

**ЯВИЩЕ ТЕРМОДИФУЗІЇ В РІДКИХ І ТВЕРДИХ МЕТАЛАХ
У РОБОТАХ О. М. СКРЕБЦОВА**

У 2024 році відзначається 100-річний ювілей ученого зі світовим ім'ям, нашого земляка, професора Олександра Михайловича Скребцова. Крім досліджень застосування радіоактивних ізотопів у металургії, розвитку теорії рідкого стану металевих розплавів значну увагу він приділив явищу термодифузії в рідких і твердих металах. Цю роботу присвячено аналізу цієї частини наукової спадщини О. М. Скребцова. Рух атомів під дією градієнта температури (термодифузія) відбувається під час різних природних явищ і в багатьох технологічних процесах. Однак при вивченні рушійних сил і механізмів термодифузії, до тепер, як правило, переважав академічний підхід. Це дозволило досить добре розвинути теорію термодифузії стосовно газів, розчинів солей і твердих металів. Ця стаття присвячена аналізу досліджень, спрямованих на можливість практичного використання цього явища для підвищення ресурсу деталей, що працюють в умовах температурного градієнта, та оптимізації процесів, що протікають з градієнтом температури. Такі процеси відбуваються в металургійних агрегатах, супроводжують біметалеве лиття, зварювання, наплавлення тощо. На основі аналізу наявних у літературі експериментальних даних описано встановлений зв'язок між теплою термодифузії та співвідношенням атомних радіусів елементів, що дифундують, R_d , і основного металу R_b . Показано принципову можливість використання термодифузії для керування процесами десульфурзації рідкого чавуну та створення захисних покриттів на деталях із сірого чавуну під час їх експлуатації при високих температурах.

Ключові слова: градієнт концентрації, градієнт температури, термодифузія, тепловий ефект термодифузії, температура.

L. Dan, L. Trofimova. The phenomenon of thermodiffusion in liquid and solid metals in the works of O. M. Skrebtsov. The year 2024 marks the 100th anniversary of a world-renowned scientist, our countryman, Professor Olexandr Mikhailovich Skrebtsov. In addition to research on the use of radioactive isotopes in metallurgy and the development of the theory of the liquid state of metal melts, he paid considerable attention to the phenomenon of thermodiffusion in liquid and solid metals. This paper is devoted to the analysis of this part of the scientific heritage of O. M. Skrebtsov. The movement of atoms under the action of a temperature gradient (thermodiffusion) occurs during various natural phenomena and in many technological processes. However, when studying the driving forces and mechanisms of thermodiffusion, as a rule, the academic approach prevailed. This allowed the theory of thermodiffusion to be well enough developed concerning gases, salt solutions, and solid metals. This article is focused on the analysis of research aimed at the possibility of practical use of this phenomenon to improve the service life of parts operating under conditions of a temperature gradient and optimize processes occurring with a temperature gradient. Such processes occur in metallurgical units, accompanying bimetallic casting, welding, surfacing, etc. Based on the analysis of the experimental data available in the literature, a relationship between the heat of thermodiffusion and the ratio of the atomic radii of the diffusing elements, R_d , and the base metal, R_b , was found. The fundamental possibility of using thermodiffusion for controlling the desulfurization processes in liquid cast iron and

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0002-1954-4871, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

creating protective coatings on gray cast iron parts during their operation at high temperatures was also shown.

Key words: *concentration gradient, temperature gradient, thermodiffusion, heat of transfer for thermodiffusion, temperature.*

