторов решений, которая обычно и предопределяет накопление ошибок округления. Таким образом, распараллеливания трехдиагональных систем на основе численно-аналитических методов дискретизации, во-первых, не накладывает каких-либо ограничений на топологию сеточных узлов расчетной области. И, во-вторых, – применительно к параллельному вычислению арифметических выражений в нем отделена погрешность исходных данных от операций округления, свойственная реальным ПЭВМ. При таком подходе исключается

рекуррентная структура вычисления искомых векторов решений, которая, как правило, и приводит к накоплению ошибок округления. Построенная таким образом параллельная форма алгоритма является максимальной, и, следовательно, имеет минимально возможное время реализации алгоритма на параллельных вычислительных системах.

Кроме того, была учтена необходимая гладкость исходного решения и входных данных для конкретной задачи, что позволило адаптировать вычислительный алгоритм к особенностям численного решения. Такая процедура выполнялась за счет дополнительных узлов, расположенных между узлами заданной сеточной области. Это позволяет точно отображать вычислительный алгоритм. При этом расчеты при построении графиков или изолиний могут выполняются параллельно и одновременно. Проведенные вычислительные эксперименты показали высокую эффективность предложенного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сотников А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб.: Береста, 2013. Т. 2. – 430 с.
2. Семенов Ю.В. Системы кондиционирования воздуха с поверхностными воздухоохладителями. – М.: Техносфера, 2014. – 272 с.
3. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Semenov S.G. Efficient parallelization algorithms of the applied tasks in multiprocessor computing systems. Системні технології. Дніпро. 2017. № 2 (109). Р. 57 – 66.
4. Ivaschenko V.P. Extreme algorithms of solving problems with higher order accuracy / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, E.G. Kholod // Applied and fundamental research [Text].- Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. (St. Louis, Missouri, USA), 2014. – P. 157 – 170.
5. Швачич Г.Г. Особенности конструирования параллельных вычислительных алгоритмов для ПЭВМ в задачах тепло- и массообмена / Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 3. – С. 42 – 47.
6. Shvachych G., Fedorov E., Kholod E. Numerical and analytical diagram of a distributed simulation of dynamic systems. Актуальні проблеми економіки. Київ. 2017. № 5 (192). Р. 186 – 196.
7. Третьяков Ф.И. Распараллеливание алгоритмов классификации и кластеризации данных / Ф.И. Третьяков, Л.В. Серебряная // Вестник БГУ. Сер.: Физика. Математика. Информатика. – Минск: БГУ, 2013. – № 2. – С. 105 – 109.
8. Велиев Э. И. Численно-аналитические методы решения интегральных уравнений в двумерных задачах теории дифракции / Э. И. Велиев // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. works. Ser. : Mathematical modeling in engineering and technologies. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – № 6 (1228). – С. 21-28.
9. Shvachych G., Mamuzic I., Ivaschenko O., Moroz B., Hulina I. Maximum parallel forms of difference scheme algorithms in applied problems of metallurgical thermal physics. Materials and Metallurgy : 14 International Symposium of Croatian Metallurgical Society SHMD. CROATIA. 2020. P. 442.

10. Shvachych G., Moroz B., Pobochii I., Ivaschenko O., Busygin V. Maximally parallel forms of distributed simulation of dynamic systems. World Science. Poland. 2018. № 4(32). Vol.1. P.12 – 19.
11. Shvachych G., Kholod E., Ivaschenko O., Busygin V. Visualization of the applied problems in multiprocessor computing systems. Society for Cultural and Scientific Progress in Central and Easter Europe. Held in Budapest, Hungary, 2018. P. 65 – 69.
12. Башков Є.О. Високопродуктивна багатопроецорна система на базі персонального обчислювального кластера / Є.О. Башков, В.П. Івашенко, Г.Г. Швачич // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Проблеми моделювання та автоматизації проектування”. – Вип. 9 (179). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С.312 – 324.

REFERENCES

1. Sotnikov A.G. Proektirovanie i raschet sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozduha. – SPb.: Beresta, 2013. T. 2. – 430 s.
2. Semenov Yu.V. Sistemyi konditsionirovaniya vozduha s poverhnostnyimi vozduhoohladitelyami. – M.: Tehnosfera, 2014. – 272 s.
3. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Semenov S.G. Efficient parallelization algorithms of the applied tasks in multiprocessor computing systems. Системні технології. Дніпро. 2017. № 2 (109). P. 57 – 66.
4. Ivaschenko V.P. Extreme algorithms of solving problems with higher order accuracy / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, E.G. Kholod // Applied and fundamental research [Text].- Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. (St. Louis, Missouri, USA), 2014. – P. 157 – 170.
5. Shvachich G.G. Osobennosti konstruirovaniya parallelnykh vyichislitelnykh algoritmov dlya PEVM v zadachah teplo- i massoobmena / G.G. Shvachich, A.A. Shmukin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2014. – # 3. – S. 42 – 47.
6. Shvachych G., Fedorov E., Kholod E. Numerical and analytical diagram of a distributed simulation of dynamic systems. Aktualni problemi ekonomiki. Kyiv. 2017. № 5 (192). P. 186 – 196.
7. Tretyakov F.I. Rasparallelivanie algoritmov klassifikatsii i klasterizatsii dannykh / F.I. Tretyakov, L.V. Serebryanaya // Vestnik BGU. Ser.: Fizika. Matematika. Informatika. – Minsk: BGU, 2013. – # 2. – S. 105 – 109.
8. Veliev E. I. Chislenno-analiticheskie metodyi resheniya integralnykh uravneniy v dvuhmernykh zadachah teorii difraktsii / E. I. Veliev // Visnik Nats. tehn. un-tu "HPI" : zb. nauk. pr. Ser. : Matematichne modelyuvannya v tekhniky ta tekhnologiyah = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. works. Ser. : Mathematical modeling in engineering and technologies. – Harkiv : NTU "HPI", 2017. – # 6 (1228). – S. 21-28.
9. Shvachych G., Mamuzic I., Ivaschenko O., Moroz B., Hulina I. Maximum parallel forms of difference scheme algorithms in applied problems of metallurgical thermal physics. Materials and Metallurgy : 14 International Symposium of Croatian Metallurgical Society SHMD. CROATIA. 2020. P. 442.
10. Shvachych G., Moroz B., Pobochii I., Ivaschenko O., Busygin V. Maximally parallel forms of distributed simulation of dynamic systems. World Science. Poland. 2018. № 4(32). Vol.1. P.12 – 19.
11. Shvachych G., Kholod E., Ivaschenko O., Busygin V. Visualization of the applied problems in multiprocessor computing systems. Society for Cultural and Scientific Progress in Central and Easter Europe. Held in Budapest, Hungary, 2018. P. 65 – 69.
12. Башков Є.О. Високопродуктивна багатопроецорна система на базі персонального обчислювального кластера / Є.О. Башков, В.П. Івашенко, Г.Г. Швачич // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Проблеми моделювання та автоматизації проектування”. – Вип. 9 (179). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С.312 – 324.

Received 01.02.2021.

Accepted 11.02.2021.

MODELING OF MAXIMALLY PARALLEL STRUCTURES OF ALGORITHMS FOR SOLVING THERMAL PROBLEMS

The paper demonstrates the possibility of creating a maximum parallel form of computational algorithms to solve thermal problems and their mapping to the architecture of multiprocessor systems based on solving thermal problems of mathematical physics. It is shown that an effective tool for studying heat and mass transfer problems in metallurgical production could be parallel computing technologies on distributed cluster systems with a relatively low cost and reasonably easily scalable both in the number of processors and in the amount of RAM. Tridiagonal structure systems' parallelization was implemented by a numerical-analytical approach, which predetermined their maximally parallel algorithmic form. That approach is facilitated by the minimum possible implementation time of the developed algorithm on parallel computing systems. Furthermore, during the arithmetic expressions parallel computations, the developed algorithm separates the error in the output data from rounding operations. Thus, the parallelization of tridiagonal systems based on numerical-analytical discretization methods does not impose any restrictions on the topology of the mesh nodes of the computational domain.

Furthermore, as applied to the parallel computation of arithmetic expressions, it separates the initial data error from a real PC's rounding operations. That approach eliminates the recurrent structure of computing the sought-for decision vectors, which, as a rule, leads to the round-off errors accumulation. Such a parallel form of the constructed algorithm is maximal and has the shortest possible implementation time of the algorithm on parallel computing systems. The developed approach to parallelizing the mathematical model is stable for various types of input data. It has the most parallel form and is distinguished by the minimum time for solving the problem as applied to multiprocessor computing systems. That is explained as follows. If it is hypothesized that one processor can be assigned to one processor and one processor can be assigned to one node of the computational mesh domain, the computations can be processed in parallel and simultaneously for all nodes of the computational mesh domain. The simulation process was implemented on a PC cluster. It follows from the simulation results analysis that the developed method for solving the heat conduction problem effectively minimizes residuals.

Keywords: thermal problems, parallel computing, multiprocessor system, parallel algorithm, method of straight lines.

Мороз Дмитро Максимович – магістр, Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро.

Мороз Дмитрий Максимович – магистр, Днепровский национальный университет им. Олеся Гончара, г. Днепр.

Moroz Dmytro – master, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШИПНИКІВ РІДИННОГО ТЕРТЯ РОБОЧИХ КЛІТЕЙ 630 СТАНУ 550

Аналіз експлуатації підшипників рідинного тертя (ПРТ) станів 630 показав, що втрати мастила на клітях 630 досягають до 10 тонн за рік. Причиною цього є недосконалість конструкції ущільнення, а це в свою чергу не забезпечує необхідний режим змащування ПРТ і призводить до високоінтенсивного зносу поверхонь втулки та вкладиша підшипника. Що призводить до виходу з ладу ПРТ раніше встановленого строку заміни втулки та вкладиша.

Метою дослідження є визначення навантаженості ПРТ шляхом математичного моделювання для визначення енерго-силових параметрів прокатки на прикладі швелеру № 14, визначення коефіцієнту тертя, дослідження процесу зносу поверхні втулки та вкладиша ПРТ та надання рекомендації, щодо можливого шляху удосконалення ущільнення ПРТ клітей 630. Розрахунок підтвердив перехід до граничного тертя при зносі до радіального зазору в 4 мм, що спостерігалось при експлуатації ПРТ. Запропонована удосконалена конструкція ущільнень з використанням V-подібних манжет.

Ключові слова: робоча кліть, підшипник рідинного тертя, моделювання, метод скінчених елементів, зусилля прокатки, коефіцієнт тертя, знос, ущільнення

Постановка проблеми

Як відомо до складу сортового стану 550, який призначений для виробництва періодичних профілей методом поздовжньої прокатки, входять сім робочих клітей 630. Валки в цих клітях встановлено на підшипниках рідинного тертя (ПРТ). В процесі експлуатації ПРТ було виявлено загальні втрати мастила на сімох клітях 630 до 10 тонн за рік. Причиною цього є недосконалість конструкції ущільнення, а це в свою чергу не забезпечує режим змащування ПРТ і підшипник виходить з ладу раніше встановленого строку експлуатації. Тому необхідність дослідження робочих параметрів ПРТ є актуальною задачею.

Мета дослідження

Метою дослідження є визначення навантаженості ПРТ, визначення коефіцієнту тертя, дослідження процесу зносу поверхні втулки та вкладиша ПРТ та надання рекомендації, щодо можливого шляху удосконалення ущільнення ПРТ.

Навантаженість ПРТ

Для визначення навантаженості ПРТ необхідно знайти енерго-силові параметри прокатки в клітках 630. Для цього обираємо швелерний профіль №14. Для визначення енерго-силових параметрів процесу прокатки швелерного профілю було проведено математичне моделювання з використанням програмного продукту QForm 9 (виконано на кафедрі ОМТ НМетАУ в рамках угоди про використання програми QForm No. MSL2015_10_5 від 28.10.2015 р.). Програма QForm призначена для математичного моделювання, на основі методу скінчених елементів, технологічних процесів обробки металів тиском з урахуванням термомеханічних процесів нагріву та охолодження металу, в тому числі у процесі деформації, а також взаємодії заготовки, що деформується, з технологічним інструментом та обладнанням [1]. Математичною основою програми є система рівнянь, яка включає рівняння рівноваги, рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок та швидкостей деформації, рівняння зв'язку між напруженим та деформованим станом, умови нестиснення, критерій пластичності, рівняння енергетичного балансу [2, 3].

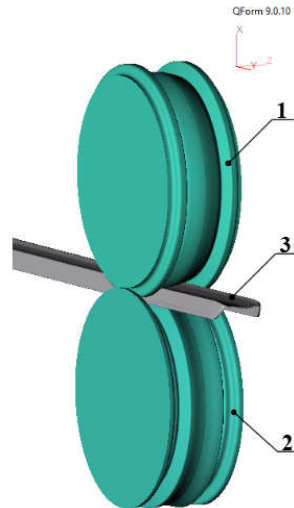
Моделювання було проведено для умов прокатки швелеру № 14 в клітках № 2 - 8 стана 550 ПрАТ «Дніпровський металургійний завод». Було прийнято наступні вихідні дані:

- габаритні розміри заготовки після розрізного калібру ($h \times b$) – 105×120 мм;
- температура нагріву заготовки в печі – 1200 °C;
- матеріал заготовки – сталь 09Г2С;
- швидкість обертання валків – $60 \dots 120$ об/хв;
- середній діаметр валків – 700 мм.

Умови тертя в контакті інструменту та заготовки було задано моделлю Леванова з фактором тертя 0,8.

Загальний вигляд моделі для 7 проходу (кліть № 7) наведено на рисунку 1. Розподіл сили прокатки по клітках наведено на рисунку 2.

Як бачимо, найбільші зусилля прокатки і відповідно навантаження на ПРТ будуть діяти в кліті №4 та досягати при захваті розкату 2,8 МН. Найменші зусилля прокатки і відповідно навантаження на ПРТ будуть діяти в кліті №8 та досягати при захваті розкату 1,1 МН.



1 – верхній валок, 2 – нижній валок, 3 – розкат

Рисунок 1 – Загальний вигляд моделі прокатки швелерного профілю в 7 проході

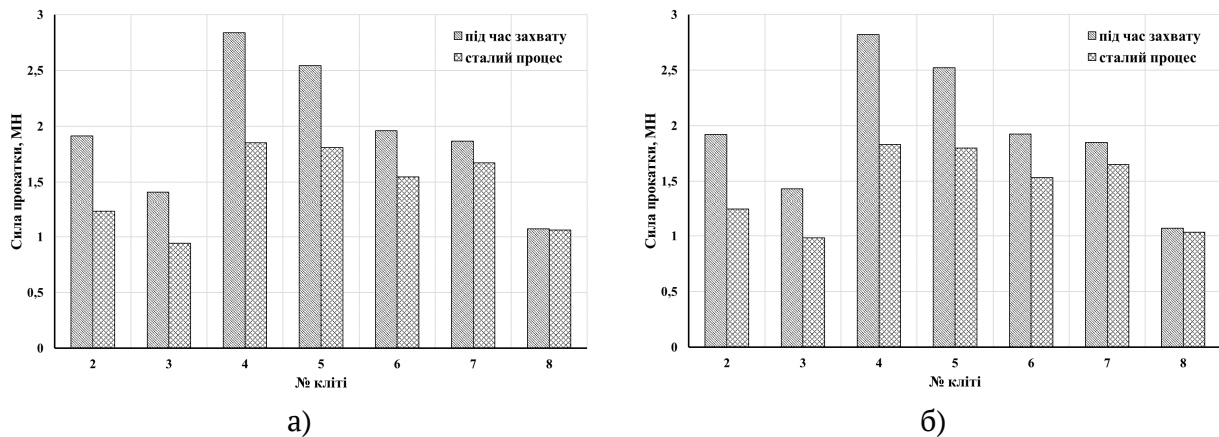


Рисунок 2 – Розподіл сили прокатки по клітях для умов захвату та сталого процесу:

а – верхній валок, б – нижній валок

Визначення коефіцієнту тертя

Коефіцієнт тертя для підшипника рідинного тертя визначається, як [4]

$$\mu = \pi \cdot \eta \cdot \frac{u}{\delta \cdot p} + \frac{\delta}{d_u}, \quad (1)$$

де η – динамічна в'язкість масла (для мінерального масла УТ при температурі підшипника 50°C), Па·с; u – швидкість ковзання цапфи підшипника, м/с; δ – радіальний зазор, м; p – середній тиск в підшипнику, Па; d_u – діаметр цапфи підшипника, м.

Середній тиск в підшипнику [4]

$$p = \frac{Y}{l \cdot d_u}, \quad \text{МПа}. \quad (2)$$

тут Y – навантаження, що діє на ПРТ (спрощено приймаємо, як половину зусилля прокатки), Н; l – довжина втулки підшипника, м.

Кінематична в'язкість мінерального масла УТ при температурі підшипника 50°C – $\nu = 29,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Динамічна в'язкість мінерального масла УТ при температурі підшипника 50°C

$$\eta = \nu \cdot \rho = 29,75 \cdot 10^{-6} \cdot 898,2 = 0,0267 \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (3)$$

де ρ – щільність масла, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Швидкість ковзання цапфи підшипника

$$u = \omega \cdot r_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \nu}{D} \cdot r_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot 7}{0,63} \cdot 0,5 \cdot 0,45 = 5 \text{ м} / \text{с}. \quad (4)$$

де ω – кутов ашвидкість валків, с^{-1} ; ν – швидкість прокатки, $\text{м}/\text{с}$; D – діаметр валка, м .

В таблиці 1 наведено результати розрахунку середнього тиску та коефіцієнту тертя в ПРТ клітей 630 при захваті розкату. Отриманий результат свідчить, що збільшення навантаження, що діє на підшипник не суттєво впливає на зміну коефіцієнта тертя в ньому, який знаходиться в межах 0,0027 – 0,00274.

Найбільше на величину коефіцієнта тертя μ будуть впливати в'язкість масла η та величина радіального зазору δ .

Таблиця 1

Середній тиск та коефіцієнт тертя в клітях 630

№ кліті	Зусилля прокатки, МН	Середній тиск p , МПа	Коефіцієнт тертя μ
2	1,914	5,8	0,00273
3	1,41	6,3	0,00272
4	2,836	4,6	0,00274
5	2,544	9,3	0,00270
6	1,962	8,3	0,00271
7	1,868	6,4	0,00272
8	1,072	6,1	0,00272

Розглянемо, як впливає збільшення зазору з номінального до допустимого на коефіцієнт тертя ПРТ для кліт №4, результати занесено до таблиці 2.

