

Т. С. Голуб<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953

Л. С. Молчанов<sup>1</sup>, к.т.н., зав. відділом, ORCID 0000-0001-6139-5956

С. І. Семикін<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7365-2259

П. Г. Прокопенко<sup>1</sup>, головний метролог

<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## **ВСТАНОВЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОДІЇ ГАЗОВОГО СТРУМЕНЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ РОЗРОБКИ МЕТОДУ ЛЕГУВАННЯ ГАЗОПОДІБНИМ НІТРОГЕНОМ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ АКТИВАЦІЇ**

**Анотація.** Сьогодення металургійної галузі, як основного виробника конструкційного матеріалу, ставить нові підвищені вимоги до експлуатаційних якостей сталей, які зумовлюють надійність та довговічність деталей та конструкцій. Спосіб поліпшення властивостей сталей досить різноманітні, проте важливе місце серед них займає легування, у тому числі нітрогеном, введення якого дозволяє зменшити у сплавах вміст більш вартісних елементів при збереженні необхідної міцної структури та високих корозійних характеристик сплавів, пластичності тощо. Нітроген достатньо розповсюджений хімічний елемент і як легуючий відомий давно, проте широкому використанню заважає його обмежена розчинність у залізних сплавах, особливо при високому вмісті інших компонентів. Для підвищення розчинності нітрогену використовують різні способи активізації газу. Авторами було досліджено варіант активізації шляхом створення електричного розряду на фізичному стенді. Моделюванню підлягала ділянка між фурмою, для подачі продувного газу, та пристроєм активізації газу шляхом створення електричного розряду між електродами. Встановлено, що для забезпечення електричної активізації нітрогеновмісного газового струменя можливо створювати електричний дуговий чи розгалужений іскровий розряд, різновид якого залежить від відстані між електродами. Задля забезпечення ефективної взаємодії газового потоку з електричним розрядом необхідно забезпечити тиск газу на рівні 0,8-1,2 атм, а продувний пристрій розташовувати на висоті над електричним розрядом на рівні 20-40 калібрів. Дотримання зазначених параметрів дозволить забезпечити ефективну взаємодію газового струменя з електричним розрядом у формі електричної дуги, або іскрового розгалуженого розряду.

**Ключові слова:** легування, газоподібний нітроген, активізація електричним розрядом, фізичне моделювання.

**Посилання для цитування:** Встановлення раціональних режимів взаємодії газового струменя та електричного розряду для розробки методу легування газоподібним нітрогеном при використанні електричної активації / Т. С.

Голуб, Л. С. Молчанов, С. І. Семикін, П.Г. Прокопенко // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 211-219. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-211-219>

**Стан питання.** Стрімкий розвиток технічного прогресу у всіх галузях за останні десятиліття потребує ґрунтовної підтримки якісними конструкційними матеріалами, основу яких все ще складають сталі різного сортаменту. Одним із широкоживаних засобів підвищення механічних властивостей сталевих виробів є легування. При цьому окреме важливе місце серед безлічі легуючих компонентів займає нітроген завдяки властивостям розширення  $\gamma$ - ділянки діаграми стану Fe-C й значного підвищення механічних властивостей сталей [1]. Нержавіючі сталі, леговані нітрогеном, перевершують за міцністю, в'язкістю та корозійною стійкістю традиційні нержавіючі сталі [2-5]. Легування нітрогеном нержавіючих сталей дозволяє зменшити в них вміст нікелю та марганцю в 1,5 – 2 рази, а в деяких випадках взагалі виключити ці елементи при одночасному збереженні службових властивостей на відповідному рівні. Леговані нітрогеном безнікелеві сталі, що застосовуються в медицині для виготовлення хірургічного інструменту та імплантатів мають підвищену міцність, зносостійкість і не викликають негативних явищ і алергічних реакцій в людському організмі. Нержавіючі мартенситні та феритні сталі, леговані нітрогеном, при відповідній термічній і термопластичній обробці мають підвищену міцність, корозійну стійкість і поліпшену технологічну пластичність при високих і низьких температурах.