Постановка проблеми. Після відкриття Людвігом ефекту термодифузії в газах [1], Соре в сольових розчинах [2], а Тіндалом – явища руху дрібних твердих частинок у газі під дією градієнта температури [3] минуло вже понад 160 років. У роботі [4] наведено аналіз еволюції уявлень про це явище та його практичне використання. Якщо на початковому етапі йшлося про переміщення атомів у полі градієнта температури в рідкому і газоподібному середовищі, то згодом описуване явище було виявлено й описано в плазмі [5, 6], а також у твердих тілах на макро- і мікrorівнях [7-14]. З появою можливості здійснення експериментів у космічному просторі було проведено дослідження термодифузії в умовах зниженої гравітації [15, 16]. Результати протікання дифузійного поділу елементів були виявлені під час протікання геологічних процесів [17].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Крім суто наукового інтересу, явище термодифузії має і практичне значення. Воно вже давно широко використовується для розділення ізотопів [18], паяння, зварювання і поверхневого зміцнення металів, при отриманні біметалевих виливків [19-21]. Крім того, в роботах [22, 23] показано роль термодифузії в процесах кристалізації рідких металів.

При цьому звертається увага на те, що під час металургійних процесів у плавильних агрегатах, у ливарному виробництві, при роботі металургійного та енергетичного обладнання, двигунів внутрішнього згоряння виникають значні температурні градієнти – змінні, що змінюються в часі за певними законами, або постійні протягом тривалого часу. За таких умов термодифузія елементів може суттєво впливати на перебіг процесів і структурних перетворень, більшою чи меншою мірою впливаючи на працездатність деталей.

Тому аналіз цього явища стосовно описаного переліку процесів і деталей становить значний інтерес.

Мета статті – аналіз можливостей застосування законів термодифузії до опису металургійних та суміжних процесів.

Виклад основного матеріалу.

Термодифузія у твердому чавуні. Для повного опису термодифузії в бінарній системі прийнято розглядати чотири потоки: а) атомів розчинника; б) розчиненої речовини; в) вакансій; г) енергії (тепла) [8, 23]. На практиці, однак, розрахунки зазвичай обмежуються більш простим випадком двох потоків – розчиненої речовини (j) і тепла (q). На думку авторів [24], таке спрощення справедливе для бінарних розчинів.

Якщо спочатку вважати, що вміст домішок у всіх точках зразка однаковий ($\text{grad}C = 0$), то під дією градієнта температури виникає потік речовини (j_i). Це призводить до виникнення градієнта концентрації і зустрічного дифузійного потоку, який збільшується до тих пір, поки не врівноважить термодифузійний рух атомів. В результаті встановлюється стаціонарний стан, коли повне переміщення речовини відсутнє (тепловий потік зберігається). Наприклад, для розведеного розчину в [7, 25] показано наступне:

$$\frac{dC}{dX} = -\left(\frac{C \cdot Q^*}{R \cdot T^2}\right) \cdot \frac{dT}{dX}, \quad (1)$$

де:

$\frac{dC}{dX}$ і $\frac{dT}{dX}$ – відповідно, градієнт концентрації та температури;

C – концентрація дифундуючої речовини, молярні долі;

R – універсальна газова константа, кДж/моль·град;

T – температура, К;

Q^* – теплота переносу термодифузії, кДж/моль.

Автори [7, 25] характеризують величину Q^* як відношення теплового потоку до потоку речовини за відсутності градієнта температури:

$$Q^* = \left(\frac{q}{j}\right)_{\text{grad}T=0}.$$

Коли $Q^* > 0$, концентрація зростає на холодному кінці, а коли $Q^* < 0$ – на гарячому.

У більш складних задачах з багатьма потоками, наприклад, пов'язаних з термодифузією елементів в промислових сталях і чавунах, аналітичне визначення теплоти термодифузії є складним.

Термодифузію елементів у сірому чавуні експериментально досліджували в роботі [26]. Зразки довжиною 150 мм вирізали з конструктивних частин термічної печі після 1 року її експлуатації. Під час експлуатації гаряча частина зразків перебувала при температурі 800-850°C, а холодна – при температурі 150-200°C. Тривалий період витримки металу за таких умов дозволив стверджувати про настання стаціонарного стану. Отримані дані про перерозподіл C, Si, Mn, S і P лягли в основу розрахунку величин теплоти перенесення під час термодифузії цих елементів.