При збільшенні зазору з 1,2 мм до 1,8 мм, коли за правилами експлуатації ПРТ [5] необхідно замінювати пару втулку-вкладиш коефіцієнт тертя збільшується на 48% з 0,0027 до 0,004. А при катастрофічному зносі до зазору в 3 та 4 мм коефіцієнт тертя збільшується до 0,007 та 0,009, тобто приймає значення, при яких настає граничне тертя.

Таблиця 2

Результати розрахунку зміни коефіцієнта тертя при збільшенні зазору

№	Зазор δ , мм	Коефіцієнт тертя μ
1	1,2	0,0027
2	1,3	0,0029
3	1,4	0,0031
4	1,5	0,0034
5	1,6	0,0036
6	1,7	0,0038
7	1,8	0,004
8	3	0,007
9	4	0,009

Визначення зносу втулки підшипника

Однією з характеристик роботи втулки та вкладиша підшипника рідинного тертя є знос їх поверхонь (рис. 3) та інтенсивність зносу.

Граничний знос деталі або граничний зазор в з'єднанні часто визначають по кривій залежності зносу деталі або зміни зазору в з'єднанні внаслідок зносу від напрацювання.



Рисунок 3 – Фотографії зносу поверхонь втулки та вкладиша ПРТ кліті 630

Величина зносу поверхні підшипника [6]

$$\Delta_i = \Delta_0 + I \cdot S_i, \quad (5)$$

Де Δ_0 – початковий розмір деталі, в нашому випадку початковий зазор $\delta=1,2$ мм=1200 мкм; I – інтенсивність зносу; S_i – шлях тертя, мкм.

Шлях тертя вкладиша підшипника рідинного тертя за 1 оберт

$$S_1 = \pi \cdot D = \pi \cdot 0.45 = 1,4137 \text{ м} = 1413717 \text{ мкм.} \quad (6)$$

Час роботи стана приймаємо – $t=8000$ годин.

Число обертів валка $n=212$ об/хв = 12720 об/годину.

Максимальне число обертів $n=1000$ об/хв = 60000 об/годину.

Тоді загальний шлях тертя за рік

$$S_i = S_1 \cdot t \cdot n = 1413717 \cdot 8000 \cdot 60000 = 6.8 \cdot 10^{14} \text{ мкм.} \quad (7)$$

Величина зазору при зносі поверхні вкладиша за 1 рік

$$\delta_i = 1200 + 10^{-13} \cdot 6,8 \cdot 10^{14} = 1268 \text{ мкм} = 1,268 \text{ мм.}$$

Довговічність [6]

$$T = \frac{[\delta] - \delta_0}{I \cdot v_s}, \quad (8)$$

Де $[\delta]$ – допустимий зазор, мкм; v_s – швидкість пересування втулки и вкладиша відносно один одного, мкм/год.

$$v_s = \frac{S_i}{t} = \frac{6.8 \cdot 10^{14}}{8000} = 8.5 \cdot 10^{10} \text{ мкм / годину.} \quad (9)$$

$$T = \frac{1800 - 1200}{10^{-13} \cdot 8,5 \cdot 10^{10}} = 70588 \text{ годин.}$$

При роботі в 8000 годин за рік, $T=8,8$ року.

Таким чином величину зазору $\delta=1,8$ мм, при досягненні якого замінюють вкладиш та втулку підшипника буде отримано через 8,8 років експлуатації. Але експлуатаційні дані свідчать про те, що такого зазору досягають за 3 роки роботи. Зниження строку експлуатації підшипника пояснюється невідповідним режимом тертя, а саме не дотриманням параметрів в'язкості масла та його недостатньою кількістю в підшипнику. Причиною цього є витікання масла через ненадійне ущільнення та потрапляння в нього абразиву та охолоджувальної рідини валків.

Удосконалення ущільнень ПРТ

Шляхом уникнення вказаних недоліків є удосконалення ущільнень ПРТ кліті 630 (рис. 4). Ущільнювальну функцію тут здійснюють V-подібні манжети [7], встановлені на насадці, закріпленої на втулці-цапфі валка і контактуючі із плоскими контактними поверхнями задньої кришки. Захист від потоку охолоджувальної рідини, забезпечується манжетою типу РНСТ. Додатковий захист від проникнення в підшипник рідини дають жолобки на зовнішній поверхні обертової частини лабіринтового ущільнення. Вода накопичується в жолобку-уловлювачі, який перебуває напроти в нерухливій

частині лабіринтового ущільнення й стікає вниз через дренажний отвір. Також встановлюємо армовану манжету на ліву опору після жолобків.

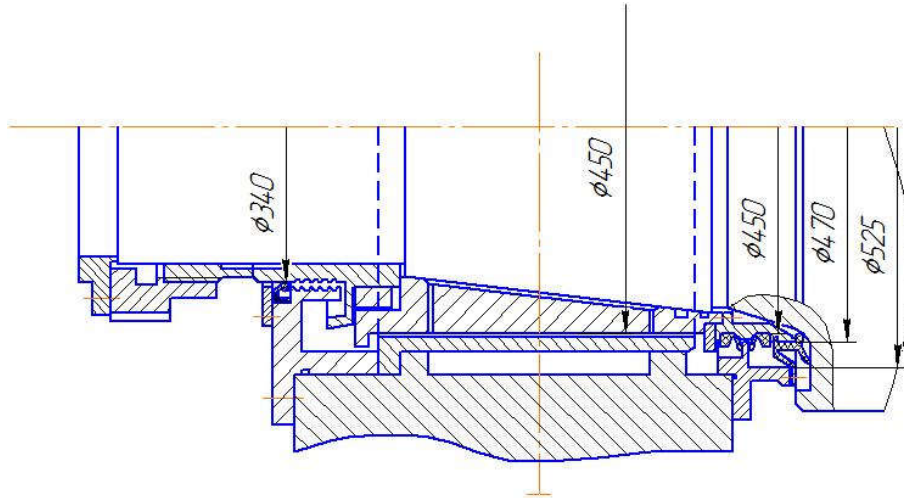


Рисунок 4 - Креслення нового ущільнення ПРТ кліті 630

Висновок

Аналіз експлуатації ПРТ станів 630 показав, що втрати мастила на клітях 630 досягають до 10 тонн за рік. Причиною цього є недосконалість конструкції ущільнення, а це в свою чергу не забезпечує необхідний режим змащування ПРТ і призводить до високоінтенсивного зносу поверхонь втулки та вкладиша підшипника. Що призводить до виходу з ладу ПРТ раніше встановленого строку заміни втулки та вкладиша. Проведено математичне моделювання для визначення енерго-силових параметрів прокатки на прикладі швелеру №14 для визначення навантаженості ПРТ. Досліджено коефіцієнт тертя в ПРТ клітей 630. Отриманий результат свідчить, що збільшення навантаження, що діє на підшипник не суттєво впливає на зміну коефіцієнта тертя в ньому, який знаходиться в межах 0,0027 – 0,00274. Найбільше на величину коефіцієнта тертя μ будуть впливати в'язкість масла η та величина радіального зазору δ . Розрахунок підтвердив перехід до граничного тертя при зносі до радіального зазору в 4 мм, що спостерігалось при експлуатації ПРТ. Запропонована конструкція ущільнень з використанням V-подібних манжет.

ЛІТЕРАТУРА

1. QForm – Software for simulation and optimization of metal forming processes and metal profile extrusion, QFX Simulations Ltd., <http://www.qform3d.com/>
2. Gerasimov D., Biba N., Stebunov S., Kadach M. Implementation of a dual mesh method for longitudinal rolling in QForm V8. International Conference on Production and Further Processing of Flat Products, MEFORM 2016. 2016. V. 854. P. 158-162. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.158

3. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учеб. пособие. М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2019.- 383 с. ISBN 978-5-7038-5101-2.
4. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. - М.: Металлургия, 1985. - 376 с.
5. ДСТУ 22915-88. Подшипники жидкостного трения. Правила эксплуатации. - М.:Издательство стандартов, 1988, 32 с.
6. И. В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. Основы расчетов на трение на износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 350 с.
7. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. /под. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. - М.: Машиностроение, 1986. - 464 с.

REFERENCES

8. QForm – Software for simulation and optimization of metal forming processes and metal profile extrusion, QFX Simulations Ltd., <http://www.qform3d.com/>
9. Gerasimov D., Biba N., Stebunov S., Kadach M. Implementation of a dual mesh method for longitudinal rolling in QForm V8. International Conference on Production and Further Processing of Flat Products, MEFORM 2016. 2016. V. 854. P. 158-162. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.158
10. Vlasov A.V., Stebunov S.A., Evsyukov S.A., Biba N.V., Shitikov A.A. Finite-element modeling of technological processes of forging and volumetric stamping: textbook. allowance. M.: Publishing house of MSTU im. N.E.Bauman, 2019. - 383 p. ISBN 978-5-7038-5101-2.
11. Korolev AA Design and calculation of machines and mechanisms of rolling mills. - M.: Metallurgy, 1985. - 376 p.
12. DSTU 22915-88. Liquid friction bearings. Operating rules. - M.: Publishing house of standards, 1988, 32 p.
13. I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, V.S. Kombalov. Fundamentals of Friction Wear Calculations. - M.: Mashinostroenie, 1977. - 350 p.
14. Seals and sealing technology. Directory. /under. ed. A.I. Golubeva, L.A. Kondakova. - M.: Mashinostroenie, 1986. - 464 p.

Received 20.01.2021.

Accepted 29.01.2021.

UDC 669.02

A. Samsonenko, V. Hanush, S. Berheman

RESEARCH OF FLUID FRICTION BEARINGS OF WORKING STANDS 630 OF ROLLING MILL 550

Analysis of the operation of fluid friction bearings (FFB) of mills 630 showed that the loss of oil on the cages 630 reaches up to 10 tons per year. The reason for this is the imperfection of the seal design, which in turn does not provide the required mode of lubrication of the FFB and leads to high-intensity wear of the surfaces of the sleeve and bearing liner. Which leads to the failure of the FFB before the deadline for replacement of the sleeve and liner. The aim of the study is to determine the load of FFB by mathematical modeling to determine the energy and power parameters of rolling on the example of channel №14, determine the coefficient of friction, study the wear of the surface of the sleeve and liner FFB and provide recommendations for possible ways to improve FFB seals 630. To determine the energy and power parameters of the rolling profile of the channel profile, mathematical modeling was performed using the software product QForm 9. The QForm program is designed for mathematical modeling, based on the finite element

method, technological processes of metal forming by taking into account thermomechanical processes of heating and cooling of metal, including in the process of deformation, as well as the interaction of the deformable workpiece with technological tools and equipment. The greatest rolling forces and, accordingly, the load on the FFB will act in the cage №4 and reach 2.8 MN when the roll is captured. The obtained result indicates that the increase in the load acting on the bearing does not significantly affect the change in the coefficient of friction in it, which is in the range of 0.0027 - 0.00274. The value of the friction coefficient μ will be most affected by the viscosity of the oil η and the value of the radial gap δ . The calculation confirmed the transition to the maximum friction during wear to a radial gap of 4 mm, which was observed during the operation of the FFB. The value of the gap $\delta = 1.8$ mm, at which the replacement of the liner and the bearing sleeve will be obtained after 8.8 years of operation. But operational data show that such a gap is reached in 3 years of operation. The reduction in bearing life is due to inadequate friction, namely non-compliance with the viscosity parameters of the oil and its insufficient amount in the bearing. The reason for this is the leakage of oil due to unreliable sealing and ingress of abrasive and coolant rolls. An improved design of seals using V-shaped cuffs is proposed.

Keywords: working stand, fluid friction bearing, modeling, finite element method, rolling force, coefficient of friction, wear, sealing.

Самсоненко Андрій Анатолійович – доцент кафедри Обробки металів тиском, Національна металургійна академія України.

Гануш Василь Іванович – старший викладач кафедри Машин та агрегатів металургійного виробництва, Національна металургійна академія України.

Бергеман Сергій Володимирович – керівник ділянки з підготовки та ремонту прокатних валків прокатного цеху №2, ПрАТ «Дніпровський металургійний завод».

Samsonenko Andrii – candidate of technical science, assistant professor, Department of metal forming, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Hanush Vasyl – senior teacher, Department of metallurgical production machines and units, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Berheman Sergiy – head of the section for the preparation and repair of rolls of rolling shop No. 2, JSC "Dneprovsky Metallurgical Plant".

ON SOME ASPECTS OF THE STUDY OF PULVERIZED COAL AND FUEL MIXTURES COMBUSTION IN A DROP TUBE FURNACE

The article considers some aspects of the pulverized fuel combustion modelling in the laboratory on installations called vertical tube furnaces (referred to as drop tube furnaces in scientific periodicals). We have considered the scheme of the installation to study the process of pulverized coal (PC) combustion in conditions similar to the conditions of heating and ignition of coal particles in the blast flow of the blast furnace and their subsequent gasification in the raceway. We have formulated the basic requirements for ensuring the reliability of modelling results. We have examined the methods of combustion completeness (burnout) estimation used in similar studies. We have proposed a convenient method for the estimation of the burnout of two-component fuel mixtures. According to this method, the estimation can be performed for any ratio of components in a two-component fuel mixture with the use of data on the initial ash content in each of them and the relevant burnout. We have obtained the estimated data on the dependence of the burnout of PC (anthracite, lean coal) with fuel additives. It has been shown that the proposed approach can be used to evaluate experimental data regarding the study of the combustion completeness of fuel mixtures. It has been established that for the initial stages of PC combustion (heating, emission and ignition of volatile matters), which occur before the fuel particles enter the blast furnace raceway, the fuel mixtures burnout values recorded in the experiments do not differ significantly from the estimated ones. For the final stages of PC combustion (heating and burnout of char), which occur mainly in the raceway and outside, the combustion completeness determined in laboratory studies was significantly higher than the estimated one. The obtained results confirmed the efficiency in the use of drop tube furnace to model the PC combustion process during the fuel injection with the heated blast flow in the blast furnace raceways and study of the influence of various factors on the combustion process. The results of such studies can be used to improve the design of PC injection units in the blast furnace and to study the possibilities for improving the coal particles combustion completeness and the specific consumption of PC.

Keywords: blast furnace, tuyere, raceway, pulverized coal (PC), drop tube furnace, fuel mixtures, additives, volatile matter, combustion completeness, burnout.

1. Problem statement

In the technology of pig iron smelting with the use of pulverized coal (PC), which is widely used in modern metallurgy, the use of fuel mixtures is promising, which is confirmed in practice, due to the growing shortage of quality coal. But the effective use of mixtures containing low-quality fuel or its substitutes such as waste from agricultural and other industries requires further research. One of the ways of such research consists in modelling of the PC combustion using the drop tube furnaces. This method is widely used by researchers and allows us to obtain results of practical value for the development of the processes of pyrolysis and gasification of various fuels, including those in power plants. But the methodology of laboratory studies with the simulation of combustion conditions which are similar to the conditions of PC combustion when injected into a blast furnace requires further development and refinement based on the gathered experience. The methodology for determining combustion completeness of mixtures in such studies also needs to be clarified.

2. Analysis of recent studies and publications

Coal usually has been and remains a raw material used for the production of PC for injection into blast furnaces. As a rule, it is unsuitable for coking, but it has high carbon content (anthracite, lean, etc.) and the lowest possible amount of ash and harmful impurities. At the end of the last century, the European plants of Tissen AG (now called ThyssenKrupp AG) and some others successfully tested and implemented the coal mixtures injection, with adding to the PC's main component a certain amount of coal with a high yield of volatile matters [1].

The A. Carpenter's monograph gives examples of injection of mixtures of PC with coal with a high yield of volatile matters, as well as with plastic waste, into a blast furnace. Concerning plastic waste, it is suggested that the interaction between coal and plastic waste can be used to increase PC combustion efficiency. Also, it can help to maximize furnace productivity while reducing costs and minimizing environmental impact. Among the problems with plastics, the author indicates the difficulty of their preparation to ensure a stable fractional and chemical

composition. Regarding coal mixtures, there are examples in which the flammability of PC from low-reaction coal is enhanced by mixing with coal with a high yield of volatile matters. However, the author raises the question of the need to further refine the relevant laboratory techniques and to verify the conformity of experimental data on the combustion of the mixtures with the conditions in the blast furnace. It is also emphasized the need to develop standard tests for evaluation of coal and plastic waste, standard tests for determining the reactivity of coal or plastic waste, and so forth. The main requirement is the compatibility of the test conditions with the conditions of the blast furnace [2].

Since the early 2000s, there have been more and more publications of studies on the combustion of new fuels, such as biomass of various origins and their derivatives, household waste such as rubber or plastics. For example, promising innovations in Japan involve combined injection scenarios in which crushed ore or renewable materials, such as biomass or plastic waste, are injected into blast furnaces through blow tuyeres. It is expected that such technologies can help to solve today's problems related to carbon emissions, energy production and resource availability [3]. However, the use of biomass in the metallurgical industry is still limited, and it is in strong competition with fossil fuels. As noted in publications [4, 5], the problems of biomass use in the metallurgical industry include technical and economic aspects that require synergies between the steel and bioenergy sectors.

Based on the above, it was advisable to compare the method developed and improved with the involvement of the author [6, 7], with those used in similar studies. The results of the analysis are shown in Table 1.

These examples became the motive for the refinement of the laboratory experiments method for modelling the combustion of PC and fuel mixtures using a drop tube furnace, as well as the methods for the evaluation of combustion process completeness and the influence of various factors on it.