Проте, ефективність легування нітрогеном безпосередньо залежить від інтенсивності процесів розчинення його у розплаві (при розгляданні як основного з точки зору екологічності видобутку та використання способу його введення шляхом продувки крізь фурму). Агрегатний стан нітрогену при кімнатній температурі й вище – газоподібний, тому легування нітрогеном при виплавці сталей у звичайних металургійних агрегатах обмежується верхньою межею розчинності нітрогену у сталі при температурі лквідус [5-7]. Наприклад, при вдуванні нітрогену у 200 т ківш крізь верхню погрузну фурму при витраті 6-12 м<sup>3</sup>/год приріст вмісту нітрогену у металі за 5-15 хв продувки складає 0,001-0,004%, а при вдування крізь донні фурми із витратою 45-60 м<sup>3</sup>/год - приріст вмісту нітрогену складає до 0,02-0,03 % [8]. Тому для інтенсифікації розчинення нітрогену із газової фази, наприклад, у індукційній плавці під тиском використовують низькотемпературну плазму нітрогенвмісних газових сумішей [9-10].

**Мета роботи.** Виходячи з наведеної вище інформації, дослідження впливу різних факторів на розчинність і засвоєння нітрогену у

газоподібному стані є досить важливим та актуальним питанням, бо, не дивлячись на наявну кількість вже виконаних у цьому напрямку досліджень, ще є досить великий обсяг недосліджених питань. А саме можливість попередньої активізації електричним розрядом різного типу нітрогенвмісного струменя для покращення показника розчинності у залізовуглецевому розплаву. Задачею експерименту було визначення режимів, які забезпечують стабільну взаємодію струменю газоподібного реагенту з електричним розрядом у різних формах (електрична дуга, іскровий розгалужений електричний розряд, відсутність розряду): відстань між електродами; відстань від сопла до електричної дуги; тиск газу.

**Основний матеріал досліджень.** За ідею було взято попередню активізацію до взаємодії з металевим розплавом нітрогенвмісного газового потоку шляхом створення на його шляху електричного розряду (дугового та іскрового розгалуженого). Дослідження передбачало використання створеної лабораторної установки спеціальної конструкції (рис. 1), відповідно до якої електричний розряд створювали між електродами, які можна було переміщувати один відносно одного, та продувку нітрогенвмісним реагентом здійснювали крізь сопло, розташоване таким чином, що струмінь газу проходив крізь електричний розряд.

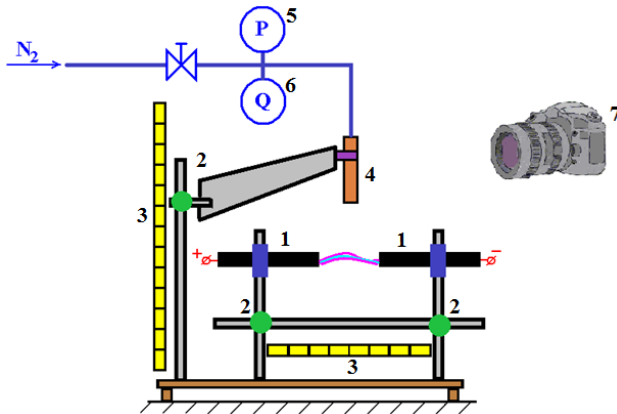


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для визначення раціональних режимів взаємодії електричного розряду з потоком нітрогенвмісного реагенту: 1 - графітові електроди; 2 - кронштейни з можливістю фіксованого переміщення; 3 - маркери лінійного переміщення; 4 - сопло діаметром 4 мм; 5 - манометр; 6 - ротаметр; 7 - пристрій відео фіксації.

В ході експерименту було проведено три серії дослідів з визначення впливу відстані між електродами при відсутньому тиску, при сталому розміщенні сопла над електродами в стаціонарному положенні; при змінній витраті нітрогену; при сталій витраті нітрогену та сталій відстані між електродами змінне положення сопла. Серії експериментів при різному співвідношенні вказаних факторів фіксувалися на відео зйомку.

Перехід від одного стану електричного розряду до іншого фіксувався як зміна візуальних характеристик електричного розряду (рис. 2) [11].

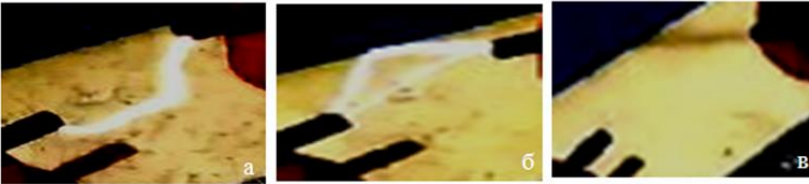


Рисунок 2 – Візуальні характеристики електричного розряду при фіксації на відеозйомку: а – електрична дуга; б – розгалужений іскровий електричний розряд; в – відсутність електричного розряду.