Для розрахунку значення Q^* цих елементів у чавуні за методикою [7, 25] рівняння (1) було перетворено наступним чином:

$$\frac{Q^*}{R} = \frac{d \ln C}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \approx \frac{\Delta \ln C}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}. \quad (2)$$

При розрахунку значень Q^* автори [26] припустили лінійний розподіл температури по довжині деталей під час експлуатації і побудували залежність величини $\ln C$ від $1/T$. Тангенс кута нахилу лінії, як впливає з рівняння (2), дорівнює величині Q^*/R .

За експериментальними даними, використовуючи значення тангенса кута нахилу прямих до осей координат, автори [26] розраховували значення Q^* для різних елементів. Виявилось, що для C, Si, Mn, S і P залежність $\ln C - 1/T$ лінеаризується у вигляді трьох відрізків, що відповідають ділянкам зразка довжиною ~50 мм на гарячому, холодному кінцях і в його середній частині. Таким чином, значення Q^* виявилось різним для всіх досліджуваних елементів для різних температур [26, 27]. Привертає увагу той факт, що на відміну від концентраційної дифузії з підвищенням температури абсолютне значення теплоти термодифузії для C, Si, Mn і P зменшується (рисунки). Для S виявлено протилежну залежність (рисунок).

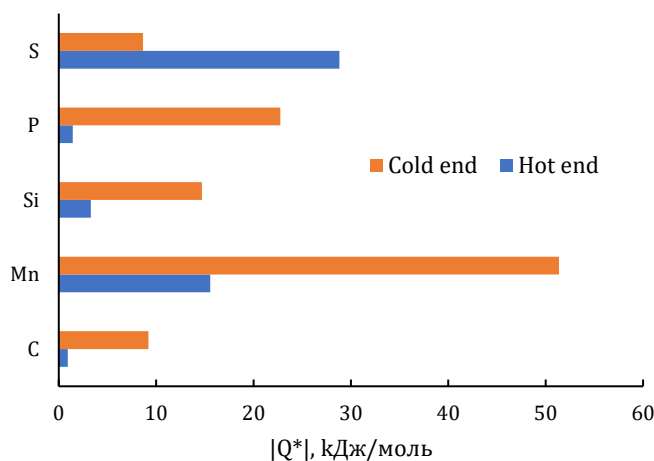


Рисунок – Абсолютне значення теплоти термодифузії на гарячому (Hot) та холодному (Cold) кінцях зразків, на основі [26]

Результати термодифузійних теплових розрахунків різних елементів і велику кількість літературних даних автори [26, 28] пов'язують зі співвідношенням атомних радіусів елементів, що дифундують, R_d , і основного металу, R_b . Було виявлено, що при наближенні R_d/R_b до 1 значення $|Q^*|$ різко зростає. Це, на думку авторів [26], свідчить на користь вакансійного механізму термодифузії, підтвердженого також Шьюмоном [7].

Аналіз закономірностей руху атомів у твердих металах в полі температурного градієнта дозволив розробити принципово новий підхід до підвищення експлуатаційної стійкості деталей, що працюють в умовах нерівномірного нагріву. Ідея полягала в насиченні робочих поверхонь деякими елементами в процесі експлуатації [27-29]. На основі лабораторних досліджень та розрахунків величини Q^* було запропоновано перелік матеріалів, компоненти яких концентруються на робочій поверхні та запобігають її окисленню.

За результатами експериментів автори [28] намагалися знайти залежність інтенсивності зниження твердості чавуну на гарячому кінці зразків внаслідок окиснення від сумарної електро-негативності сумішей, що контактували з ним під час експерименту. Всупереч припущенням авторів [28], на нашу думку, виходячи з представлених даних, такої залежності не виявлено.

Термодифузія в рідкому чавуні. Дослідженням термодифузії в рідких металах присвячено відносно невелику кількість публікацій [30-32].

О.М. Скребцов та ін. [32] на прикладі роботи доменної печі показали, що явище термодифузії активно проявляється в рідкому чавуні. Вони обробили результати унікального експерименту.

Як відомо, при виплавці чавуну в доменній печі розплав накопичується в її нижній частині (горні) [33]. Він поступово вимиває вогнетриви, утворює конусоподібну порожнину і заповнює її.