Table 1

Comparison of methods for calculating pulverized fuel
combustion completeness used in some laboratory studies

Name*	Unit	Formula for calculation	Comments	Source
Combustion completeness	%	$\left[1 - \frac{A_{\text{PC}}(100 - A_{\text{res}})}{A_{\text{res}}(100 - A_{\text{PC}})} \right] \times 100$	A_{PC} – ash content in the original PC; A_{res} – ash content in the residue after combustion	[7]
Burnout	%	$\left[1 - \left(\frac{Ash_{\text{coal}}}{100 - Ash_{\text{coal}}} \right) \left(\frac{100 - Ash_{\text{char}}}{Ash_{\text{char}}} \right) \right] \times 100$	Ash_{coal} – ash content in the original coal; Ash_{rc} – ash content in the residue after combustion	[8]
Burnout	%	$\frac{Ash_{\text{uc}} - Ash_{\text{rc}}}{Ash_{\text{uc}} \left(1 - \frac{Ash_{\text{rc}}}{100} \right)} \times 100$	Ash_{uc} – ash content in the residue after combustion; Ash_{rc} – ash content in the original coal	[9]
Fixed carbon burnout	Unit fr.	$1 - \left(\frac{\%C_{\text{final}} \times \%Ash_{\text{initial}}}{\%C_{\text{initial}} \times \%Ash_{\text{final}}} \right)$	$\%C_{\text{initial}}$ and $\%Ash_{\text{initial}}$ – content of carbon and ash in the original fuel, respectively; $\%C_{\text{final}}$ and $\%Ash_{\text{final}}$ – the same in the residue after combustion	[10]

* – reproduced according to the source materials

Name*	Unit	Formula for calculation	Comments	Source
Combustion ratio	%	$100 - \left(\frac{X_a \times A_b}{X_b \times A_a} \right) \times 100$	X_a and X_b – carbon content in the semi-coke particles and the raw coal, respectively; A_a and A_b – ash content in the semi-coke particles and the raw coal, respectively	[11]
Burnout	%	$\frac{10^4 (A_1 - A_0)}{A_1 (100 - A_0)}$	A_0 – ash content in the original coal; A_1 – ash content in the residue after combustion	[12]
Char burnout	Mass fr.	$\frac{f_a - f_{a,0}}{f_a (1 - f_{a,0})}$	f_a and $f_{a,0}$ – mass fractions of ash in the residue after combustion and the original fuel, respectively	[13]

* – reproduced according to the source materials

3. The purpose of the study

The purpose of the study is to clarify the method of studying the combustion of PC, which is a mixture of coal with different degrees of metamorphism or contains several other types of pulverized flammable fuels. More accurate information on the processes that occur during the combustion and gasification of fuel particles in the hot blast and the blast furnace raceway is extremely important for the improvement of the PC injection technology, which is widely used in many enterprises.

4. The substantive material of the study

4.1. Method

The study of the pulverized fuel flow combustion was carried out in the drop tube furnace, the concept of which was developed under the guidance of P. Bondarenko and V. Kotov [6]. Later, this installation was improved in order to eliminate some shortcomings and expand the possibilities for modelling the final stages of PC combustion [7]. You can see a simplified principle diagram in Figure 1.

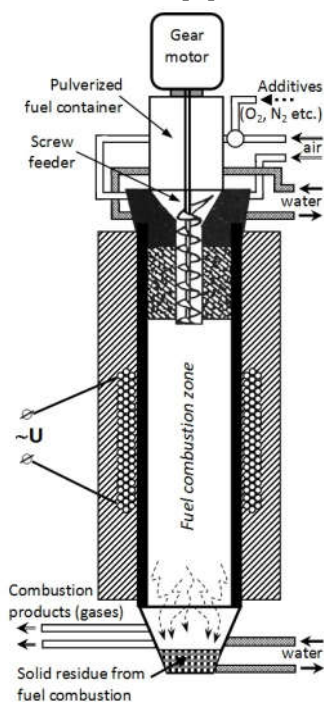


Figure 1 - Drop tube furnace scheme

In the upper part of the furnace the most critical unit of the installation is set: it is a screw feeder which provides the pulverized fuel to the combustion zone. In addition to the injection of fuel, this unit must provide oxidant delivery and uniform distribution of the oxidant, as well as cooling of the feeder structure elements to prevent premature heating of the fuel and other negative consequences. The combustion products and accumulation of the fuel residues after combustion are removed in the lower part.

Taking into account our own experience, as well as the results of experiments with the use of similar equipment of other researchers [8-13, etc.], the following basic requirements were met in the manufacture of the installation (Figure 1):

- the combustion zone of the furnace, where combustion takes place, had a clearly defined and unchanged over time isothermal zone of the required (under the conditions of modelling the combustion process) length;
- the design (technical characteristics) of the feeder provided acceptable dosing accuracy, stability and consistency of fuel consumption and its ratio to the oxidant (air, oxygen, etc.) throughout the experiment (series of experiments);
- the design of the cooler, mounted in the lower part of the furnace, provided a rapid stop of the combustion process (without smouldering) of fuel residues that have reached the lower part of the furnace;

- technical analysis of the raw fuel, as well as the residue after its combustion, was performed according to the requirements of the relevant standards [14, 15].

To evaluate the results of the fuel combustion process modelling, we used an advanced method [7], which was used to calculate the so-called combustion completeness (burnout) for a particular fuel. The main advantage of the method is the relative simplicity: only the data on the ash content in the raw fuel and in the residue after its combustion are used in the calculations. Comparison of this method with others (Table 1), which was given at the beginning, showed its acceptability in relation to the purposes of the study and the absence of fundamental differences with the approaches used in similar studies.

Several types of coal with different degrees of metamorphism, as well as peat and lignin were used in pulverized fuel fabrication. The raw coal and other fuels after drying were ground to a powdery state in a ball drum mill. The particles were ground to the size that meets the requirements for the PC fractional composition for injection into the blast furnace. The control of the fractional composition of pulverized fuel after grinding was carried out on vibromechanical sieves Fritsch Analysette. Technical analysis and fractional composition of fuels used in the studies are shown in Table 2.

Table 2

Proximate analysis and fractional composition of coal, peat and lignin

Type of fuel	Proximate analysis, %				Distribution by size, % (by weight)		
	W_t^r	A^d	S_t^d	V^{daf}	250-100 μm	100-71 μm	< 70 μm
COAL:							
Anthracite	6.7	17.2	1.26	4.8	39.9	31.6	28.5
Lean coal	10.0	9.5	1.82	10.6	29.8	40.8	29.4
Coal G	11.6	11.4	1.66	35.6	13.7	45.7	40.6
Coal D	12.6	26.3	1.38	40.0	17.8	33.0	49.2
Coal B	58.0	17.9	3.22	68.7	42.2	26.3	31.5
Peat	55.0	30.6	0.28	62.8	10.2	22.6	67.2
Lignin*	60.0	15.9	0.69	63.8	27.6	24.9	47.5

* – product of processing (acid process) of agricultural waste and wood chips

The isothermal zone of the furnace combustion zone (Figure 1) was constructed in such a way as to equal the residence time of the fuel to the residence time of PC particles entering the hot blast flow of the blast furnace at a point away from the tuyere cut by 0.3...0.6 m. This time was 0.01... 0.02 s, which corresponds to the estimates given in [16, 17], as well as to more recent ones, according to which the

residence time of coal particles in the PC plume before reaching the end of the raceway is about 0.01... 0.05 s [18]. Ensuring a stable and time-constant ratio between C_f and O_b (C_f – carbon content in the fuel, O_b – oxygen content in the atmosphere into which the fuel is released) was an important condition for modelling. Based on this ratio, the feeder productivity was calculated and the air flow was controlled (with or without oxygen).

4.2. Results and their discussion

Studies of previous years, the results of which were highlighted at the beginning of the article, showed the possibility to significantly intensify the PC combustion by adding coal with a high yield of volatile matters, as well as other fuel additives with low ignition temperature. But the next question remained unresolved, namely whether the higher completeness of fuel mixtures combustion is a consequence of mechanical mixing of individual results of combustion of two types of fuel, one of which has significantly higher flammability (combustion completeness in identical conditions).

To find the answer to this question, we composed and solved a system of six equations at the first stage:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \left[1 - \frac{A_1^d (100 - A_{res1}^d)}{A_{res1}^d (100 - A_1^d)} \right] \times 100; \quad A_{mix}^d = A_1^d d_1 + A_2^d d_2; \\ \phi_2 &= \left[1 - \frac{A_2^d (100 - A_{res2}^d)}{A_{res2}^d (100 - A_2^d)} \right] \times 100; \quad A_{res_{mix}}^d = A_{res1}^d d_1 + A_{res2}^d d_2; \\ \phi_{mix} &= \left[1 - \frac{A_{mix}^d (100 - A_{res_{mix}}^d)}{A_{res_{mix}}^d (100 - A_{mix}^d)} \right] \times 100; \quad d_1 + d_2 = 1,\end{aligned}$$

where ϕ_1 , ϕ_2 and ϕ_{mix} are the combustion completeness (burnout) of the first and the second fuel of the mixture, as well as the mixture itself, calculated according to the method [6]; A_1^d, A_2^d, A_{mix}^d and $A_{res_{mix}}^d$ are the ash content in the first and the second fuel, in the initial mixture and in the residue from its combustion (% by dry mass) respectively; d_1 and d_2 respectively are the share of basic fuel and fuel additive in the mixture.

As a result, we obtained an equation describing the dependence of the combustion completeness (burnout) of any two-component fuel mixture (ϕ_{mix}) on the amount of fuel additive (d) contained in it:

$$\phi_{\text{mix}} = \left[1 - \frac{(A_1^d - A_1^d d + A_2^d d) \left(100 - \frac{100(1-d)}{\frac{100-\phi_1}{A_1^d} + \frac{\phi_1}{100}} - \frac{100d}{\frac{100-\phi_2}{A_2^d} + \frac{\phi_2}{100}} \right)}{\left(\frac{100(1-d)}{\frac{100-\phi_1}{A_1^d} + \frac{\phi_1}{100}} + \frac{100d}{\frac{100-\phi_2}{A_2^d} + \frac{\phi_2}{100}} \right) (100 - A_1^d + A_1^d d - A_2^d d)} \right] \times 100, \% \quad (1)$$

As can be seen from equation (1), the calculation of the fuel mixtures combustion completeness (burnout) requires data on the burnout of each fuel (ϕ) under conditions identical to the conditions of mixture combustion. For the fuels shown in Table 2, such data were obtained experimentally (Table 3). Experiments on the modelling of combustion in the initial stages (before the PC enters the raceway) were performed in the furnace shown in Figure 1. Modelling of the final stages was performed on the same equipment, but with some design differences which are considered in [6]. All studies of the PC and fuel mixtures combustion were carried out in normal ambient air without oxygen enrichment.

Table 3

Data on the combustion completeness of pure fuels (ϕ , %) obtained experimentally in the furnace during PC combustion modelling (Figure 1)

Stages of PC combustion	Coal					Peat	Lignin
	Anthracite	Lean	Coal G	Coal D	Coal B		
Initial	12.2	17.4	41.4	44.1	51.4	59.6	56.5
Final	43.1	45.8	65.4	67.2	69.8	76.9	73.9

Using the obtained data (Table 3) with the equation (1) in the Excel spreadsheet environment, we obtained the dependences $\phi_{\text{mix}} = f(d)$ for two-component mixtures of anthracite and lean coal with fuel additives. The proportion of additives (d) was varied from 0 to 50%. The results of the calculations are shown in Figure 2 and Figure 3.

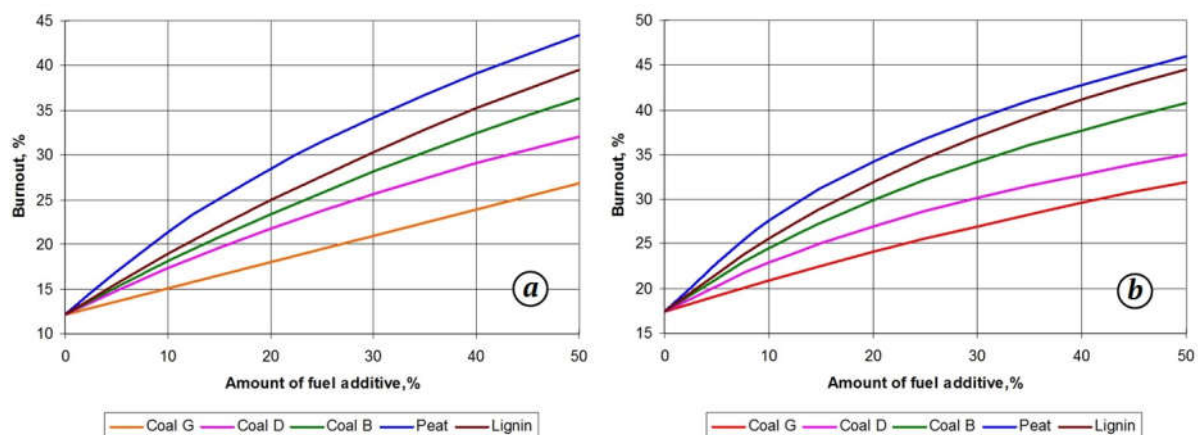


Figure 2 – Fuel mixture burnout (initial stages of combustion) depending on fuel additive amount: a – mixtures with anthracite; b – mixtures with lean coal

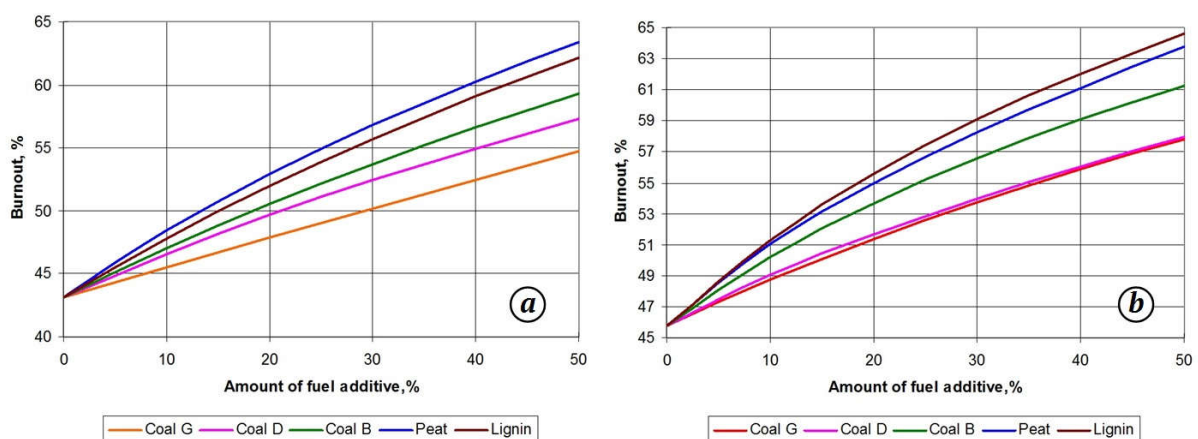


Figure 3 – Fuel mixture burnout (final stages of combustion) depending on fuel additive amount: a – mixtures with anthracite; b – mixtures with lean coal

The results of the calculations shown in Figure 2 and Figure 3 were compared with experimental data regarding the fuel mixtures combustion completeness (burnout) in the initial and final stages of the combustion process. This comparison revealed that in the initial stages of the PC combustion process the experimentally determined combustion completeness of mixtures with the addition of fuels with a high yield of volatile matters does not exceed the calculated one. This is due to the short residence time of the fuel particles in the furnace's isothermal zone (in practice, in the hot blast flow in the area from the point of entry to the tuyere cut) and the rapid release of volatile matters from the relevant fuel additive. The latter is a significant barrier to the contact of oxygen molecules with the carbon skeleton of fuel particles. In the final stages, in contrast to the initial stages, the completeness of fuel mixtures combustion in the experiments was higher than the calculated one. With an increase in the share of additives in the fuel mixture over 15-20% (depending on the type of additive), the difference between the theoretical and the experimental combustion completeness increased markedly. It should be noted that

due to the small amount of experimental data, the obtained results need further clarification and are the subject of further research.

5. Conclusions and prospects for further studies

The analysis of recent publications has shown that the use of coal mixtures in energy and metallurgy, as well as fuel additives to PC such as biomass, wastes such as rubber or plastics, is very promising. We have considered the structure of experimental installation and the method for modelling the process of combustion of fuel mixtures during their injection into the blast furnace. We have offered the formula for the calculation of combustion completeness of PC mixtures with fuel additives. The obtained results allow us to summarize the following:

- in the initial stages of the PC combustion process, occurring in the inner space of the tuyere and partially in the raceway, the experimentally determined combustion completeness of mixtures with the addition of fuels with a high yield of volatile matters does not exceed the calculated one;

- in the final stages, the fuel mixtures combustion completeness in the experiments was higher. With an increase in the share of additives in the fuel mixture over 15-20% (depending on the type of additive), the difference between the theoretical and the experimental combustion completeness increased markedly;

- the proposed formula can be used to estimate the combustion completeness of coal mixtures of different quality, as well as PC with the addition of peat and other fuels containing carbon. The possibility to use the proposed formula in studies of PC combustion with the addition of wastes such as rubber or plastics needs to be clarified.

REFERENCES

1. Gudenau H. Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen - Steuerung der Einblasrate durch den Einsatz von Kohlemischungen / H.W. Gudenau, B. Korthas, R. Kiesler, L. Birkhauser // Stahl und Eisen. – 1990. – №11. – P. 35-40.
2. Carpenter A. Injection of coal and waste plastics in BF's. IEA Clean Coal Centre, March 2010. <https://www.iea-coal.org/report/injection-of-coal-and-waste-plastics-in-blast-furnaces-ccc-166/>
3. Clean Coal Technologies in Japan. Technological Innovation in the Coal Industry. 2nd Edition. NEDO. Kawasaki City, 2015. 148 p. <https://www.nedo.go.jp/content/100861237.pdf>
4. Mousa E. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities / Elsayed Mousa, Chuan Wang, Johan Riesbeck, Mikael Larsson // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 65. – P. 1247-1266.
5. Mousa E. Modern blast furnace ironmaking technology: potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption / Elsayed Mousa // Metall. Mater. Eng. – 2019. – Vol. 25 (2). – P. 69-104. <https://doi.org/10.30544/414>
6. Bondarenko P. Pulverized coal combustion process modelling in the blast furnace tuyere / P.K. Bondarenko, V.I. Kotov, Yu.A. Stupak // Izvestiya. Ferrous Metallurgy ("Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya"). – 1990. – №7. – P. 103.
7. Stupak Yu. Study of the pulverized coal combustion process in laboratory conditions / Yu.A. Stupak // Izvestiya. Ferrous Metallurgy ("Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya"). – 1993. – №8. – P. 35-36.