Відповідно до даних представлених на рис. 2 можна відзначити, що режим електричної дуги характеризується наявністю одного об'ємного розряду, який виникає між електродами та переміщується у площині, що проходить через електроди. Стосовно режиму іскрового розгалуженого розряду: розряд візуально характеризується наявністю більше одного електричного розряду, які рухаються в тих же площинах та періодично змінюють напрямок руху. Режим відсутності електричного розряду характеризується відсутністю візуальних змін середовища між електродами.

Дослідження впливу відстані між електродами на характеристику електричного розряду дозволили встановити режими, які визначають перехід від електричної дуги до іскрового розгалуженого розряду (рис. 3). Дослідження проводилося в умовах відсутності продувки газом. Змінювалося положення електродів один відносно одного.

Відповідно до даних, наведених на рис. 3 встановлено, що при використанні графітових електродів діаметром 3 мм зміна характеристик електричного розряду обумовлена зміною відстаней між електродами й характеризується протіканням електричної дуги на дистанції до 30 мм; іскрового розгалуженого розряду від 30 до 50 мм та відсутністю електричного розряду при відстані більше 50 мм.

Наступним етапом досліджень було встановлення впливу тиску струменя газу, що позиціонується перпендикулярно до електричного

розряду й витікає зі стаціонарно встановленого сопла на відстані 40 калібрів від електричної дуги. Досліджувався вплив газового струменя на електричну дугу (відстань між електродами 20 мм) та на іскровий розгалужений електричний розряд (відстань 40 мм). Результати дослідження узагальнені на рисунку 4. Відповідно до даних, наведених на рисунку, встановлено, що для режиму взаємодії газового струменя з електричною дугою спостерігається її збереження при тиску газу до 1,2 атм. При збільшенні тиску газу від 1,2 до 2,0 атм відбувається процес формування розгалуженого електричного розряду. Це обумовлено збільшенням щільності середовища внаслідок чого відбувається руйнування електричної дуги та утворення декількох розрядних контурів. З подальшим збільшенням тиску газу вище 2 атм зростає швидкість газу до звукової, що призводить до відсутності умов для формування електричного розряду навіть у формі розгалуженого іскрового і електричний розряд зникає.

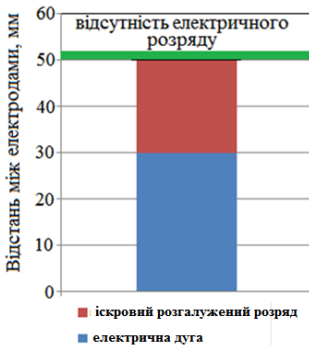


Рисунок 3 – Результати досліджень з визначення впливу відстані між електродами на характеристику електричного розряду.

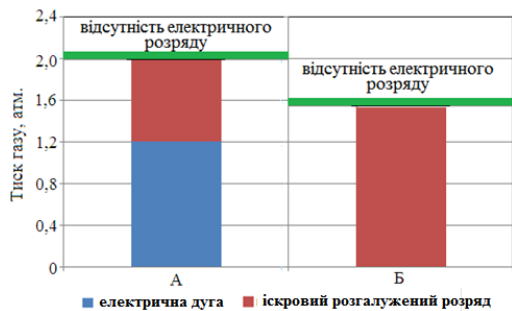


Рисунок 4 – Результати досліджень з визначення впливу тиску струменя газу, що витікає зі стаціонарно розміщеного сопла відносно електродів на характеристику електричного розряду: А – електрична дуга; Б – іскровий розгалужений розряд.

Що стосується режиму взаємодії газового струменя, який витікає зі стаціонарно встановленого відносно електродів сопла, то іскровий розгалужений розряд існує при тиску до 1,5 атм. В подальшому зі зростанням тиску розряд зникає в зв'язку з переходом роботи сопла в понадзвуковий режим.

Результати досліджень з визначення впливу висоти розміщення сопла відносно електричної дуги при тиску 1,5 атм для режимів взаємодії з електричною дугою та іскровим розгалуженим електричним розрядом (відстані між електродами аналогічні

попередньому дослідженню) представлені на рисунку 5.