На Магнітогорському металургійному комбінаті одна з доменних печей працювала близько 13 років без значного капітального ремонту [33]. Після цього, під час капітального ремонту, з поглиблення в горні було випущено ~800 т рідкого чавуну і ~30 т шлаку. Глибина рідкого розплаву становила 3,55 м. Тим не менш, авторам [32] вдалося виміряти температуру, відібрати зразки металу і виконати їх хімічний аналіз на вміст елементів (Si, Mn, C, S, P) на 20 рівнях розплаву (відстань між сусідніми рівнями становила 0,18 м). Температура у верхньому шарі чавуну до ремонту печі становила 1360°C, а на глибині 2,85 м – 1160°C. Отже, температурний градієнт становив ~70 град/м.

Автори [33] припустили, що протягом 13 років у всьому об'ємі рідкого чавуну встановився стаціонарний рівноважний розподіл концентрацій елементів і температур за рахунок дифузії і термодифузії. Теплова ізоляція була ідеальною. Її забезпечував товстий шар вогнетривів. «Досить чітка закономірність зміни складу чавуну по висоті горна свідчила про відсутність конвекції» [33].

Для знаходження теплоти термодифузії елементів, що містяться в рідкому чавуні, відповідно до методики [7, 25] автори [13, 32] побудували залежність між логарифмами концентрації ($\ln C$) і зворотної температури ($1/T$). Розраховані точки добре лягли на прямі, обробка яких дала наступні результати (таблиця).

Таблиця

Теплота термодифузії різних елементів у рідкому чавуні, на основі [32]

Елементи	C	Si	Mn	S	P
Q^* , кДж/моль	-6,2	-64,6	-53,5	+74,2	-7,9

Згідно з експериментальними даними [32] та розрахованими значеннями теплоти термодифузії (таблиця), видно, що в рідкому чавуні сірка перемістилася на більш холодну сторону, а решта елементів – на більш гарячу.

Порівняння отриманих результатів з результатами робіт [26, 27, 32, 34] показує, що виявлена закономірність має універсальний характер. Термодифузія елементів у рідкому залізі протікає за тими самими закономірностями, що й у твердому.

Крім того, висновок про аномальну поведінку сірки під час термодифузії може бути використаний при описі існуючих і створенні нових процесів десульфурзації металів.

Іншим прикладом термодифузії в рідкому металі є виробництво біметалевих виливків шляхом заливання розплаву на попередньо нагріту тверду заготовку [20, 21, 35, 36]. Градієнт температури, що виникає під час заливки та кристалізації, спричиняє термодифузію елементів.

Автори [20, 21] досліджували вміст різних елементів чавуну на різних відстанях від межі сплавлення в металі-основі та залитому металі. Вони показали, що перерозподіл хімічних елементів за рахунок термодифузії має суттєве значення для формування структури перехідної зони та її властивостей. Аналіз отриманих закономірностей показує, що вони не суперечать закономірностям, отриманим в інших роботах [13, 25-27, 32], і мають універсальний характер. Тому використання цих закономірностей дозволить вибрати оптимальний температурний режим технологічного процесу для отримання якісних біметалевих виливків.

Висновки

Термодифузія широко розповсюджена в природі та техніці. Аналіз публікацій показав, що існують універсальні закони, які описують це явище як у рідких, так і в твердих металах. Їх розуміння та використання дозволить:

- збільшити термін служби деталей, що працюють в умовах градієнта температур;
- підвищити якість металу, що виплавляється в металургійних агрегатах;
- оптимізувати режим виробництва біметалевих виливків.