8. Carpenter A. Coal combustion: Analysis and testing / Anne M. Carpenter, Nina M. Skorupska // IEA Coal Research/64. London: IEA. – 1993. – 97 p. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000303332>
9. Du Sh. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace / Shan-Wen Du, Wei-Hsin Chen, John A. Lucas // Energy. –2010. –Vol. 35. –P. 576-581. DOI: 10.1016/j.energy.2009.10.028.
10. Halder S. An Experimental Perspective on Praxair’s Hot Oxygen Technology to Enhance Pulverized Solid Fuel Combustion for Ironmaking Blast Furnaces / Sabuj Halder // Praxair Inc. –2011. <http://www.praxair.com/praxair.nsf/AllContent/31B770CF22B3FBBF8525799F0075226F>
11. Ueki Ya. Combustion Behavior of Pulverized Coal and Ash Particle Properties during Combustion / Yasuaki Ueki, Ryo Yoshiie, Ichiro Naruse // ISIJ International. –2015. –Vol. 55. –№ 6. –P. 1305-1312.
12. Steer Ju. The effects of particle grinding on the burnout and surface chemistry of coals in a drop tube furnace / Julian M. Steer, Richard Marsh, David Morgan, Mark Greenslade // Fuel. –2015. –Vol. 160. –P. 413-423.
13. Lewtak R. Coal char kinetics of oxidation and gasification reactions / Robert Lewtak, Jarosław Hercog // Chemical and Process Engineering. –2017. –Vol. 38(1). –P. 135-145. DOI: 10.1515/cpe-2017-0011.
14. Coal. Technical analysis: DSTU ISO 17246: 2010. [Valid from 2012-01-07]. –Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2014. –4 p.
15. Solid mineral fuel. Methods for determining ash content. GOST 11022-95 (ISO 1171-97). [Valid from 1997-07-01]. –Minsk: IPK "Publishing house of standards", 1996. –8 p.
16. Dunaev N. Injection of pulverized materials into blast furnaces / N.E. Dunaev, Z.M. Kudryavtseva, Yu.M. Kuznetsov. –M.: Metallurgy, 1977. –208 p.
17. Guo Yu. Injection de poudre de charbon dans le haut fourneau / Yun-zhi Guo, Yun-cai Liu // Rev. Met. Paris. –1980. –Vol. 77. –№10. –P. 841-851. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/198077100841>.
18. Shen Y. Three-dimensional modelling of in-furnace coal/coke combustion in a blast furnace / Y.S. Shen, B.Y. Guo, A.B. Yu, P.R. Austin, P. Zulli // Fuel. –2011. –Vol. 90. Issue 2. –P. 728-738.

Received 22.01.2021.

Accepted 03.02.2021.

УДК 669.162.22+267.4

Ю.О. Ступак, Т.С. Хохлова

ПРО ДЕЯКІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРІННЯ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ТА ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ТРУБЧАСТІЙ ПЕЧІ

У статті розглянуті окремі аспекти моделювання горіння пилоподібного палива в лабораторних умовах на установках типу «вертикальна трубчаста піч» (в науковій періодиці - drop tube furnace). Розглянуто схему установки для дослідження процесу горіння пиловугільного палива (ПВП) в умовах, що подібні до умов нагріву та займання часток вугілля в потоці дуття доменної печі та їх подальшої газифікації у фурменому осередку. Сформульовані основні вимоги щодо забезпечення надійності результатів моделювання. Досліджені способи оцінки повноти згорання, що застосовуються в подібних дослідженнях. Запропонований зручний спосіб розрахункової оцінки повноти згорання двокомпонентних паливних сумішей. За цим способом розрахунок може здійснюватися для будь-яких співвідношень компонентів у двокомпонентній суміші палив з використанням даних щодо вихідного вмісту золи в кожному та відповідної повноти згорання. Отримані розрахункові дані щодо залежності повноти згорання ПВП з антрациту та пісного вугілля з паливними добавками. Показано, що запропонований підхід може застосовуватися для оцінки

експериментальних даних з вивчення повноти згорання паливних сумішей. Встановлено, що для початкових стадій горіння ПВП (нагрів, виділення та займання летких речовин), які відбуваються ще до потрапляння часток палива до фурменого осередку доменної печі, значення повноти згорання паливних сумішей, що фіксувалися в експериментах, суттєво не відрізняються від розрахункових. Для заключних стадій горіння ПВП (нагрів та вигорання вуглецевого залишку), що відбуваються переважно у фурменому осередку та за його межами, повнота згорання, визначена в лабораторних дослідженнях, виявилася помітно вищою за розрахункову. Отримані результати підтвердили ефективність використання установки типу «вертикальна трубчаста піч» для моделювання процесу горіння ПВП при введенні палива з потоком нагрітого дуття у фурмені осередки доменної печі та дослідження впливу на процес горіння різних факторів. Результати подібних досліджень можуть використовуватися для вдосконалення конструкцій вузлів введення ПВП в доменну піч і вивчення можливостей щодо підвищення повноти згорання часток вугілля та питомої витрати ПВП.

Ключові слова: доменна піч, фурма, фурмене вогнище, пиловугільне паливо (ПВП), вертикальна трубчаста піч, суміші палива, добавки, летючі речовини, повнота згорання, вигорання.

Ступак Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теорії, технології та автоматизації металургійних процесів, секретар Вченої ради навчально-наукового інституту інтегрованих форм навчання, Національна металургійна академія України, м Дніпро.

Хохлова Тетяна Станіславівна – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри термічної обробки металів ім. К.Ф.Стародубова, директор навчально-наукового інституту інтегрованих форм навчання, Національна металургійна академія України, м Дніпро.

Ступак Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теории, технологии и автоматизации металлургических процессов, секретарь Ученого совета учебно-научного института интегрированных форм обучения, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

Хохлова Татьяна Станиславовна – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры термической обработки металлов им. К.Ф.Стародубова, директор учебно-научного института интегрированных форм обучения, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

Stupak Yuri - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theory, Technology and Automation of Metallurgical Processes, Secretary of the Academic Council of the Educational-Scientific Institute of Integrated Education, The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro.

Khokhlova Tatyana – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat Treatment of Metals named after K.F. Starodubov, Director of the Educational-Scientific Institute of Integrated Education, The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro.

ENERGY EFFICIENT WATER-COOLED ELEMENTS FOR FOUNDRY CLASS ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES

Low energy efficiency of foundry class electric arc steelmaking furnaces (EAF) mainly is caused by heat loss by massive lining during forced downtime. A low-power transformer doesn't allow, in the conditions of classical technology, practice of traditional water-cooled elements in order to replace partially the lining, what determines increased refractory consumption. The aim is energy and refractory savings. On the basis of numerical modeling of heat exchange by radiation in the EAF working space, taking into account capacity, bath shape factor, duration of technological period of heat, a multiple regression equation for power of heat loss with cooling water was obtained. Three-row water-cooled wall panels with a spatial structure are elaborated, which provide a decrease in heat loss by 14 %, in comparison with two-row ones. Estimates of optimal relative cooled surface of the EAF working space, providing refractory savings up to 25-30%, are substantiated.

Keywords: foundry class electric arc furnace, water-cooled elements, energy efficiency.

Introduction

Possibility of a wide choice of original charge and variation of oxidation potential in melting process makes the electric arc furnace (EAF) a general-purpose unit in foundry shops of engineering industry

Energy-intensive classical technology with at usually low specific power of the transformer, irregular operation with forced downtime predetermine a much lower, in comparison with “large” metallurgy, energy efficiency of foundry class furnaces [1, 2]. Flat and shallow steelmaking bath of the EAF enhances the problem due to increased heat loss by radiation in the conditions of long refining period.

Application of traditional for EAF of “large” metallurgy water-cooled elements (WCE) with one row tubes dense structure [3] substantially limited by reason of technological risks, causes high energy losses, which heightens refractory materials consumption. A promising solution seems to be WCE with a spatial tubes structure (one row untight, two-row), which is characterized by reduced on 25-35 % heat losses due to heat insulation and heat accumulation properties of deposit slag filling [4].

Known mathematical models of heat and mass transfer in the EAF workspace [5, 6] don't pay sufficient attention to the thermal state and energy loss in WCE in relation to foundry class furnaces.

The development of WCE with reduced heat loss and grounding on the base of mathematical model an optimal relative cooled surface of workspace, taking into account the peculiarities in foundry class EAF, are urgent.

Purpose

Work aims to improve energy efficiency and refractory savings in the EAF due to WCE design improvement.

Method

Mathematical modeling and numerical study of thermal state of WCE in foundry class EAF workspace.

Main research material

A mathematical model of heat exchange by radiation, adapted to the EAF conditions [7], was used. It deals with primary sources of radiation: surfaces of bath, arcs and electrodes. Insignificant contribution of secondary radiation, caused by dust and gas environment, was not taken into account in given comparative analysis.

Scheme of radiant heat transfer heat in AC EAF is shown in Figure1.

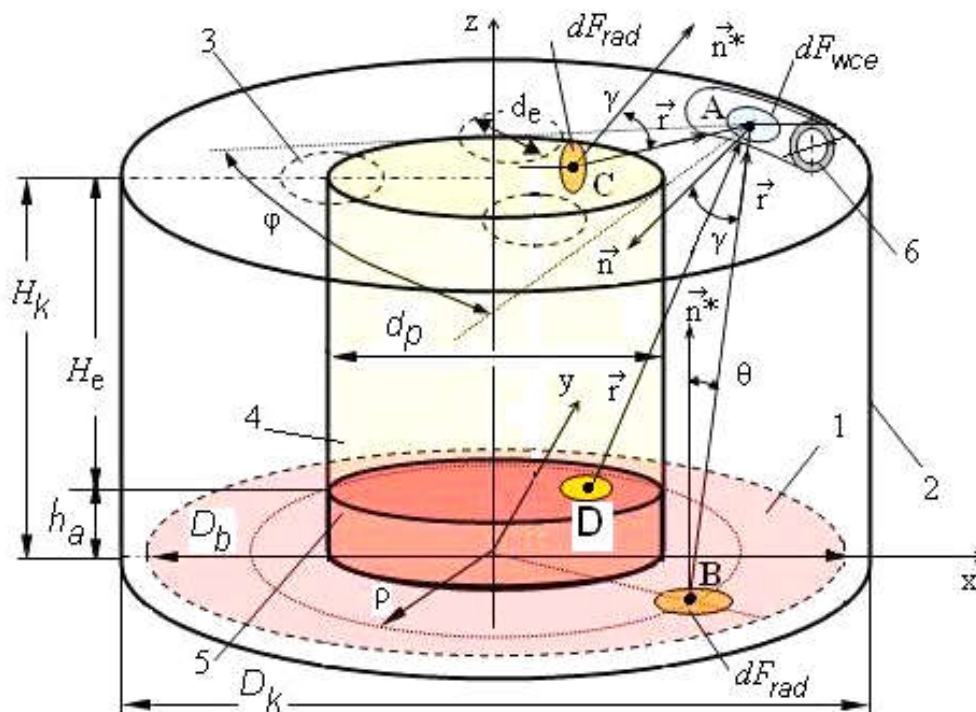


Figure 1 – Scheme of heat exchange by radiation in the EAF workspace. 1 – bath, 2 – casing, 3 – electrode, 4,5 – conditional surfaces of electrodes and arcs, respectively, 6 – WCE
x, y, z, φ , ρ – coordinates; γ , θ – direction angles, r – radius-vector

Radiation heat exchange workspace formed by bath with diameter D_b , casing with diameter D_k and height H_k , electrodes with diameter d_e , height H_e and pitch diameter d_p , arcs with length h_a . The elementary area dF_{wce} around point A, located on the tubular WCE, receives radiation from each elementary area dF_{rad} of bath, electrodes and arcs around the points B, C and D, accordingly. Emitting surface of arcs and electrodes is the lateral surface of cylinders with diameter d_p . Arc length is approximated by dependence from EAF capacity M , t: $h_a = 0.15 + 0.003M$, m. Temperature of the bath surface, arc and WCE is taken 1820, 3550 and 1100 K, respectively. Temperature of electrode radiating surface $T_e = 3050 + 19200\zeta^4 - 48000\zeta^3 + 40400\zeta^2 - 13800\zeta$, K is a function of relative height of given point of conditional cylinder surface above the bath ζ , obtained basing on data [6].

The power of heat loss with cooling water by working WCE surface F_{wce} (m²) with temperature T (K) from radiating surface F_{rad} (m²) with temperature T_{rad} (K), taking into account mutual irradiation factor, is, kW:

$$P_{wce} = \sigma \varepsilon (T_{rad}^4 - T^4) \int_{F_{wce}} \int_{F_{rad}} \left(\frac{\cos \theta \cos \gamma}{r^2} \right) dF_{rad} dF_{wce} \quad (1)$$

where σ – Stefan-Boltzmann constant, kW/(m²K⁴); ε – reduced emissivity of heat exchange surfaces; θ, γ, r – direction angles and radius vector, respectively; k_{wce} – averaging coefficient of heat flux on WCE surface.

Evaluations of energy loss (1) seems convenient by approximation with multiple regression equation versus capacity of the furnace, steelmaking bath shape factor m (diameter to depth ratio) and relative area of water-cooled wall surface β_w . In the context of 3-12-ton foundry class EAF this is, kW:

$$P_{wce} = k_{wce} (50.78M + 46.63m + 833.75\beta_w - 282.31) \quad (2)$$

The expression (2) was obtained under the condition that relative area of cooled roof surface, realized in central part, critical in terms of refractory resistance, is, from the design positions, 0.25-0.32. Averaging coefficient of the heat flux k_{wce} depends on WCE design.

Taking into account the world [8] and domestic [4] experience in the area of energy-saving WCE, a three-row panel (Fig. 2) with a spatial structure has been developed for foundry class EAF.

Introduction of additional row of pipes contributes to increase thermal resistance to the passage of heat flux to water due to a stable slag deposition within spatial structure.

Stationary heat exchange between EAF working space and tubular WCE, filled with thermal equilibrium layer of slag, is described by the equation:

$$q - (1 - \varepsilon_{wce}) \sigma T_1^4 - \frac{(T_1 - T_2)}{(b/\lambda + b_g/\lambda_g + 1/\alpha_w)} - \alpha_k(T_3 - T_0) = 0, \quad (3)$$

where q – heat flux; ε_{wce} – emissivity factor; α_w, α_k – heat transfer coefficient from pipe wall to water and into environment, respectively; $b, \lambda, b_g, \lambda_g$ – thickness and thermal conductivity of slag and pipes, respectively; T_1, T_2, T_3, T_0 – temperature of working surface, water, outer surface and environment, respectively.

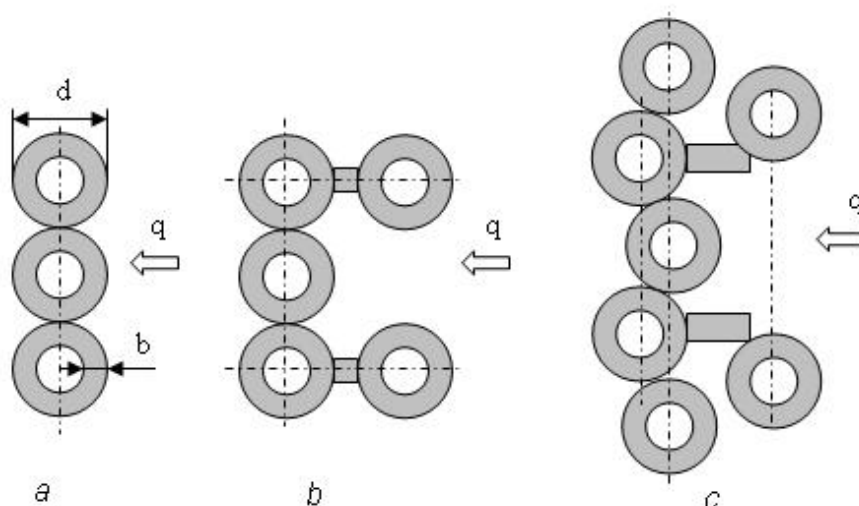


Figure 2 – WCE of traditional design with dense tubes structure (a); two-row (b) and three-row (c) panels section with spatial structure. Arrow shows actual heat flux direction. Designations are in the text

Two-dimensional problem of WCE thermal state in the EAF workspace was simulated in application package ELCUT 6.2 by the finite element method. Energy loss through outer WCE surface was neglected. Initial and boundary conditions of numerical modeling are given in Table 1.

Table 1

Initial and boundary conditions of numerical modeling

Name of block (B) and edge (E), its number in Figure 3	Heat conductivity (λ) for block. Temperature (T) heat transfer coefficient (σ, α), emissivity (ε) for edge	Dimensions, mm
Slag (B1)	$\lambda = 2.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [9]	$d = 60,$ $b = 10$
Pipe (B2)	$\lambda = 42 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, steel-20	
Working surface (E1)	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$; $T = 1900 \text{ K}$; $\varepsilon = 0.7$.	
Cooling surface (E2)	$\alpha = 3000 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$; $T = 320 \text{ K}$.	

Thermal fields in the WCE under action of heat flux q for reviewed panels options are shown in Fig. 3.

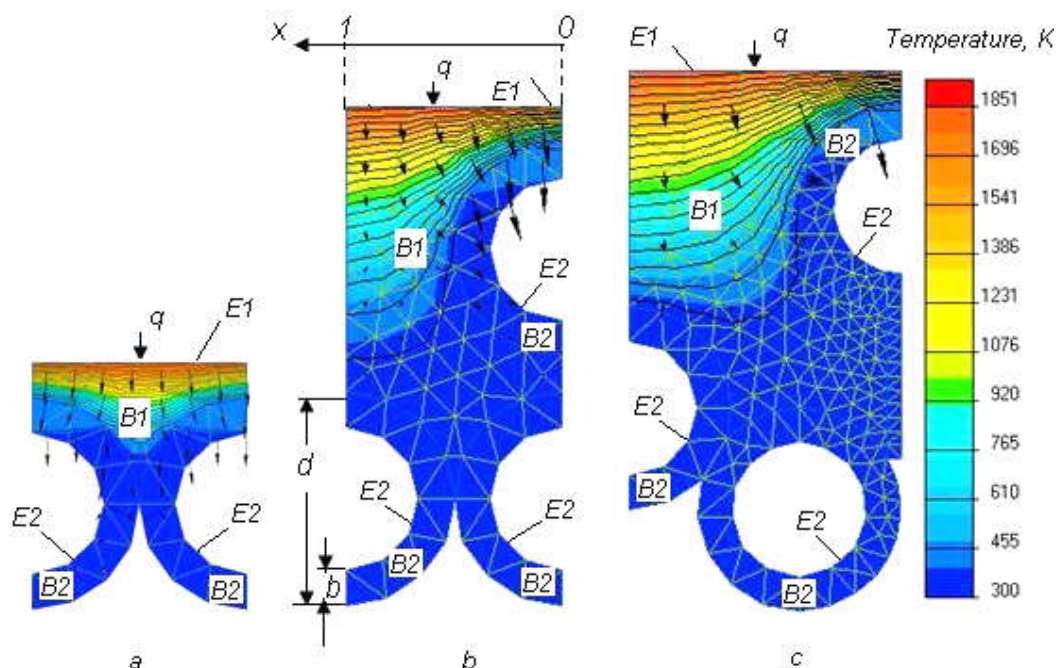


Figure 3 – Temperature fields in traditional (a), two-row (b) and proposed three-row (c) WCE. Lines are isotherms; arrows show heat flux value and direction. Designations are in Table

Integral heat loss with cooling water, evaluated by means of package on edges E2, presented in Fig. 4.