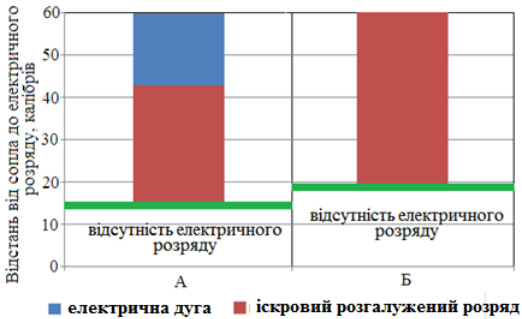


Рисунок 5 – Результати досліджень з визначення впливу положення сопла відносно електричної дуги на характеристику електричного розряду: А – електрична дуга; Б – іскровий розгалужений розряд.

Аналіз даних, наведених на рис. 5, дає змогу зробити висновок про те, що при відстані 15 та 20 калібрів відповідно для електричної дуги та іскрового розгалуженого розряду відсутні умови для формування електричної дуги. Це зумовлено високою щільністю та швидкістю газового потоку, що діє на проміжок між електродами. На відстанях 15-42 калібри для електричної дуги спостерігається режим іскрового розгалуженого розряду. А зі збільшенням відстані до электродів фіксується стійка електрична дуга. У разі дослідження розгалуженого електричного розряду встановлено, що на відстані від 20 калібрів і вище розряд зберігається.

### Висновки

Відповідно до проведених стендових досліджень особливостей взаємодії газового струменя та електричного розряду різного характеру, який формується між двома електродами, розташованими перпендикулярно до продувного пристрою, можна зробити наступні рекомендації стосовно раціонального режиму взаємодії газового струменя нітрогеновмісного газу з електричним розрядом для підвищення його хімічної активності:

1) для забезпечення електричної дуги між графітовими електродами діаметром 3 мм необхідно забезпечити відстань між ними на рівні 10-20 мм;

2) для забезпечення іскрового розгалуженого електричного розряду між графітовими електродами діаметром 3 мм необхідно забезпечити відстань між ними на рівні 30-40 мм;

3) для забезпечення ефективної взаємодії газового потоку з електричним розрядом необхідно забезпечити тиск газу на рівні 0,8-1,2 атм;

4) з метою забезпечення стабільного існування електричного розряду необхідно забезпечити висоту розміщення газового сопла над

електричним розрядом на рівні 20-40 калібрів.

Дотримання зазначених параметрів дозволить забезпечити ефективну взаємодію газового струменя з електричним розрядом у форму електричної дуги, або іскрового розгалуженого розряду.

### Перелік посилань

1. Simmons J. W. Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*. 1996. Vol. 207. Iss. 2. P. 159-169.
2. Nitrogen as an alloying element improving material properties of the high carbon cast steel for ball mill liner plates / Józef Gawlik, Jerzy Schmidt, Tomasz Nowak, Zygmunt Wójcicki, Andrzej Zagórski // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 17. Iss. 4. P. 926-934.
3. Kostina M. V., Bannykh O. A., Blinov V. M. Special Features of Steels Alloyed with Nitrogen. *Metal Science and Heat Treatment*. 2000. Vol. 42, Iss. 11. P. 459-462.
4. Richard P. Reed Nitrogen in austenitic stainless steels. *JOM*. 1989. Vol. 41. P. 16-21.
5. Морозов А. И. *Водород и азот в стали*. М.: Metallurgizdat, 1968. 280 с.
6. Pelke R. D., Elliot I. F. The Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys. *Transaction of the Metallurgical Society of AIME*. 1963. Vol. 227. № 5. P. 849-855
7. Казачков Е. А. *Расчеты по теории металлургических процессов*. М.: Металлургия, 1988. 288 с.
8. Разработка технологии внепечной обработки рельсовой стали в агрегате ковш-печь/ Р. А. Гизатулин, Л. А. Годик, Н. А. Козырев, А. П. Данилов // *Электрометаллургия*. 2008. № 2. С. 11-13.
9. Рашев Ц. Создание лабораторных и промышленных установок для одностадийного производства высокоазотистой стали. *Электрометаллургия*. 2004. № 2. С. 6-10.
10. Жекова Л., Рашев Ц. Исследование возможности создания высокоазотистых сталей с использованием метода плавки во взвешанном состоянии под высоким давлением. *Металлург*. 2007. № 2. С. 37-41.
11. Засельский А. М. *Электрическая дуга отключения*. М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. 267 с