Перелік використаних джерел:

1. Ludwig C. Diffusion Zwischen Ungleich Erwarmten Orten Gleich Zusammengesetzter Losun gen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*. 1856. No. 65. Pp. 539.
2. Soret C. Concentrations differentes d'une dissolution dont deux parties sont a'des temperatures differentes. *Archives des sciences physiques et naturelles*. 1879. No. 2. Pp. 48.
3. Tyndall J. Scientific addresses. New Haven : C.C. Chatfield & Co, 1870. 74 p.
4. Rahman M. A., Saghir M. Z. Thermodiffusion or Soret effect: historical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. No. 73. Pp. 693-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2014.02.057>.
5. Chapman S. Thermal diffusion in ionized gases. *Proceedings of the Physical Societ*. 1958. No. 72(3). Pp. 353-362. DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1328/72/3/305>.
6. Ajrapetyan M. Yu., Uryupin S. A. Anomalous diffusion and thermodiffusion of light ions in a non-isothermal plasma. *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2008. Vol. 87(12). Pp. 777-781. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021364008120060>.
7. Shewmon P. G. Diffusion in solids. New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1963. 203 p.
8. Bokshtein B. S. Diffusion in metals. Springer Nature, 1978. 248 p.
9. Nowacki W. Certain problems of thermodiffusion in solids. *Archive of Applied Mechanics*. 1971. No. 26. Pp. 731-755.
10. Nowacki W. Dynamical problems of thermodiffusion in solids. *The Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 1974. No. 22. Part I. Pp. 55-64; Part II, pp. 205-211.
11. Nowacki W., Olesiak Z. S. Termodyfuzja w ciałach stałych. Warszawa : PWN, 1991. 289 p.
12. Olesiak Z. S. Problems of thermodiffusion of deformable solids. *Materials Science*. 1998. No. 34. Pp. 297-303. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02355619>.
13. Термодиффузия элементов в металлах, обобщение экспериментальных данных по тепловым эффектам процесса / А.М. Скребцов и др. *Процессы литья*. 2015. № 2. С. 64-69.
14. Asaro R. J., Farkas D., Kulkarni Ya. The Soret effect in diffusion in crystals. *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56. Pp. 1243-1256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2007.11.019>.
15. Ahadi A., Varenbergh S., Saghir M. Z. Measurement of Soret coefficients for a ternary hydrocarbon mixture in low gravity environment. *The Journal of Chemical Physics*. 2013. Vol. 138(20). Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4802984>.
16. Ahadi A., Saghir M. Z. An extensive heat transfer analysis using Mach Zehnder interferometry during thermodiffusion experiment on board the International Space Station. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 62. Pp. 351-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.048>.
17. Walker D., DeLong S. E. Soret separation of mid-ocean ridge basalt magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1982. Vol. 79. Pp. 231-240. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00371514>.
18. Aleksander K. Isotope separation by thermodiffusion in liquid phase. *Advances in physical science*. 1962. Vol. 24(8). Pp. 711-748.
19. Chepak-Gizbrekht M. V. Estimation of thermodiffusion influence on formation of transition zones during brazing. *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 712. Pp. 379-383. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.379>.
20. Скребцов А. М., Дан Л. А., Павлюк Б. А. Формирование переходной зоны в литом биметалле на основании чугунов различных составов. *Теория и практика процессов получения биметаллических и многослойных отливок*. 1987. С. 31-35.
21. Дан Л. А. Технологический процесс восстановления шахтных межпутевых роликов переливом жидкого металла по изношенной поверхности : автореф. дис. ... канд. техн. наук :