According to calculations, the transition from traditional panel to WCE with spatial two-row structure reduces heat loss with cooling water by 30 %, and three-row design gives additional 14% energy savings in comparison with two-row panel.

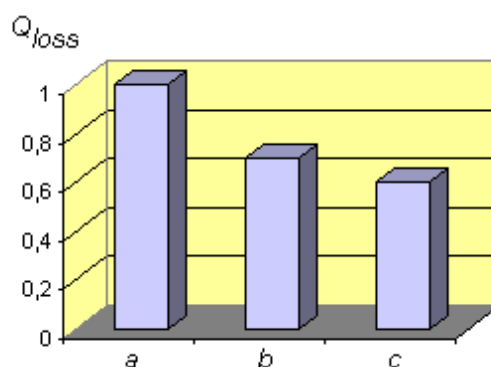


Figure 4 – Relative heat loss with cooling water Q_{loss} for reviewed WCE options a, b, c according to Figure 2, 3

Analysis of heat flux, passing along direction x of working surface modulus (edge E1 in Fig. 3) through spatial WCE structure to cooling water, is shown in Figure 5. Pursuant to numerical modeling, spatial structure promotes increasing of panel thermal resistivity and, respectively, reduction of heat loss with cooling water.

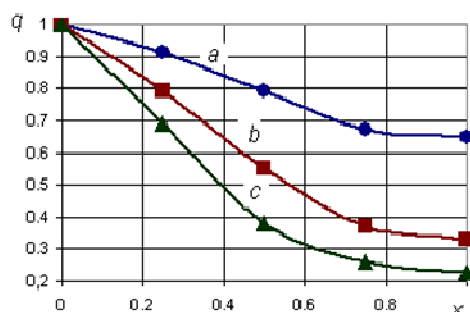


Figure 5 – Relative heat flux q distribution along WCE modulus relative coordinate x for panels design options a, b, c according to Figure 2, 3

On the base of these data, the values of averaging coefficient of heat flux on WCE surface for panel options were obtained, in a first approximation, as half-sum of the boundary relative heat fluxes in considered modulus. For traditional, two- and three-row panels k_{wce} is 0.82, 0.67 and 0.61, respectively.

The energy balance of refining period in 3-12-t EAF is made for next conditions: melting of structural steel; forced bath inert gas stirring; reduction of bath shape factor from traditional 4.5 to 2.5; combined roof with central water-cooled part with relative area 0.25-0.32. For proposed three-row WCE an average relative cooled surface of walls in 3-12-t EAF can reach 0.5-0.6. Given value of β_w ensures reduction in refractory consumption up to 25–30 %.

Conclusions

Three-row water-cooled wall panels with a spatial structure are elaborated, which provide a decrease in heat loss by 14 %, in comparison with two-row ones, and by 40% in comparison with traditional one-row dense structure WCE.

Estimates of optimal relative cooled surface of the EAF working space, providing refractory savings up to 25-30%, are substantiated.

REFERENCES

1. Biswas, S., Peaslee, K., Lekakh, S. (2012). Melting energy efficiency in steel foundries. AFS Transactions 2012 © American Foundry Society, Schaumburg, IL, USA, 449-456.
2. Mironov, Yu.M., Petrov, V.G. (2010). Thermal losses and power efficiency of arc steelmaking furnaces. *Metally (Russian Metallurgy)*, 12, 1141-1144.
3. Toulouevski, Yu., Zinurov, I. (2010) Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin (Germany): Springer-Verlag. 258 p.
4. Timoshenko, S.M., Doroshenko, A.V., Dyadkov, B.P., Tischenko, P.I., Onischenko, S.P. (2018). Energoeffektivnyye resheniya pri modernizatsii malotonnazhnykh dugovykh staleplavil'nykh pechey liteynogo klassa (Energy-efficient solutions for the modernization of low-tonnage arc furnaces of foundry class). *Metall i lyt'e Ukrainy (Metal and casting of Ukraine)*, 3-4, 34-40.
5. Logar, V., Dovžan, D., Škrjanc, I. (2012). Modeling and validation of an electric arc furnace. *ISIJ International*, vol. 52, 3, 402-423.
6. Gruber, J.-C., Echterhof, T., Pfeifer, H. (2016). Investigation on the Influence of the Arc Region on Heat and Mass Transport in an EAF Freeboard using Numerical Modeling. *Steel research international*, vol. 87, no.1, 15–28. DOI: 10.1002/srin.201400513.
7. Timoshenko, S.N. (2016). Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. System Technologies. Regional interuniversity collection of scientific works. Dnipro: NMetAU-IVK Systemni tekhnolohiyi, 3, 33-39.

8. Patent US 5772430. F27D 9/00. M. Pavlicevic, G. Gensini, A. Poloni, R. Sellan (1996). Cooling device with panels for electric arc furnaces. Danieli & Co Off. Mec., Spa (Italy).
9. Kruger, K., Ehrbar, A., Timm, K. (1998). Schlackenabdeckungen und thermische Verluste eines Drehstrofens. Stahl und Eisen, 9 (118), 63-67.

Received 11.01.2021.

Accepted 25.01.2021.

UDC: 621.365.22

S. Timoshenko, E. Nemtsev, M. Gubinski

ENERGY EFFICIENT WATER-COOLED ELEMENTS FOR FOUNDRY CLASS ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES.

Analysis of recent research and publications. Low energy efficiency of foundry class electric arc steelmaking furnaces (EAF) mainly is caused by heat loss in massive refractory lining during forced downtime. A low-power transformer doesn't allow, in the conditions of classical technology, practice of traditional water-cooled elements in order to replace partially the lining, what determines increased refractory consumption. Known mathematical models of heat and mass transfer in the EAF working space don't pay sufficient attention to the features of thermal state and energy loss in water-cooled elements in relation to foundry class furnaces.

Purpose. Work aims to improve energy efficiency and refractory savings in foundry class EAF due to water-cooled elements design improvement.

Method. Work is based on numerical modeling of heat exchange by radiation in the working space of the EAF and thermal state of water-cooled elements with spatial structure.

Research findings. On the base of radiation heat exchange study, a multiple regression equation for power of heat loss with cooling water was obtained, taking into account capacity of the furnace, steelmaking bath shape factor (diameter to depth ratio), duration of technological period of the heat and averaging coefficient of heat flux through working surface of water-cooled element. For traditional one-row, two- and elaborated three-row panels averaging coefficient is 0.82, 0.67 and 0.61, respectively.

Practical significance. Three-row water-cooled wall panels with a spatial structure are elaborated, which provide a decrease in heat loss with cooling water by 14 %, in comparison with two-row ones and by 40% in comparison with traditional one-row panels with dense structure. Estimates of optimal relative cooled surface for 3-12-ton EAF working space, providing refractory savings up to 25-30% due to three-row water-cooled panels installation, are substantiated.

Keywords: foundry class electric arc furnace, water-cooled elements, energy efficiency.

УДК 621.365.22

С.М. Тимошенко, Е.М. Немцев, М.В. Губинський

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ВОДООХОЛДЖУВАНІ ЕЛЕМЕНТИ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ЛИВАРНОГО КЛАСУ

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Низька енергоефективність сталеплавильних електродугових печей класу ливарного класу (ДСП) головним чином обумовлена втратами тепла у масивних вогнетривких футеровках під час вимушеного простою. Трансформатор малої потужності не дозволяє в умовах класичної технології

застосовувати традиційні елементи з водяним охолодженням, щоб частково замінити футеровку, що обумовлює збільшення витрат вогнетривких матеріалів. Відомі математичні моделі тепло- та масопереносу в робочому просторі ДСП не приділяють достатньої уваги особливостям теплового стану і втратам енергії у водоохолоджуванних елементах, коли мова йде про печі ливарного класу.

Мета. Робота спрямована на підвищення енергоефективності та економії вогнетривів у ДСП ливарного класу за рахунок покращення конструкції водоохолоджуванних елементів.

Метод. Робота заснована на чисельному моделюванні теплообміну випромінюванням у робочому просторі ДСП і теплового стану водоохолоджуванних елементів просторової структури.

Результати досліджень. На основі досліджень радіаційного теплообміну було отримано рівняння множинної регресії для потужності теплових втрат з охолоджуваною водою, що враховує потужність печі, коефіцієнт форми сталеплавильної ванни (відношення діаметра до глибини), тривалість технологічного періоду нагріву й усереднюючий коефіцієнт теплового потоку через робочу поверхню водоохолоджуваного елемента. Для традиційних однорядних, дворядних і складних трирядних панелей коефіцієнт усереднення становить 0,82, 0,67 і 0,61 відповідно.

Практичне значення. Розроблено трирядні водоохолоджувані стінові панелі з просторовою структурою, що забезпечує зниження теплових втрат з охолоджуваною водою на 14% у порівнянні з дворядними і на 40% у порівнянні з традиційними однорядними панелями з щільною структурою. Отримано оцінку оптимальної відносної охолоджуваної поверхні робочого простору ДСП 3-12 т, що забезпечує економію вогнетриву до 25-30% за рахунок встановлення трирядних водоохолоджуванних панелей.

Ключові слова: електродугова піч ливарного класу, водоохолоджувані елементи, енергоефективність.

Тимошенко Сергій Миколайович – д.т.н., с.н.с., кафедра електричної інженерії, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Немцев Едуард Миколайович – кафедра електричної інженерії, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Губинський Михайло Володимирович – д.т.н., проф., кафедра промислової теплоенергетики, Національна металургійна академія України.

Тимошенко Сергей Николаевич – д.т.н., с.н.с., кафедра электрической инженерии ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

Немцев Эдуард Николаевич – кафедра электрической инженерии, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

Губинский Михаил Владимирович – д.т.н., проф., кафедра промышленной теплоэнергетики, Национальная металлургическая академия Украины.

Timoshenko Sergii – Dr. of Sci., Donetsk National Technical University, professor.

Nemtsev Eduard – Senior Instructor, Donetsk National Technical University.

Gubinskij Mikhail – doctor of engineering's sciences, professor, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

DOI: 10.34185/1991-7848.2021.01.14

УДК 669.02/09:669:681.3.001.8

Д.М. Тогобицька, Д.О. Степаненко, А.І. Белькова, А.П. Петров, Ю.М. Ліхачев¹⁴

**БАНК ДАНИХ «МЕТАЛУРГІЯ» – ІНФОРМАЦІЙНА ОСНОВА
ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ
СИСТЕМ ТА ЇХ РОЗПЛАВІВ**

В рамках банку даних «Металургія» створені і постійно розвиваються бази даних «Залізородні матеріали», «Шлак» і «Феросплави». База даних «Залізородні матеріали» містить відомості про властивості більше 1200 складів різних видів залізородної сировини, що включають характеристики міцності і високотемпературні властивості. Описана структура бази експериментальних фізико-хімічних даних про властивості шлакових і оксидних розплавів «Шлак». Розроблено програмні засоби для числової ідентифікації і генерації потрібних діаграм для різних оксидних систем. База даних «Феросплави», включає інформацію про виробництво, хімічний склад і вимоги, що пред'являються до феросплавів різних груп. Дані баз даних використовуються при розробці моделей для прогнозування фізико-хімічних властивостей оксидних і металевих систем, а також в якості вихідних параметрів при математичному, фізико-хімічному та фізичному методах моделювання процесів, що протікають при взаємодії в системі «метал-шлак».

Ключові слова: бази даних, залізородні матеріали, шлак, діаграми, феросплави, властивості.

В Інституті чорної металургії (ІЧМ) в рамках створеного в кінці минулого століття галузевого Банку даних «Металургія» (БДМет) [1] системно ведуться роботи зі створення баз даних (БД), які надають користувачеві широкий сервіс, що дозволяє не тільки раціонально зберігати необхідні дані, а й зручно оперувати ними. Створені в ІЧМ бази даних, а також моделі для прогнозування фізико-хімічних властивостей вивчених оксидних систем доведені до комп'ютерної реалізації, що робить їх доступними при вирішенні конкретних практичних завдань (оцінки якості залізородних матеріалів, оптимізації шлакового режиму доменного і сталеплавильного процесів, оцінки технологічних властивостей шлаків і гірських порід при їх використанні в будівельній та інших галузях промисловості та ін.).

Для ведення баз даних розроблена на мові програмування С# і постійно розвивається інформаційно-пошукова система (ІПС), що забезпечує автоматизацію підготовки, введення і коригування даних, пошук і логіко-синтаксичний контроль вхідної інформації. Для швидкого доступу до будь-якого документу бази автоматично будується індексний файл, який містить

інформацію про розташування відповідних характеристик в документах. В системі передбачена автоіндексація по текстових полях документу або будь-якої їх складової частини відповідно до «маски». Діалогові засоби комплексного перегляду інформації в базі забезпечують її перегляд згідно зі структурою як в обсязі всіх полів бази, так і будь-якого його сегменту по ланцюгу «схема → запит → документ». Спеціальні програмні засоби забезпечують скануючий пошук інформації з будь-якою вказаною ознакою або їх комбінації і вивантажувати знайдену інформацію в файли Excel.



Рисунок 1 – Вхідне вікно у систему БДМет

Бази даних, які містять результати експериментальних досліджень властивостей металургійних розплавів, в тому числі шлаків і інших оксидних систем, служать інформаційною основою для теоретичної та прикладної металургії при розробці шляхів вдосконалення існуючих і принципово нових технологій отримання металопродукції необхідної якості при зниженні витрат на її виробництво і поліпшення екологічних показників. Найбільший інформаційний потенціал БДМет мають бази даних «Залізорудні матеріали», «Шлак» і створена «Феросплави» (рисунок 1). До теперішнього часу вони найбільш затребувані і активно поповнюються [2-4].

База даних «Залізорудні матеріали» створена на основі накопичених в ІЧМ власних експериментальних даних і літературних публікацій інших авторів (глибина пошуку - 70 років), а також дані довідників, монографій. Згідно з розробленим стандартом підготовлено понад 120 паспортів

експериментальних даних (ПЕД) [1] про властивості більше 1200 складів різних видів залізорудної сировини, що включають характеристики міцності і високотемпературні властивості (температури початку і кінця розм'якшення і плавлення руд, концентратів і агломерату).

Деякі матеріали про плавкість, міцність, відновлюваність представлені у вигляді супутніх експериментальним даним авторизованих моделей, що описують залежності цих властивостей від компонентного хімічного складу. Недолік таких рівнянь полягає в тому, що вони забезпечують достовірність і точність розрахунків тільки в умовах конкретної вибірки складів, використаних для їх висновків, не враховують структуру залізорудних розплавів, і важко виконати аналіз їх фізичного змісту. Значною мірою дискусійний характер висновків аналізу експериментальних даних в подібних випадках обумовлений недосконалістю застосовуваної методології дослідження взаємозв'язку складу багатокомпонентних систем з комплексом їх властивостей.

Створена база даних стала основою для подальшої розробки моделей для вирішення задач прогнозування властивостей залізорудних матеріалів на основі їх хімічного складу з використанням фізико-хімічних параметрів міжатомної взаємодії [1]. Відповідно до методики прогнозування властивостей залізорудних матеріалів раніше [5] в ІЧМ були створені моделі для розрахунку металургійних властивостей агломератів і окотишів в залежності від вмісту в них Fe_2O_3 , FeO і параметрів ρ - кількісний показник катіонів до аніонів і Δe - зарядовий стан системи, що характеризують структуру і властивості шлакової зв'язки системи у вигляді рівнянь: Властивість = $f(\rho, \Delta e, \text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3)$. При цьому були використані лабораторні результати виконані на установках ІЧМ наступних металургійних властивостей агломератів і окотишів всіх фабрик країн СНД: міцність по виходу кондиційної фракції +5 мм ($X_{+5}, \%$); стираємість по виходу класу 0,5-0 мм ($X_{0,5}, \%$); ступінь відновлення ($R_{\text{св}}, \%$) і металізації ($\omega_{\text{св}}, \%$) при 800°C (по ГОСТ 19575-84) і при 1050°C, просідання шару ($\Delta H, \%$), перепад тиску газового потоку ($\Delta P, \text{Па}$) при відновленні шару під навантаженням (по ГОСТ 21707-76).

В результаті актуалізації бази даних «Залізорудні матеріали» новими опублікованими експериментальними даними з розширенням діапазонів зміни хімічного складу і властивостей отримані залежності міцності, відновлюваності, просідання шару і перепаду тиску газового потоку агломератів і окотишів від вмісту в них Fe_2O_3 , FeO і інтегральних параметрів ρ і Δe , які в окремих випадках носять нелінійний характер (рис. 2). В результаті отримано рівняння для розрахунку властивостей агломератів і окатишів, що використовуються в доменному виробництві на підприємствах України [1].

База експериментальних фізико-хімічних даних про властивості шлакових розплавів «Шлак» протягом більше 20 років знаходиться в стадії постійної експлуатації і активного поповнення новими літературними та власними експериментальними даними.