### References

1. Simmons, J. W. (1996). Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*, 207(2), 159-169
2. Gawlik, J., Schmidt, J., Nowak, T., Wójcicki, Z., & Zagórski, A. (2017). Nitrogen as an alloying element improving material properties of the high carbon cast steel for ball mill liner plates. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4), 926-934
3. Kostina, M. V., Bannykh, O. A., & Blinov, V. M. (2000). Special Features of Steels Alloyed with Nitrogen. *Metal Science and Heat Treatment*, 42(11), 459-462
4. Richard, P. (1989). Reed Nitrogen in austenitic stainless steels. *JOM*, 41, 16-21
5. Morozov, A. I. (1968). *Vodorod i azot v stali* [Hydrogen and nitrogen in steel]. Metallurgizdat [in Russian]

6. Pelke, R. D., & Elliot, I. F. (1963). The Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys. *Transaction of the Metallurgical Society of AIME*, 227(5), 849-855
7. Kazachkov, Ye. A. (1988). *Raschety po teorii metalurgicheskikh protsessov* [Calculations based on the theory of metallurgical processes]. Metallurgy [in Russian]
8. Gizatulín, R. A., Godík, L. A., Kozyrev, N. A., & Danilov, A. P. (2008). Razrabotka tehnologii vnepechnoy obrabotki relsvooy stali v aggregate kovsh-pech [Development of technology for out-of-furnace processing of rail steel in a ladle-furnace unit]. *Electrometallurgy*, (2), 11-13 [in Russian]
9. Rashev Ts. Sozdanie laboratornyh i promyshlenyh ustanovok dlia odnostadiynogo proizvodstva vysokoazotistoy stali [Creation of laboratory and industrial installations for one-stage production of high-nitrogen steel] // *Electrometallurgy*. – 2004.-№2.-P.6-10 [in Russian]
10. Zhekov, L., & Rashev, Ts. (2007). Issledovanie vozmozhnosti sozdaniia vysokoazotistyh staley s ispolzovaniem metoda plavki vo vzveshannom sostoyanii pod vysokim davleniem [Study of the possibility of creating high-nitrogen steels using the flash smelting method under high pressure]. *Metallurgist*, (2),37-41 [in Russian]
11. Zasel'skiy, A. M. (1963). *Elektricheskaya duga otklucheniia* [Electric arc trip]. State Energy Publishing House [in Russian]

**T. S. Golub**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953

**L. S. Molchanov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0001-6139-5956

**S. I. Semykin**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7365-2259

**P. H. Prokopenko**<sup>1</sup>, Chief Metrologist

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### **ESTABLISHMENT OF RATIONAL MODES OF INTERACTION OF GAS FLOW AND ELECTRIC DISCHARGE FOR THE DEVELOPMENT OF THE GASEOUS NITROGEN ALLOYING METHOD USING ELECTRICAL ACTIVATION**

**Abstract.** Today, the metallurgical industry, as the main producer of structural material, sets new, increased requirements for the operational qualities of steels, which determine the reliability and durability of parts and structures. The methods of improving the properties of steels are quite diverse, but an important place among them is alloying, including nitrogen. The nitrogen alloying allows to reduce the content of more valuable elements in alloys while maintaining the necessary strong structure and high corrosion characteristics of alloys, plasticity, etc. Nitrogen is a fairly widespread chemical element and has long been known as an alloying agent, but its limited solubility in iron alloys, especially with a high content of other components, prevents its widespread use. Different methods of gas activation are used to increase the solubility of nitrogen. The authors investigated the option of activation by creating an electric discharge on a physical stand. The area of the lance at the outlet for the supply of purging gas was subject to modeling, on the path of which a gas activation device was placed by creating an electric discharge between



the electrodes. It was established that to ensure electrical activation of a nitrogen-containing gas jet, it is possible to create an electric arc or corona discharge, the type of which depends on the distance between the electrodes. In order to ensure the effective interaction of the gas flow with the electric discharge, it is necessary to ensure the gas pressure at the level of 0.8-1.2 atm, and to place the blowing device at a height above the electric discharge at the level of 20-40 gauges. Compliance with the specified parameters will ensure effective interaction of the gas jet with the electric discharge in the form of an electric arc or corona discharge.

**Key words:** alloying, gaseous nitrogen, activation by electric discharge, physical modeling.

**For citation:** Golub, T. S., Molchanov, L. S., Semykin, S. I., & Prokopenko, P. H. (2023). Establishment of rational modes of interaction of gas flow and electric discharge for the development of the gaseous nitrogen alloying method using electrical activation. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 211-219. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-211-219>

*Стаття надійшла до редакції збірника 20.09.2023 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*