- 05.16.04. Київ, 1988. 18 с.
22. Alexandrov D. V., Aseev D. L. Directional solidification with a two-phase zone: thermodiffusion and temperature-dependent diffusivity. *Computational Materials Science*. 2006. Vol. 37(1). Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.12.019>.
 23. Alexandrov D. V., Pinigin D. A. On the theory of dendritic growth: soret and temperature dependent diffusion effects. *Metallurgy (Metally)*. 2013. Vol. 2013. No. 2. Pp. 123-129. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029513020031>.
 24. Bokshitejn B. S., Bokshitejn S. Z., Zhuhovickij A. A. Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids. Springer Nature, 1974. 280 p.
 25. Кузьменко П. П. Электроперенос, термоперенос и диффузия в металлах. Киев : Вища школа, 1983. 151 с.
 26. Дан Л. А., Скребцов А. М. Анализ движущих сил и механизмов термодиффузии элементов в сером чугуна. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2007. Вып. 17. С. 89-92.
 27. Скребцов А. М., Дан Л. А., Вылегжанина Т. В. Изменение свойств серого чугуна после термоциклирования с градиентом температуры. *Теория и практика металлургических процессов*. Киев : Издательство УМК, 1990. С. 94-102.
 28. Термодиффузия и электроотрицательность элементов в металлах / Скребцов А. М., Терзи В. В., Качиков А. С., Дан Е. Л. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2012. Вып. 24. С. 131-135.
 29. Дан Л. А. Использование ФГМ как способ повышения разгаростойкости чугуновых и стальных отливок. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2009. № 15(1). С. 112-115.
 30. Sondermann E., Kargl F., Meyer A. In situ Measurement of Thermodiffusion in Liquid Alloys. *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123. 255902. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.255902>.
 31. Jafar-Salehi E., Eslamian M., Saghir M. Z. Effect of thermodiffusion on the fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal alloys. *Engineering Science and Technology*. 2016. Vol. 19(1). Pp. 511-517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.007>.
 32. Скребцов О. М., Терзі В. В., Проценко Д. М. Унікальний експеримент із термодифузії елементів у рідкому чавуні. *Чорна металургія*. 2015. № 58(10). С. 785-786. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-785-786>.
 33. Lepihin L. A., Manaenko I. P. The condition of the scaffold after blowing of one of the blast furnaces of Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Steel in translation*. 1961. No. 3. Pp. 41-48.
 34. Стародубов К. Ф., Свечников В. Н. Изложницы. Харьков, Днепропетровск : Сталь, 1932. 188 с.
 35. Wróbel T. Bimetallic layered castings alloy steel – grey cast iron. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2011. Vol. 48(2). Pp. 118-125.
 36. Костенко Г. Д., Брик В. Б., Горский В. В. Основные закономерности диффузионного перераспределения легирующих элементов при формировании переходных слоев биметаллических отливок на основе железа. *Теория и практика процессов получения биметаллических и многослойных отливок*. Киев: Институт Проблем Литья, 1987. С. 10-15.

References:

1. C. Ludwig, «Diffusion Zwischen Ungleich Erwärmten Orten Gleich Zusammengesetzter Losungen», *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, no. 65, pp. 539, 1856. (Germ.)
2. C. Soret, «Concentrations differentes d'une dissolution dont deux parties sont a des temperatures differentes», *Archives des sciences physiques et naturelles*, no. 2, pp. 48, 1879.
3. J. Tyndall, *Scientific addresses*. New Haven, USA: C.C. Chatfield & Co, 1870.
4. M.A. Rahman, and M.Z. Saghir, «Thermodiffusion or Soret effect: Historical Review», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 73, pp. 693-705, 2014. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.057](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.057).
5. S. Chapman, «Thermal Diffusion in Ionized Gases», *Proceedings of the Physical Society*, no. 72(3), pp. 353-362, 1958. doi: [10.1088/0370-1328/72/3/305](https://doi.org/10.1088/0370-1328/72/3/305).