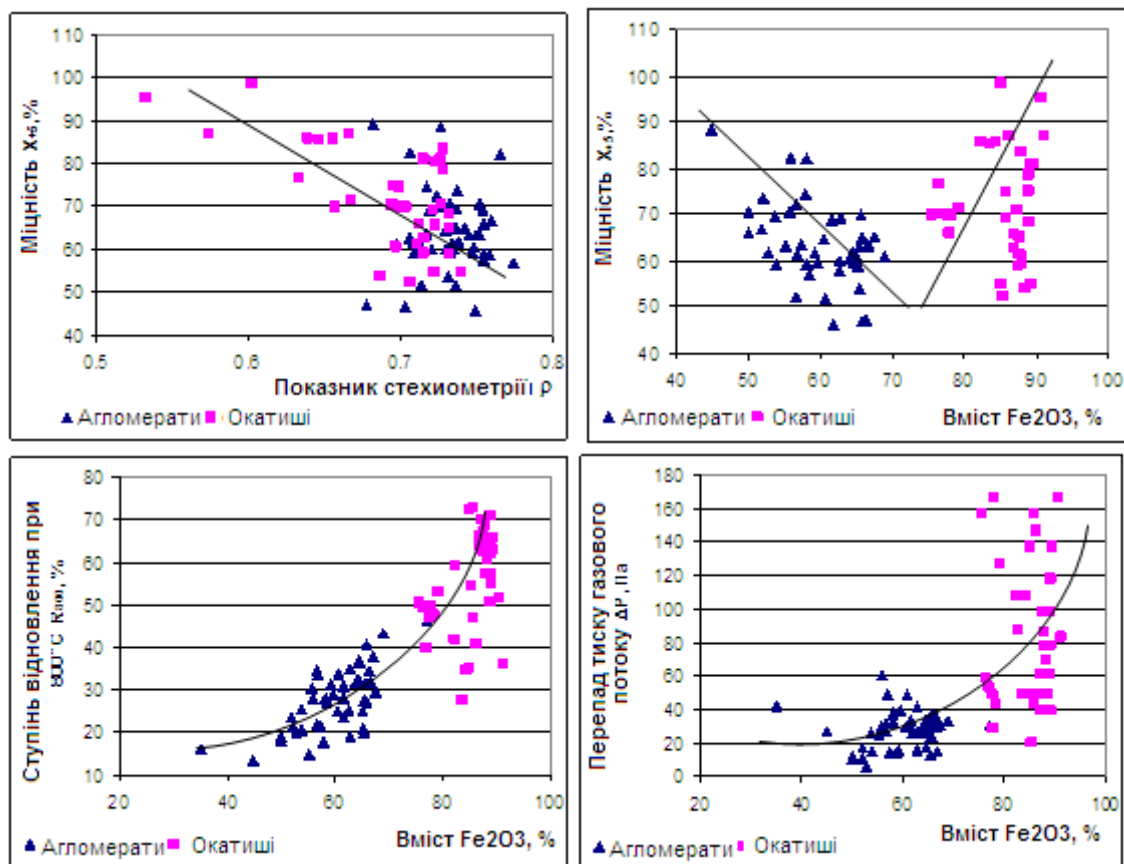


Рисунок 2 – Залежність властивостей агломератів і окатишів від вмісту в них Fe_2O_3 , FeO і інтегрального параметру ρ

В цілому база даних «Шлак» містить інформацію про властивості шлаків різного призначення: доменних, мартенівських, конверторних, рафінувальних для позапічної обробки чавуну і сталі, феросплавного виробництва, для розливання сталі та ін. База даних позбавляє дослідника від необхідності проводити тривалі, трудомісткі і дорогі експерименти, прискорює пошук необхідної інформації, а також дозволяє провести, шляхом обчислювального експерименту, вибір складів оксидних систем з необхідними властивостями в заданому температурному інтервалі. База даних «Шлак» містить інформацію про фазовий, мінералогічний склад і властивості потрійних і четвертих систем складу: $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ в процесі їх кристалізації (рисунки 3 і 4). Також база поповнена експериментальними даними про в'язкість та електропровідність шлаків процесу електрошлакового переплаву, які були отримані в рамках сумісних наукових досліджень з Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ.

У зв'язку з необхідністю забезпечення наукових досліджень даними про властивості шлакових розплавів різного технологічного призначення, інформаційно-пошукова система бази «Шлак» поповнена програмним забезпеченням^{*15} (рисунок 5), яке дозволяє виконати числову ідентифікацію трьох- і чотирьох компонентних діаграм фазового стану або зміни властивостей оксидних систем різних за хімічним складом. Принцип роботи програмного забезпечення полягає в завантаженні відповідної, трьох- або чотирьох компонентної потрібної діаграми і знаходженні в полі діаграми необхідної точки з даними про фазовий склад або певних властивостей (температура ліквідус, в'язкість, електропровідність, поверхневий натяг та ін.). В результаті чого виводиться інформація про хімічний склад системи та її властивості. Програма здатна вирішувати і зворотні завдання, з використанням прогнозних моделей генерувати потрібні діаграми зміни властивостей (рисунок 6).

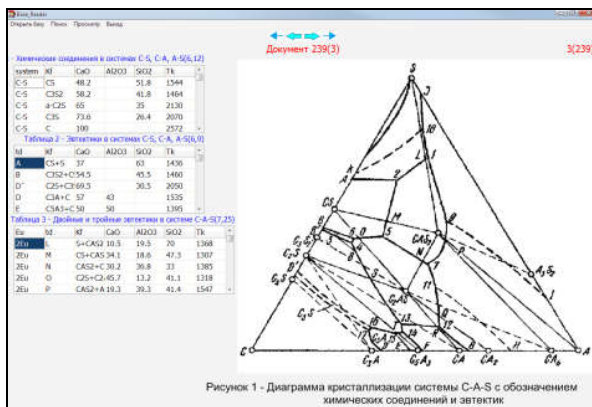


Рисунок 4 – ПЭД бази даних «Шлак» в ІПС, що містить інформацію про фазовий стан системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

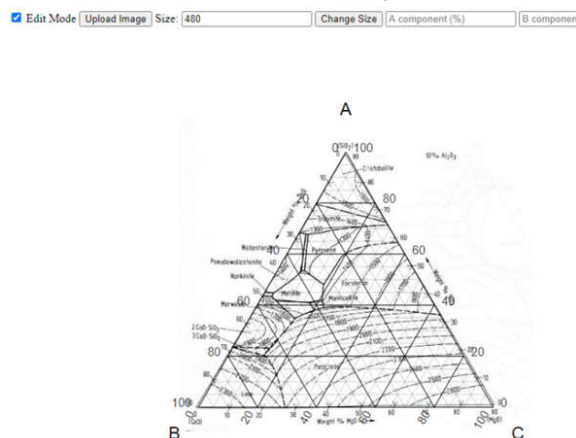


Рисунок 6 – Числова ідентифікація діаграми фазового стану системи $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ з вмістом 10% Al_2O_3



Рисунок 5 – ПЭД бази даних «Шлак» в ІПС, що містить дані про властивості сталеплавильних шлаків

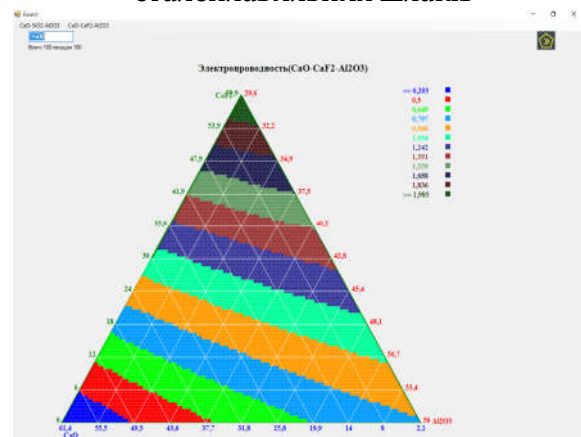


Рисунок 7 – Генерація потрібної діаграми зміни електропровідності для системи $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

* Програмне забезпечення розроблено інж. І кат. ІЧМ НАНУ С.С. Черським.

Як показує досвід для обґрунтованого вибору раціонального складу шлаків з позиції забезпечення якості виплавленого металу і оптимізації енергетичних витрат на його виплавку для конкретних технологічних умов роботи металургійного агрегату необхідно враховувати структурний і фазовий стан шлакового розплаву [6].

База даних «Феросплави» містить інформацію вітчизняних і зарубіжних авторів про виробництво, хімічний склад і вимоги, що пред'являються до феросплавів різних груп. В даний час в базу даних введено 35 ПЕД, що містять інформацію (понад 200 складів) про комплекс фізико-хімічних, фізичних і теплофізичних властивостей феросплавів широкого сортаменту: ферохрому, феросиліцію, феромарганцю, ферованадію, феротитану, фероніобію, феронікелю, фероцирконію, феромолібдену, силікокальцію, силікомарганцю та ін. Інформація про найважливіші теплофізичні, фізико-хімічні і фізико-механічні властивості систематизована і прив'язана до конкретного хімічного складу даної марки феросплавів.

Зокрема, в роботі [7] запропоновано рівняння для оцінки фізичних, фізико-хімічних і теплофізичних властивостей (ентальпія, щільність, температура плавлення, теплоємність, теплота плавлення, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності, питомий електроопір) феросплавів промислових марок, наявні експериментальні дані по яким обмежені або носять суперечливий характер. Розроблено напівемпіричні моделі, що дозволяють прогнозувати вплив зміни складу, вираженого через інтегральні параметри міжатомної взаємодії, на властивості стандартних марок феросплавів різних груп [8]:

а) хромисті феросплави (високо-, середньо- і низьковуглецевий ферохром);

б) марганцеві феросплави (високо-, середньо- і низьковуглецевий феромарганець), феросилікомарганець, марганець металевий;

в) сплави кремнію (феросиліцій всіх марок);

г) ферованадій, фероніобій, феробор, феротитан, феронікель.

Наявність баз даних і моделей по кожному переділу виробництва металопродукції дозволяє оперативно генерувати інструментальні засоби (підсистеми) для комплексного аналізу, прогнозування та оптимізації фізико-хімічних процесів; техніко-економічних показників технологій отримання металу (продуктивності, енергетичних і сировинних витрат), а також наскрізного аналізу процесів отримання високоякісної продукції на всіх переділах, аудиту підприємств і галузі в цілому за рахунок залучення сучасних досягнень академічної і галузевої науки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Приходько Э. В. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая, А. Ф. Хамхотко, Д. А. Степаненко // Днепропетровск: Пороги, 2013. – 344с.
2. От баз данных к базам знаний о свойствах металлургических шлаков /Тогобицкая Д.Н., Хамхотко А. Ф., Белькова А. И. [и др.] //Сб. н. т. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – Вып. 9. – 2004. – С. 168-175.
3. Использование базы вискозиметрических данных для расчета кристаллизационной способности металлургических шлаков / [Тогобицкая Д. Н. , Хамхотко А. Ф., Лихачев Ю. М. [и др.] //Сб. н. т. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – Вып.18. – 2008. – С. 200-209.
4. Інформаційно-аналітична система для дослідження кристалізаційної здатності металургійних шлаків / Д.М. Тогобицька, Д.О. Степаненко, А.Ф. Хамхотко А. Ф. [та ін.] //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ. – Випуск 2(67). – 2010. – С. 74-80.
5. Тогобицкая Д.Н. Информационное обеспечение и прогноз свойств железорудных материалов / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотко, Л.А. Головкин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып. 2. – Киев: Наукова думка. –1998. – С. 93-100.
6. Степаненко Д. А. К обоснованию выбора рационального шлакового режима в металлургических процессах / Д. А. Степаненко, О. Волкова, Х.-П. Хеллер, П. И. Оторвин, Д. А. Чебыкин // Сталь, №9, 2017. – с. 2 – 5.
7. Тогобицкая Д.Н. База данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали / Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С. В. Греков, И.Р. Снигура, Ю.М. Лихачев, Л. А. Головкин // Сб.н.тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – 2017. – Вып. 31. – С.150-165.
8. Togobitskaya D.N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit / Togobitskaya D.N., Pipyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. // Metallurgist. – 2019. Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122.

REFERENCES

1. Prihodko E. V. Prognozirovanie fiziko-himicheskikh svoystv oksidnykh sistem / E. V. Prihodko, D. N. Togobitskaya, A. F. Hamhotko, D. A. Stepanenko // Dnepropetrovsk: Porogi, 2013. – 344 p.
2. Ot baz dannykh k bazam znaniy o svoystvakh metallurgicheskikh shlakov /Togobitskaya D.N., Hamhotko A. F., Belkova A. I. [i dr.] //Sb. n. t. IChM «Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii». – Dnepropetrovsk. – Vyip. 9. – 2004. – P. 168-175.
3. Ispolzovanie bazyi viskozimetricheskikh dannykh dlya rascheta kristallizatsionnoy sposobnosti metallurgicheskikh shlakov / [Togobitskaya D. N. , Hamhotko A. F., Lihachev Yu. M. [i dr.] //Sb. n. t. IChM «Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii». – Dnepropetrovsk. – Vyip.18. – 2008. – P. 200-209.
4. Informatsiyno-analitichna sistema dlya doslidzhennya kristallizatsiynoyi zdatsnosti metalurgiynih shlakiv / D.M. Togobitska, D.O. Stepanenko, A.F. Hamhotko A. F. [ta In.] //Sistemni tehnologiiyi. Reglionalniy mlzhvuzivskiy zblrnik naukovich prats. – Dnlpropetrovsk. – Vipusk 2(67). – 2010. – P. 74-80.
5. Togobitskaya D.N. Informatsionnoe obespechenie i prognoz svoystv zhelezorud-nyih materialov / D.N. Togobitskaya, A.F. Hamhotko, L.A. Golovko // Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii. – Vyip. 2. – Kiev: Naukova dumka. –1998. – P. 93-100.
6. Stepanenko D. A. K obosnovaniyu vyibora ratsionalnogo shlakovogo rezhima v metallurgicheskikh protsessah / D. A. Stepanenko, O. Volkova, H.-P. Heller, P. I. Otorvin, D. A. Chebyikin // Stal, #9, 2017. – с. 2 – 5.

7. Togobitskaya D.N. Baza dannyih modeli dlya ekspertnoy otsenki effektivnosti ispolzovaniya ferrosplavov pri proizvodstve stali / D.N. Togobitskaya, V.P. Pipyuk, A.F. Petrov, S. V. Grekov, I.R. Snigura, Yu.M. Lihachev, L. A. Golovko // Sb.n.tr. IChM «Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii». – Dnepropetrovsk. – 2017. – Vyip. 31. – S.150-165.
8. Togobitskaya D.N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit / Togobitskaya D.N., Pipyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. // Metallurgist. – 2019. Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122.

Received 05.01.2021.

Accepted 20.01.2021.

UDK 669.02/09:669:681.3.001.8

D.N. Togobitskaya, D.A. Stepanenko, A.I. Bel'kova, A.F. Petrov, Y.M. Lihachov

**DATABANK "METALLURGY" - AN INFORMATION BASIS
FOR PREDICTING THE PROPERTIES OF PHYSICAL AND
CHEMICAL SYSTEMS AND THEIR MELTS**

The Metallurgy data bank has been created at the Institute of Ferrous Metallurgy, systematic work is underway to create and develop an integrated knowledge base for end-to-end analysis of metal production based on modern information computer technologies. The greatest information capacity is possessed by databases on the properties of iron ore materials (database "Iron ore materials") and slag melts (database "Slag"), which are most in demand and are actively replenished. The "Iron ore materials" database contains information on the properties of more than 1200 compositions of various types of iron ore raw materials, including strength characteristics and high-temperature properties. The database "Slag" contains more than 500 documents containing information on the properties of more than 8000 compositions of slags and oxides for various purposes. The "Ferroalloys" database includes information from domestic and foreign authors on production, chemical composition and requirements for ferroalloys of various groups. At present, 35 passports have been entered into the database, which contain information (more than 200 compositions) about a complex of physicochemical, physical and thermophysical ferroalloys of a wide range: ferrochrome, ferrosilicon, ferromanganese, ferrovanadium, ferrotitanium, ferroniobium, ferronickel, ferrozirconium, ferromolybdenum, silicomanganese, etc. The presence in the Metallurgy data bank of databases and models for each redistribution of metal production allows you to quickly generate tools (subsystems) for complex analysis, forecasting and optimization of physical and chemical processes; technical and economic indicators of metal production technologies, as well as end-to-end analysis of the processes of obtaining high-quality products, audit of enterprises and the industry as a whole by attracting modern scientific achievements.

Keywords: databases, iron ore materials, slag, diagrams, ferroalloys, properties.

Тогобицька Дар'я Миколаївна – д.т.н., професор, зав. відділом фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Степаненко Дмитро Олександрович – к.т.н., старший науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Белькова Алла Іванівна – к.т.н., старший науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Петров Олександр Пилипович – науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Ліхачов Юрій Михайлович - науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Тогобицкая Дарья Николаевна – д.т.н., профессор, зав. отделом физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ.

Степаненко Дмитрий Александрович – к.т.н., старший научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ.

Белькова Алла Ивановна – к.т.н., старший научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ.

Петров Александр Филиппович – научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАНУ.

Лихачев Юрий Михайлович - научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины.

Togobitskaya Daria – Doctor of Technical Sciences Professor, Head of the Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Stepanenko Dmytro – PhD, Senior Researcher Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Bel'kova Alla – PhD, Senior Researcher Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Petrov Aleksandr – Researcher Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Lihachov Yurii – Researcher Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes, Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

ЗМІСТ / CONTENTS

<i>Пройдак Ю, Селівьорстова Т., Селівьорстов В.</i> Пам'яті надзвичайної людини	3
<i>Андрюхін Р.П., Молчанов Л.С., Синегін Є.В.</i> Фізичне моделювання гомогенізації сталі при фінішному легуванні у виливниці <i>Andriukhin R., Molchanov L., Synehin Y.</i> Physical modeling of steel homogenization during finish alloying in the mold	10
<i>Бабаченко О.І., Подольський Р.В.,</i> <i>Дьоміна К.Г., Кононенко Г.А., Сафронова О.А.</i> Фізичне і математичне моделювання гарячої пластичної деформації лабораторних злитків сталей для осей <i>Babachenko O.I., Podolskyi R.V.,</i> <i>Domina K.G., Kononenko G.A., Safronova O.A.</i> Physical and mathematical modeling of hot plastic deformation of laborator steel ingoles for axes.....	19
<i>Журба А.О.</i> Дослідження впливу кристалічних решіток на фрактальні характеристики матеріалів <i>Zhurba A.</i> Investigation of the influence of crystalline lattices on fractal characteristics of materials	33
<i>Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Іващенко О.В.</i> Розподілені алгоритми розв'язку прикладних задач в екстремальній постановці <i>Ivashchenko V., Shvachych G., Ivashchenko O.</i> Distributed algorithms for solving applied problems in an extreme setting.....	44
<i>Кусий Я.М., Личак О.В.</i> Вплив елементів конструкції виливка на еволюцію технологічних дефектів <i>Kusyi Ya., Lychak O.</i> Influence of design elements of the casting on the evolution of technological defects	56

Маліч М.Г.

Моделювання процесу дезінтеграції рудної породи
в барабанному млині з використанням методу скінчених елементів

Malich M.

Modeling of the process of disaggregation of ore rock
in a drum mill using the finished element method.....68

Мельянцеv П.Т., Лосіков О.М., Назарець В.С., Сидоренко В.К.

Підвищення післяремонтної довговічності насосів
підживлення аксіально-поршневих гідромашин

Melyantsov P., Losikov O., Nazarets V., Sidorenko V.

The increasing of post-repair durability of axial-piston hydraulic feed pumps.....79

Molchanov L., Arendach N., Synehin Y.

Study of the designs of bottom blowing devices
for oxidative blowing in teeming ladles

Молчанов Л.С., Арендач Н.А., Синегін Є.В.

Дослідження конструкції донних продувочних пристроїв
для окислювальної продувки у сталерозливних ковшах.....87

Молчанов Л.С., Голуб Т.С., Синегін Є.В., Семикін С.І.

Дослідження на фізичній моделі особливостей впливу запиленості
середовища на якісні показники газового, палаючого факелу

Molchanov L., Sinegin Ye., Golub T., Semykin S.

Investigations on the physical model of the peculiarities
of the influence of dust on the quality indicators of a gas burning torch96

Мороз Д.М.

Моделирование максимально параллельных
структур алгоритмов решения тепловых задач

Moroz D.

Modeling of maximally parallel structures
of algorithms for solving thermal problems109

Самсоненко А.А., Гануш В.І., Бергеман С.В.

Дослідження підшипників рідинного тертя робочих клітей 630 стану 550

Samsonenko A., Hanush V., Berheman S.

Research of fluid friction bearings of working stands 630 of rolling mill 550.....117

Stupak Yu., Khokhlova T.

On some aspects of the study of pulverized coal and
fuel mixtures combustion in a drop tube furnace

Ступак Ю.О., Хохлова Т.С.

Про деякі аспекти дослідження горіння пиловугільного палива
та паливних сумішей у вертикальній трубчастій печі..... 130

Timoshenko S., Nemtsev E., Gubinski M.

Energy efficient water-cooled elements for
foundry class electric arc steelmaking furnaces

Тимошенко С.М., Немцев Е.М., Губинський М.В.

Енергоефективні водоохолоджувані елементи
дугових сталеплавильних печей ливарного класу 138

Togobitskaya D., Stepanenko D.O., Bel'kova A.I., Petrov A.P., Lihachov Y.M.

Банк даних «металургія» – інформаційна основа прогнозування
властивостей фізико-хімічних систем та їх розплавів

Togobitskaya D., Stepanenko D., Bel'kova A., Petrov A., Lihachov Y.

Databank "metallurgy" - an information basis for predicting
the properties of physical and chemical systems and their melts..... 147

УДК 669

Андрюхін Р.П., Молчанов Л.С., Синегін Є.В. **Фізичне моделювання гомогенізації сталі при фінішному легуванні у виливниці**

Розглядається технологія фінішного легування сталі у виливницях при розливанні зверху та сифоном. Для знаходження оптимального місця введення легуючих у розплав по мірі наповнення виливниці було проведено 3 серії експериментів, за результатами яких визначали час повної гомогенізації барвника у рідині. Встановлено, що введення легуючих присадок на дзеркало металу у виливниці доцільно здійснювати після наповнення виливниці на третину незалежно від способу розливання.

Бібл. 12, іл. 5.

УДК 669

Андрюхін Р.П., Молчанов Л.С., Синегін Є.В. **Физическое моделирование гомогенизации стали при финишном легировании в изложнице**

Рассматривается технология финишного легирования стали в изложнице при разливке сверху и сифоном. Для нахождения оптимального места ввода легирующих в расплав по мере наполнения изложницы было проведено 3 серии экспериментов, по результатам которых определяли время полной гомогенизации красителя в жидкости. Установлено, что введение легирующих присадок на зеркало металла в изложнице целесообразно осуществлять после наполнения изложницы на треть независимо от способа разливки.

Библ. 12 ил. 5.

UDC 669

Andriukhin R., Molchanov L., Synehin Y. **Physical modeling of steel homogenization during finishing alloying in the mold**

The technology of finishing alloying of steel in a mold during casting from above and with a siphon is considered. To find the optimal place for introducing alloying agents into the melt as the mold was filled, 3 series of experiments were carried out, the results of which were used to determine the time of complete homogenization of the dye in the liquid. It has been established that the introduction of alloying additives on the metal mirror in the mold is expedient to carry out after filling the mold by one third, regardless of the casting method.

Bibl. 12, ill. 5.

УДК 621.771.294

Бабаченко О.І., Подольський Р.В., Дьоміна К. Г., Кононенко Г.А., Сафронова О.А. **Фізичне і математичне моделювання гарячої пластичної деформації лабораторних злитків сталей для осей**

Розроблено математичну модель розрахунку фізико-механічних властивостей сталі в процесі гарячої пластичної деформації. Отримано коефіцієнт подовження матеріалу з фактичним хімічним складом при температурі $1250 \pm 10^\circ\text{C}$, яка склав 0,32. При порівнянні значень навантаження, що було застосовано при ГПД в лабораторних умовах і отримано в результаті розрахунків з використанням розробленої моделі встановлено, що вони мають близькі значення ~ 45 МПа. Цим підтверджується адекватність отриманої моделі.

Бібл. 9, іл. 5, табл. 1

УДК 621.771.294

Бабаченко А.И., Подольский Р.В., Демина Е. Г., Кононенко А.А., Сафронова А.А. **Физическое и математическое моделирование горячей пластической деформации лабораторных слитков сталей для осей**

Разработана математическая модель расчета физико-механических свойств стали в процессе горячей пластической деформации. Получены коэффициент удлинения материала с фактическим химическим составом при температуре $1250 \pm 10^\circ\text{C}$, которая составила 0,32. При сравнении значений нагрузки, был применен при ГПД в лабораторных условиях и получены в результате расчетов с использованием разработанной модели установлено, что они имеют близкие значения ~ 45 МПа. Этим подтверждается адекватность полученной модели.

Библ. 9, ил. 5, табл. 1

UDC 621.771.294

Babachenko O., Podolskyi R., Domina K., Kononenko G., Safronova O. **Physical and mathematical modeling of hot plastic deformation of laboratory steel ingots for axes**

A mathematical model for calculating the physical and mechanical properties of steel in the process of hot plastic deformation has been developed. The coefficient of elongation of the material with the actual chemical composition at a temperature of $1250 \pm 10^\circ\text{C}$, which was 0.32. When comparing the values of the load that was applied to the GPA in the laboratory and obtained as a result of calculations using the developed model, it was found that they have close values of ~ 45 MPa. This confirms the adequacy of the obtained model.

Bibl. 9, ill. 5, table. 1

УДК 681.3.012:621.1

Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Іващенко О.В. **Розподілені алгоритми розв'язку прикладних задач в екстремальній постановці**

Для дослідження теплофізичних властивостей матеріалів за допомогою обернених методів було виведено відповідний клас математичних моделей. Процедура обробки математичних моделей зведена до екстремальної постановки, що дозволило розробити ефективні алгоритми розв'язування коефіцієнтних задач довільного порядку точності. Представлені результати розв'язування тестових задач на основі запропонованого підходу. Виведено додаткові умови, які дозволяють розділити досліджувану проблему на дві задачі: а) температурну; б) потокову. Перша з них дає можливість розв'язувати коефіцієнтну задачу на всьому заданому діапазоні зміни температури за допомогою управляючого параметра у вигляді коефіцієнта дифузії (модель 1); друга спрямована на визначення коефіцієнтів теплопровідності або теплоємності (модель 2). Дослідження математичних моделей 1 і 2 проводили із застосуванням методу прямих. Запропоновані моделі дозволяють розв'язувати задачі в екстремальних постановках. Для розв'язання заданих задач методами математичного моделювання розроблено пакет прикладних задач. Створення пакету було здійснено з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування. Процедура моделювання була реалізована на основі застосування багатопроцесорної обчислювальної системи. Пакет прикладних програм призначений для опрацювання теплофізичних експериментів оберненими методами.

Бібл. 12, іл. 2.

УДК 681.3.012:621.1

Іващенко В.П., Швачич Г., Іващенко Е.В. **Распределенные алгоритмы решения прикладных задач в экстремальной постановке**

Для исследования теплофизических свойств материалов с помощью обратных методов был выведен соответствующий класс математических моделей. Процедура обработки математических моделей сведена к экстремальной постановке, что позволило разработать эффективные алгоритмы решения коэффициентных задач произвольного порядка точности. Представлены результаты решения тестовых задач на основе предложенного подхода. Выведены дополнительные условия, которые позволяют разделить исследуемую проблему на две задачи: а) температурную; б) потоковую. Первая из них позволяет решать коэффициентную задачу на всем заданном диапазоне изменения температуры с помощью управляющего параметра в виде коэффициента диффузии; вторая направлена на определение коэффициентов теплопроводности или теплоемкости. Исследование математических моделей 1 и 2 проводилось на основе применения метода прямых. Предложенные модели позволяют решать задачи в экстремальных постановках. Для решения заданных задач методами математического моделирования разработан пакет прикладных задач. Создание пакета было выполнено с учетом требований объектно-ориентированного программирования. Процедура моделирования была реализована на основе применения многопроцессорной вычислительной системы. Пакет прикладных программ предназначен для обработки теплофизических экспериментов обратными методами.

Библ. 12, ил. 2.

UDK 681.3.012:621.1

Ivashchenko V.P., Shvachych G.G., Ivashchenko E.V. **Distributed algorithms for solving applied problems in an extreme setting**

A proper class of the mathematical models had been deduced for investigating the thermophysical properties of materials by means of reverse methods. Procedure for treatment of the mathematical models is reduced to the extreme statement that allowed to develop the effective algorithms for solving the coefficient problems of the optional order of accuracy. Results of the test problems solving on the basis of the offered approach had been presented. The additional conditions allowing to divide the problem to be investigated into two problems: a) temperature; b) the flow one had been considered. The first of them gives possibility to solve the coefficient problems within the whole given range of temperature changing with the control parameter in the form of diffusivity coefficient (model 1); the second one is in presented form of coefficients of heat conductivity or heat capacity (model 2). Investigation on the mathematical models 1 and 2 had been carried out with application of the straight lines' method. Model (1) for example, algebraic or functional, and model 2 gradient, allow to solve the coefficient problem in extreme statement. A package of applied problems had been developed for solving the coefficient problems of the heat-conducting with the methods of mathematical simulation. Creation of package had been carried out considering the requirements of the object-oriented programming. The simulation procedure had been realized on the basis of application of multiprocessor computer system. The package of applied programs is intended for treatment of thermophysical experiments with reverse methods.

Bibl. 12, il. 2.

УДК 39.311-06-05

Маліч М.Г. **Моделювання процесу дезінтеграції рудної породи в барабанному млині з використанням методу скінчених елементів**

Розглянуто особливості руху рудних матеріалів в барабанному млині. Розроблено математичну модель процесу подрібнення рудних матеріалів з позиції балансу енергетичних величин процесу руйнування. За використанням методу скінчених елементів показано, що виділений в будь-якому місці елемент завантаження

піддається деформації з боку сусідніх елементів завантаження (шматків руди) в умовах всебічного нерівнокомпонентного стиснення контактними силами. Проаналізовано вплив напрямку сил контактного тертя при стисненні на ефективність руйнування рудної маси. Данні сили суттєво впливають на появу максимальних зсувних (дотичних) напружень, які залежать від максимальних нормальних напружень, що виникають в шматках рудної породи. Показана можливість керування режимами навантаження для підвищення ефективності процесу подрібнення.

Бібл. 11, іл. 6.

УДК 39.311-06-05

Малич Н.Г. **Моделирование процесса дезинтеграции рудной породы в барабанной мельнице с использованием метода конечных элементов**

Аннотация. Рассмотрены особенности движения рудных материалов в барабанной мельнице. Разработана математическая модель процесса измельчения рудных материалов с позиции баланса энергетических величин процесса разрушения. За использованием метода конечных элементов показано, что выделенный в любом месте элемент загрузки подвергается деформации со стороны соседних элементов загрузки (кусков руды) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Проанализировано влияние направления сил контактного трения при сжатии на эффективность разрушения рудной массы. Данные силы существенно влияют на появление максимальных сдвиговых (касательных) напряжений, которые зависят от максимальных нормальных напряжений, возникающих в кусках рудной породы. Показана возможность управления режимами нагружения для повышения эффективности процесса измельчения.

Библ. 11, ил. 6.

UDC 39.311-06-05

Malich M. **Modeling of the process of disaggregation of ore rock in a drum mill using the finished element method**

Peculiarities of ore materials movement in a drum mill are considered. A mathematical model of ore materials grinding process in a drum ball mill is developed from the position of balance of energy quantities of destruction process: work of external force influence and value of internal potential energy of deformation of ore pieces. Using the finite element method, the analysis of the stress-strain state of the loading elements, the interaction of pieces of ore in the layer of particles under pressure under the condition of changes in shear and shock loads. The mathematical model allows to calculate the maximum loads in the loading elements (ore, spheres).

It is shown that the loading element selected anywhere is subject to deformation by the neighboring loading elements (pieces of ore) under conditions of comprehensive non-uniform component compression by contact forces. These forces determine the appearance of maximum shear (tangential) stresses, which depend on the maximum normal stresses occurring in the pieces of rock.

The results of modeling the stress-strain state of the loading elements confirmed that the use of wet grinding and dry grinding with incomplete loading creates more favorable conditions for shear compression of rock particles, which in turn leads to destructive tangential stresses exceeding the Coulomb strength. shear lines. There is a process of effective destruction of the rock, which in turn leads to a decrease in the energy consumption of the grinding process.

Bibl. 11, ill. 6.

УДК 629.7:658.512.2

Мельянцов П.Т., Лосіков О.М., Назарець В.С., Сидоренко В.К. **Підвищення післяремонтної довговічності насосів підживлення аксіально-поршневих гідромашин**

Розглядаються методи з відновлення роботоздатності насосів підживлення аксіально-поршневих гідромашин. Запропоновано механізм компенсації торцевого зазору в качаючому вузлі насоса підживлення, що значно збільшує післяремонтну довговічність відновлених насосів. Проведено лабораторні випробування експериментального насосу. Показано перевагу запропонованого методу ремонту в порівнянні з існуючими технологіями.

Бібл. 6, іл. 3, табл. 3.

УДК 629.7:658.512.2

Мельянцов П.Т., Лосиков А.М., Назарець В.С., Сидоренко В.К. **Повышение послеремонтной долговечности насосов подпитки аксиально-поршневых гидромашин**

Рассматриваются методы восстановления работоспособности насосов подпитки аксиально-поршневых гидромашин. Предложено механизм компенсации торцевого зазора в качающем узле насоса подпитки, что значительно увеличивает послеремонтную долговечность восстанавливаемых насосов. Проведено лабораторные испытания экспериментального насоса. Показано преимущество предложенного метода ремонта в сравнении с существующими технологиями.

Библ. 6, ил. 3, табл. 3.

UDC 629.7:658.512.2

Melyantsov P.T., Losikov O.M., Nazarets V.S., Sidorenko V.K. **The increasing of post-repair durability of axial-piston hydraulic feed pumps**

The methods for recovery of booster pumps of axial-piston hydraulic feed pumps are considered. The mechanism of compensation of the end clearance in the oscillating unit of the booster pump that significantly increases the post-repair durability of restored pumps is offered. Laboratory tests of the experimental pump were carried out. The advantage of the proposed method of repair in comparison with existing technologies is shown.

Ref. 6, ill. 3, tabl. 3.

УДК 669

Молчанов Л.С., Арендас Н.А., Синегін Є.В. **Дослідження конструкції донних продувочних пристроїв для окислювальної продувки у сталерозливних ковшах**

Розглянуто запропоновану авторами технологію окислювальної продувки сталі в сталерозливному ковші для отримання ультранизькоуглецевої сталі. Метою дослідження є визначення раціональної конструкції донних продувочних пристроїв для ефективного перемішування рідини. Розглянуто продувочні пристрої з круговим отвором, шпариною та ненаправленою пористістю. Встановлено порівняно високу ефективність продувочних пристроїв з ненаправленою пористістю, які суттєво зменшують час гомогенізації металу.

Бібл. 16, іл. 3, табл. 1.

УДК 669

Молчанов Л.С., Арендас Н.А., Синегін Є.В. **Исследование конструкции донных продувочных устройств для окислительной продувки в сталеразливочных ковшах**

Рассмотрена предложенная авторами технология окислительной продувки стали в сталеразливочном ковше для получения ультранизкоуглеродистой стали. Целью исследования является определение рациональной конструкции донных продувочных устройств для эффективного перемешивания жидкости. Рассмотрены продувочные устройства с круговым отверстием, щелью и ненаправленной пористостью. Установлено сравнительно высокая эффективность продувочных устройств с ненаправленной пористостью, которые существенно уменьшают время гомогенизации металла.

Библ. 16, ил. 3, табл. 1.

UDC 669

Molchanov L., Arendach N., Synehin Y. **Study of the designs of bottom blowing devices for oxidative blowing in teeming ladles**

The technology of oxidative blowing of steel in a teeming ladle for obtaining ultra-low carbon steel proposed by the authors is considered. The aim of the study is to determine the rational design of bottom blowing devices for efficient mixing of liquid. Blowing devices with a circular hole, a slit and unidirectional porosity are considered. A relatively high efficiency of blowing devices with unidirectional porosity, which significantly reduces the mixing time of the metal, has been established.

УДК 669.184

Молчанов Л.С., Синегін Є.В., Голуб Т. С., Семікін С. І. **Дослідження на фізичній моделі особливостей впливу запиленості середовища на якісні показники газового, палаючого факела**

У роботі наведені результати дослідження на фізичній моделі, що імітує палаючий факел в запиленому середовищі, шляхом введення твердих порошків різних речовин, на якісні показники горіння факела: візуальні і теплопередачу випромінюванням, як основного способу теплопередачі від полум'я. Досліджено подачу в палаючий факел порошків хлориду натрію, оксидів заліза, кремнію та алюмінію, чистих порошків заліза, кремнію та алюмінію, сажі і графіту. Встановлено, що введення різних компонентів в факел з температурою нижче, ніж температура факела, навіть при можливому візуальному збільшенні яскравості характеристик, що зокрема встановлено при введенні хлориду натрію або порошку заліза, сприяють значному зниженню теплопередачі від факела за рахунок відбору тепла на нагрівання і згорання частинок, що вводяться

Бібл. 7, іл. 5.