6. M.Yu. Ajrapetyan, and S.A. Uryupin, «Anomalous diffusion and thermodiffusion of light ions in a non-isothermal plasma», *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 87(12), pp. 777-781, 2008. doi: **10.1134/S0021364008120060**.
7. P.G. Shewmon, *Diffusion in solids*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1963.
8. B.S. Bokshtejn, *Diffusion in metals*. Springer Nature, 1978.
9. W. Nowacki, «Certain problems of thermodiffusion in solids», *Archive of Applied Mechanics*, no. 26, pp. 731-755, 1971.
10. W. Nowacki, «Dynamical problems of thermodiffusion in solids», *The Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, no. 22, part I, pp. 55-64; part II, pp. 205-211, 1974.
11. W. Nowacki, and Z.S. Olesiak, *Termodyfuzja w ciałach stałych*. Warszawa, Poland: PWN, 1991. (Pol.)
12. Z.S. Olesiak, «Problems of thermodiffusion of deformable solids», *Materials Science*, no. 34, pp. 297-303, 1998. doi: **10.1007/BF02355619**.
13. A.M. Skrebtsov, V.V. Terzy, D.N. Protsenko, A.O. Sekachev, and A.S. Kachykov, «Termodyfuziia elementov v metallakh, obobshchenye eksperymentalnykh dannykh po teplovim efektam protsessu» [«Thermal diffusion of elements in metals, generalization of experimental data on thermal effects of the process»], *Protsessi lytia – Casting Processes*, № 2, pp. 64-69, 2015. (Rus.)
14. R.J. Asaro, D. Farkas, and Ya. Kulkarni, «The Soret effect in diffusion in crystals», *Acta Materialia*, vol. 56, pp. 1243-1256, 2008. doi: **10.1016/j.actamat.2007.11.019**. (Rus.)
15. A. Ahadi, S. Varenbergh, M.Z. Saghir, «Measurement of Soret coefficients for a ternary hydrocarbon mixture in low gravity environment», *The Journal of Chemical Physics*, vol. 138(20), pp. 1-17, 2013. doi: **10.1063/1.4802984**.
16. A. Ahadi, and M.Z. Saghir, «An extensive heat transfer analysis using Mach Zehnder interferometry during thermodiffusion experiment on board the International Space Station», *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 351-364, 2014. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2013.09.048**.
17. D. Walker, and S.E. DeLong, «Soret separation of mid-ocean ridge basalt magma», *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 79, pp. 231-240, 1982. doi: **10.1007/BF00371514**.
18. K. Aleksander, «Isotope separation by thermodiffusion in liquid phase», *Advances in physical science*, vol. 24(8), pp. 711-748, 1962.
19. M.V. Chepak-Gizbrekht, «Estimation of Thermodiffusion Influence on Formation of Transition Zones during Brazing», *Key Engineering Materials*, vol. 712, pp. 379-383, 2016. doi: **10.4028/www.scientific.net/KEM.712.379**.
20. A.M. Skrebtsov, L.A. Dan, and B.A. Pavliuk, «Formirovaniye perekhodnoi zoni v lytom bymetalle na osnovany chuhunov razlychnykh sostavov» [«Formation of a transition zone in a cast bimetal based on cast irons of various compositions»], *Teoriya y praktika protsessov polucheniya bymetallycheskykh y mnohosloinnykh otlyvok – Theory and practice of processes for producing bimetallic and multilayer castings*, pp. 31-35, 1987. (Rus.)
21. L.A. Dan, «Tekhnologicheskyi protsess vosstanovleniya shakhtnykh mezhputevykh rolykov perelyvom zhydkoho metalla po yznoshennoi poverkhnosti» [«Technological process of restoration of mine inter-track rollers by pouring liquid metal over the worn surface»], PhD thesis, Kyiv, Ukraine, 1988. (Rus.)
22. D.V. Alexandrov, and D.L. Aseev, «Directional solidification with a two-phase zone: thermodiffusion and temperature-dependent diffusivity», *Computational Materials Science*, vol. 37(1), pp. 1-6, 2006. doi: **10.1016/j.commatsci.2005.12.019**.
23. D.V. Alexandrov, and D.A. Pinigin, «On the Theory of Dendritic Growth: Soret and Temperature Dependent Diffusion Effects», *Metallurgy (Metally)*, vol. 2013, no. 2, pp. 123-129, 2013. doi: **10.1134/S0036029513020031**.
24. B.S. Bokshtejn, S.Z. Bokshtejn, and A.A. Zhuhovickij, *Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids*. Springer Nature, 1974.
25. P.P. Kuzmenko, *Elektroperenos, termoperenos y dyffuziya v metallakh* [Electrical transfer, thermal transfer and diffusion in metals]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 1983. (Rus.)
26. L.A. Dan, and A.M. Skrebtsov, «Analiz dyzhushchykh syl y mekhanizmov termodyfuzyy elementov v serom chuhune» [«Analysis of driving forces and mechanisms of thermal diffusion of elements in gray cast iron»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – Reporter of the Priazovskiy State Technical University*, vol. 17, pp. 89-92, 2007. (Rus.)