УДК 669.184

Молчанов Л.С., Синегін Є.В., Голуб Т. С., Семікин С. И. **Исследования на физической модели особенностей влияния запыленности среды на качественные показатели газового, горящего факела**

В работе приведены результаты исследования на физической модели, имитирующей горящий факел в запыленной среде путем ввода твердых порошков различных веществ на качественные показатели горения факела: визуальные и теплопередачу излучением, как основного способа теплопередачи от пламени. Исследована подача в горящий факел порошков хлорида натрия, оксидов железа, кремния и алюминия, чистых порошков железа, кремния и алюминия, сажи и графита. Установлено, что ввод различных компонентов в факел с температурой ниже,

чем температура факела, даже при возможном визуальном увеличении яркостных характеристик, в частности при вводе хлорида натрия или порошка железа, способствуют значительному снижению теплопередачи от факела за счет отбора тепла на нагрев и сгорание вводимых частиц.

Библ. 7, ил. 5.

UDK 669.184

Molchanov L.S., Sinegin Ye.V., Golub T.S., Semykin S.I. **Investigations on the physical model of the peculiarities of the influence of dust on the quality indicators of a gas burning torch**

The paper presents the results of a study on a physical model simulating a burning torch in a dusty environment, by introducing to the torch of solid powders of various substances, on the quality indicators of torch combustion: visual and heat transfer by radiation, as the main method of heat transfer from a flame. The feeding into a burning torch of powders of sodium chloride, oxides of iron, silicon and aluminum, pure powders of iron, silicon and aluminum, carbon black and graphite were investigated. It was established that the introduction of various components into the torch with a temperature lower than the torch temperature, even with a possible visual increase in brightness characteristics, in particular, when sodium chloride or iron powder were introduced, contribute to a significant decrease in heat transfer from the torch due to heat absorption for heating and combustion of the introduced particles.

Bibl. 7, ill. 5.

УДК 681.3.012:621.1

Мороз Д.М. **Моделирование максимально параллельных структур алгоритмов решения тепловых задач**

В данной работе на примере решения тепловых задач математической физики показана возможность создания максимально параллельной формы вычислительных алгоритмов решения тепловых задач и их отображение на архитектуру многопроцессорных систем. Показано, что эффективным средством исследования задач тепло- и массообмена в металлургическом производстве можно считать применение технологий параллельных вычислений на распределенных системах кластерного типа, которые имеют сравнительно небольшую стоимость и достаточно легко масштабируются как по количеству процессоров, так и по объему оперативной памяти. Распараллеливание систем трехдиагональной структуры реализовывалось численно-аналитическим подходом, что предопределило их максимально параллельную алгоритмическую форму. Такой подход способствует минимально возможное время реализации разработанного алгоритма на параллельных вычислительных системах. Кроме этого, во время параллельных вычислений арифметических выражений, в разработанном алгоритме погрешность выходных данных отделяется от операций округления. Такой подход способствует минимально возможное время реализации разработанного алгоритма на параллельных вычислительных системах.

Библ. 12.

УДК 681.3.012:621.1

Мороз Д.М. **Моделювання максимально паралельних структур алгоритмів розв'язання теплових задач**

У даній роботі на прикладі рішення теплових задач математичної фізики показана можливість створення максимально паралельної форми обчислювальних алгоритмів розв'язання теплових задач і їх відображення на архітектуру багатопроцесорних систем. Показано, що ефективним засобом дослідження задач тепло- і масообміну в металургійному виробництві можна вважати застосування технологій паралельних обчислень на розподілених системах кластерного типу, які мають порівняно невелику вартість і досить легко масштабуються як за кількістю процесорів, так і за обсягом оперативної пам'яті. Розпаралелювання систем трьохдіагональної структури реалізовувалося числово-аналітичним підходом, що зумовило їх максимально паралельну алгоритмічну форму. Такий підхід сприяє мінімально можливий час реалізації розробленого алгоритму на паралельних обчислювальних системах. Крім цього, під час паралельних обчислень арифметичних виразів, в розробленому алгоритмі похибка вихідних даних відділяється від операцій округлення. Такий підхід сприяє мінімально можливий час реалізації розробленого алгоритму на паралельних обчислювальних системах.

Бібл. 12.

UDK 681.3.012:621.1

Moroz D.M. **Modeling of maximally parallel structures of algorithms for solving thermal problems**

In this paper, using the example of solving thermal problems of mathematical physics, the possibility of creating the most parallel form of computational algorithms for solving thermal problems and their mapping to the architecture of multiprocessor systems is shown. It is shown that an effective tool for studying heat and mass transfer problems in metallurgical production can be considered the use of parallel computing technologies on distributed cluster systems, which have a relatively low cost and are fairly easily scalable both in the number of processors and in the amount of RAM. Parallelization of systems of tridiagonal structure was implemented by a numerical-analytical approach, which predetermined their maximally parallel algorithmic form. This approach is facilitated by the minimum possible implementation time of the developed algorithm on parallel computing systems. In addition, during parallel calculations of arithmetic expressions, the developed algorithm separates the error of the output data from rounding operations. This

approach is facilitated by the minimum possible implementation time of the developed algorithm on parallel computing systems.

Bibl. 12.

УДК 669.02

Самсоненко А. А., Гануш В. І., Бергеман С. В. **Дослідження підшипників рідинного тертя робочих клітей 630 стану 550.**

Розглянуто експлуатацію підшипників рідинного тертя станів 630. Проведено математичне моделювання для визначення енерго-силових параметрів прокатки швелеру №14. Досліджено коефіцієнти тертя в підшипнику рідинного тертя кліті 630. Визначено параметри зносу втулки та вкладиша підшипника. Запропоновано удосконалення конструкції ущільнень з використанням V-подібних манжет.

Бібл. 7, іл. 4, табл. 2.

УДК 669.02

Samsonenko A., Hanush V., Berheman S. **Research of fluid friction bearings of working stands 630 of rolling mill 550.**

The operation of fluid friction bearings of mills 630 is considered. Mathematical modeling for determination of energy-force parameters of channel rolling №14 is carried out. The coefficients of friction in the bearing of liquid friction of the cage 630 are investigated. The parameters of wear of the sleeve and the bearing liner are determined. It is proposed to improve the design of seals using V-shaped cuffs.

Bibl. 7, ill. 4, table. 2.

УДК 669.162.22+267.4

Ступак Ю.О., Хохлова Т.С. **Про деякі аспекти дослідження горіння пилувугільного палива та паливних сумішей у вертикальній трубчастій печі**

Розглянуто схему установки для дослідження процесу горіння пилувугільного палива (ПВП) в умовах, що подібні до умов нагріву та займання часток вугілля в потоці дуття доменної печі та їх подальшої газифікації у фурменому осередку. Сформульовані вимоги щодо забезпечення надійності моделювання, проаналізовані способи оцінки повноти згорання і запропоновано спосіб її розрахунку для двокомпонентних паливних сумішей. Формула, що запропонована, може використовуватися для оцінки повноти згорання сумішей вугілля різної якості, а також ПВП з додаванням торфу та інших палив, що містять вуглець.

Бібл. 18, іл. 3, табл. 3

УДК 669.162.22+267.4

Ступак Ю.А., Хохлова Т.С. **О некоторых аспектах исследования горения пылеугольного топлива и топливных смесей в вертикальной трубчатой печи**

Рассмотрена схема установки для исследования процесса горения пылеугольного топлива (ПУТ) в условиях, подобных условиям нагрева и воспламенения частиц угля в потоке дутья доменной печи и их дальнейшей газификации в фурменном очаге. Сформулированы требования по обеспечению надежности моделирования, проанализированы способы оценки полноты сгорания и предложен способ ее расчета для двухкомпонентных топливных смесей. Предложенная формула может использоваться для оценки полноты сгорания смесей углей разного качества, а также ПУТ с добавлением торфа и других топлив, содержащих углерод.

Библ. 18 ил. 3, табл. 3

UDK 669.162.22+267.4

Yu. Stupak, T. Khokhlova. **On some aspects of the study of pulverized coal and fuel mixtures combustion in a drop tube furnace**

We have considered the scheme of the installation to study the process of pulverized coal (PC) combustion in conditions similar to the conditions of heating and ignition of coal particles in the blast flow of the blast furnace and their subsequent gasification in the raceway. We have formulated the basic requirements for ensuring the reliability of modelling, methods for evaluating combustion efficiency are analyzed, and a method for calculating it for two-component fuel mixtures is proposed. The proposed formula can be used to estimate the combustion completeness of coal mixtures of different quality, as well as PC with the addition of peat and other fuels containing carbon.

Bibl. 18 ill. 3, tab. 3

УДК 621.365.22

Тимошенко С.Н., Немцев Э.Н., Губинский М.В. **Энергоэффективные водоохлаждаемые элементы дуговых сталеплавильных печей литейного класса**

На основе численного моделирования теплообмена излучением в рабочем пространстве ДСП, с учетом вместимости, коэффициента формы ванны, продолжительности технологического периода плавки, получено

уравнение множественной регрессии для расчета мощности потерь теплоты с водой. Разработаны трехрядные водоохлаждаемые стеновые панели с пространственной структурой, которые снижают потери теплоты на 14 % в сравнении с двухрядными. Обоснована оценка оптимальной относительной охлаждаемой поверхности рабочего пространства ДСП, обеспечивающей экономию огнеупоров до 25-30 %.

Библ. 9, илл. 5, табл. 1

УДК 621.365.22

Тимошенко С.М., Немцев Е.М., Губинский М.В. **Енергоефективні водоохолоджувані елементи дугових сталеплавильних печей ливарного класу**

На основі чисельного моделювання теплообміну випромінюванням в робочому просторі ДСП, з урахуванням місткості, коефіцієнта форми ванни, тривалості технологічного періоду плавки, отримано рівняння множинної регресії для розрахунку потужності втрат теплоти з водою. Розроблено трьохрядні водоохолоджувані стінові панелі з просторовою структурою, які знижують втрати теплоти на 14% в порівнянні з дворядними. Обґрунтовано оцінку оптимальної відносної охолоджувальної поверхні робочого простору ДСП, що забезпечує економію вогнетривів до 25-30%.

Бібл. 9, іл. 5, табл. 1

UDC 621.365.22

Timoshenko S.M., Nemtsev E.M., Gubinski M.V. **Energy efficient water-cooled elements for foundry class electric arc steelmaking furnaces**

On the basis of numerical modeling of heat exchange by radiation in the EAF working space, taking into account capacity, bath shape factor, duration of technological period of heat, a multiple regression equation for power of heat loss with cooling water was obtained. Three-row water-cooled wall panels with a spatial structure are elaborated, which provide a decrease in heat loss by 14 %, in comparison with two-row ones. Estimates of optimal relative cooled surface of the EAF working space, providing refractory savings up to 25-30%, are substantiated.

Bibl. 9, fig. 5, tab. 1

УДК 669.02/09:669:681.3.001.8

Д.М. Тогобицька, Д.О. Степаненко, А.І. Белькова, А.П. Петров, Ю.М. Ліхачев **Банк даних «металургія» - інформаційна основа прогнозування властивостей фізико-хімічних систем та їх розплавів**

В рамках банку даних «Металургія» створені і постійно розвиваються бази даних «Залізорудні матеріали», «Шлак» і «Ферросплави». База даних «Залізорудні матеріали» містить відомості про властивості більше 1200 складів різних видів залізорудної сировини. Описана структура бази експериментальних фізико-хімічних даних про властивості шлакових і оксидних розплавів «Шлак». База даних «Ферросплави», включає інформацію про виробництво, хімічний склад і вимоги, що пред'являються до ферросплавів різних груп. Дані баз даних використовуються при розробці моделей для прогнозування фізико-хімічних властивостей оксидних і металевих систем, а також в якості вихідних параметрів при математичному, фізико-хімічному та фізичному методах моделювання процесів, що протікають при взаємодії в системі «метал-шлак».

Бібл. 8, іл. 6.

УДК 669.02/09:669:681.3.001.8

Д.Н. Тогобицкая, Д.А. Степаненко, А.И. Белькова, А.Ф. Петров, Ю.М. Лихачев **Банк данных «металлургия» - информационная основа прогнозирования свойств физико-химических систем и их расплавов**

В рамках банка данных «Металлургия» созданы и постоянно развиваются базы данных «Железородные материалы», «Шлак» и «Ферросплавы». База данных «Железородные материалы» содержит сведения о свойствах более 1200 составов различных видов железорудного сырья. Описана структура базы экспериментальных физико-химических данных о свойствах шлаковых и оксидных расплавов «Шлак». База данных «Ферросплавы», включает информацию о производстве, химический состав и требованиях, предъявляемых к ферросплавам различных групп. Данные баз данных используются при разработке моделей для прогнозирования физико-химических свойств оксидных и металлических систем, а также в качестве исходных параметров при математическом, физико-химическом и физическом методах моделирования процессов, протекающих при взаимодействии в системе «металл-шлак».

Библ. 8, ил. 6.

UDK 669.02/09:669:681.3.001.8

D.N. Togobitskaya, D.A. Stepanenko, A.I. Bel'kova, A.F. Petrov, Y.M. Lihachov **Databank "metallurgy" - an information basis for predicting the properties of physical and chemical systems and their melts**

Databases "Iron Ore Materials", "Slag" and "Ferroalloys" have been created and are constantly developing within the Metallurgy database. The database "Iron ore materials" contains information about the properties of more than 1,200 compositions of different types of iron ore. The structure of the database of experimental physicochemical data on the properties of slag and oxide melts "Slag" is described. The "Ferroalloys" database includes information on production,

chemical composition and requirements for ferroalloys of different groups. Databases are used in the development of models for predicting the physicochemical properties of oxide and metal systems, as well as as initial parameters for mathematical, physicochemical and physical methods of modeling the processes occurring in the interaction in the system "metal-slag".

Lit. 8, ill. 6.

УДК 530.1

Журба А.О. **Дослідження впливу кристалічних решіток на фрактальні характеристики матеріалів.**

В роботі були досліджені природні та комп'ютерні кристалічні та квазікристалічні фрактальні поверхні. Для кожної поверхні було обчислено фрактальну розмірність та побудовано фрактальне розподілення. В ході досліджень було виявлено, що фрактальні розподілення майже для всіх видів кристалічних та квазікристалічних поверхонь мають багатомодальний розподіл і широкий розкид значень фрактальної розмірності, який вказує на складні зображення. Фрактальне розподілення кожної із побудованих поверхонь має кількість мод, яка співпадає з порядком симетрії.

Бібл. 4, іл. 11, табл. 4.

УДК 530.1

Журба А.А. **Исследование влияния кристаллических решеток на фрактальные характеристики материалов.**

В работе были исследованы природные и компьютерные кристаллические и квазикристаллические фрактальные поверхности. Для каждой поверхности была вычислена фрактальная размерность и построено фрактальное распределение. В ходе исследований было обнаружено, что фрактальные распределения почти для всех видов кристаллических и квазикристаллических поверхностей имеют многомодальное распределение и широкий разброс значений фрактальной размерности, который указывает на сложные изображения. Фрактальное распределение каждой из построенных поверхностей имеет количество мод, которое совпадает с порядком симметрии.

Библ. 4, ил. 11, табл. 4.

UDC 530.1

Zhurba A.A. **Investigation of the influence of crystalline lattices on fractal characteristics of materials.**

In the work, natural and computer crystalline and quasi-crystalline fractal surfaces were investigated. For each surface, fractal dimension was calculated and fractal distribution was constructed. During the research, it has been found that fractal distributions almost for all types of crystalline and quasi-crystalline surfaces have a multimodal distribution and a wide spread of fractal dimension values, which indicates complex images. Fractal distribution of each of the built surfaces has a number of mods that coincides with the order of symmetry.

Bible 4, ill. 11, tab. 4.

УДК 621.9.015:621.9.019

Кусий Я.М., Личак О.В. **Вплив елементів конструкції виливка на еволюцію технологічних дефектів**

Формування великої кількості властивостей заготовок під час заливання та кристалізації рідкого розплаву вимагає використання ефективних критеріїв комплексної оцінки деградації матеріалу при формоутворенні виливків. Запропоновано метод LM-твердості та критерій технологічної пошкоджуваності для аналізу структурних змін при виготовленні литих заготовок. За ступенем розсіювання характеристик твердості матеріалу визначається його схильність до формування технологічних дефектів на стадії створення виробу його життєвого циклу. Показано доцільність використання розробленої методики при аналізі впливу розміщення конструктивних елементів виливка із алюмінієвого сплаву на прогнозування розвитку структурних дефектів і неоднорідностей у матеріалі виробу.

Бібл. 18, іл. 3, табл. 1.

УДК 621.9.015:621.9.019

Кусый Я.М., Лычак О.В. **Влияние элементов конструкции отливки на эволюцию технологических дефектов**

Формирование большого количества свойств заготовок во время заливки и кристаллизации жидкого расплава требует использования эффективных критериев комплексной оценки деградации материала при формообразовании отливок. Предложен метод LM-твердости и критерий технологической повреждаемости для анализа структурных изменений при изготовлении литых заготовок. По степени рассеивания характеристик твердости материала определяется его склонность к формированию технологических дефектов на стадии создания изделия его жизненного цикла. Показана целесообразность использования разработанной методики при анализе влияния размещения конструктивных элементов отливки из алюминиевого сплава на прогнозирование развития структурных дефектов и неоднородностей в материале изделия.

Библ. 18, ил. 3, табл. 1.

UDK 621.9.015:621.9.019

Kusyi Ya., Lychak O. **Influence of design elements of the casting on the evolution of technological defects**

The formation of a blanks properties during pouring and crystallization of the liquid melt requires to use of effective criterion for a comprehensive assessment of the material degradation during the formation of castings. It was proposed to use the method of LM-hardness and the criterion of technological damageability for the analysis of structural changes during the castings manufacturing. Using LM-hardness allows to estimate the tendency of the material to form technological defects at the stage of desuign and technological pre-production. The expediency of using the developed technique for the analysis of the influence of the placement of structural elements of the aluminum alloy casting on the prediction of the development of structural defects and inhomogeneities in the product material is represent.

Ref. 18, ill. 3, tabl. 1.

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

НАУКОВІ ВІСТІ

№ 24

Технічна редакція: Власова Т.Є.
Комп'ютера верстка: Селівьорстова Т.В.

Здано в набір 03.02.21. Підписано до друку 02.03.21.
Формат А4. Гарнітура Шкільна. Тираж 300. Зам. № 06/21.

Національна металургійна академія України
49005, Дніпро
st@nmetau.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684