27. A.M. Skrebtsov, L.A. Dan, and T.V. Vilezhanyina, «Yzmenenye svoistv seroho chuhuna posle termotsyklyrovaniya s hradyentom temperaturi» [«Changes in the properties of gray cast iron after thermal cycling with a temperature gradient»], *Teoriya y praktyka metallurhicheskikh protsessov – Theory and practice of metallurgical processes*, pp. 94-102, 1990. (Rus.)
28. A.M. Skrebtsov, V.V. Terzy, A.S. Kachykov, and E.L. Dan, «Termodyffuziya y elektrootrytsatelnost elementov v metallakh» [«Thermal diffusion and electronegativity of elements in metals»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, vol. 24, pp. 131-135, 2012. (Rus.)
29. L.A. Dan, «Yspolzovanye FHM kak sposob povisheniya razgharostoikosty chuhunnikh y stalnikh otlivok» [«Using FGM as a method to improve the fire resistance of cast iron and steel castings»], *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, № 15(1), pp. 112-115, 2009. (Rus.)
30. E. Sondermann, F. Kargl, and A. Meyer, «In situ Measurement of Thermodiffusion in Liquid Alloys», *Physical Review Letters*, vol. 123, 255902, 2019. doi: 10.1103/PhysRevLett.123.255902.
31. E. Jafar-Salehi, M. Eslamian, and M.Z. Saghir, «Effect of thermodiffusion on the fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal alloys», *Engineering Science and Technology*, vol. 19(1), pp. 511-517, 2016. doi: 10.1016/j.jestch.2015.09.007.
32. O.M. Skrebtsov, V.V. Terzi, and D.M. Protsenko, «Unikalnyi eksperyment iz termodyfuzii elementiv u riddkomu chavuni» [«A unique experiment on thermal diffusion of elements in liquid cast iron»], *Chorna metalurhiia – Ferrous metallurgy*, № 58(10), pp. 785-786, 2015. doi: 10.17073/0368-0797-2015-10-785-786. (Rus.)
33. L.A. Lepihin, and I.P. Manaenko, «The condition of the scaffold after blowing of one of the blast furnaces of Magnitogorsk Iron and Steel Works», *Steel in translation*, no. 3, pp. 41-48, 1961.
34. K.F. Starodubov, and V.N. Svechnykov, *Yzlozhnytsi [Molds]*. Kharkiv, Dnepropetrovsk, Ukraine: Stal Publ., 1932. (Rus.)
35. T. Wróbel, «Bimetallic layered castings alloy steel – grey cast iron», *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 48(2), pp. 118-125, 2011.
36. H.D. Kostenko, V.B. Bryk, and V.V. Horskyi, «Osnovnie zakonomernosti dyffuzyonnoho pereraspredeleniya lehyruiushchikh elementov pry formirovannyi perekhodnikh sloev bymetallycheskikh otlivok na osnove zheleza» [«The main patterns of diffusion redistribution of alloying elements during the formation of transition layers of bimetallic castings based on iron»], *Teoriya y praktyka protsessov polucheniya bymetallycheskikh y mnohosloinnykh otlivok – Theory and practice of processes for producing bimetallic and multilayer castings*, pp. 10-15, 1987. (Rus.)

Стаття надійшла 13.05.2024

Стаття прийнята 08.06.2024

УДК 621.771

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310685

© Григоренко В.У.¹, Заболотний О.М.²

СКЛАДОВІ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ВАЛКІВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЕРІВ НА ОСНОВІ ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ

Вступ. В металургії заключним етапом виробництва є обробка металу в прокатних цехах. Основною складовою розробки технологій прокатки сортових профілів є

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1809-2842, gvu135gvu@i.ua

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8458-176X, zabolotnii_o_m@aspirants.pstu.edu