

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.2

УДК 669.184

Голуб Т.С., к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953, e-mail: isinasu.golubts@gmail.com

Молчанов Л.С., к.т.н., зав. відділом фізико-технічних проблем металургії сталі,

ORCID 0000-0001-6139-5956, e-mail: metall729321@gmail.com

Семикін С.І., к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7365-2259, e-mail: isisemykin@gmail.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро

**Golub Tetiana**, PhD, senior researcher

**Molchanov Lavr**, PhD, the head of the department of Physical and technical problems of steel metallurgy

**Semykin Sergiy**, PhD, senior researcher

Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА СПОСОБУ АКТИВІЗАЦІЇ ГАЗОВОГО ПОТОКУ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ЛЕГУВАННЯ ГАЗОПОДІБНИМ НІТРОГЕНОМ

*Нітроген є одним з дієвих легуючих, що покращує ряд показників сталі, проте дуже обмежено розчиняється у ній, особливо при введенні більш екологічним способом у газоподібному стані прямим продуванням. У зв'язку з цим актуальним є дослідження можливості підвищення розчинення газоподібного нітрогену при продуванні. Існують різні способи активізації газу, проте задля забезпечення відносно невисоких енергетичних затрат було запропоновано дослідити варіант активізації шляхом впливу низькотемпературної плазми — електричного кистьового розряду. Дослідження проведено на фізичному стенді, який моделює ділянку фурми на виході для подачі активованого газу при використанні різних типів розрядних пристроїв закритого типу: із занурюваним не ізольованим електродом та виступаючим практично повністю ізольованим електродом. Було проаналізовано вплив тиску продувального газу та довжини дуги (відстані між електродами) на ефективність процесу іонізації потоку нітрогенвмісного газу (на прикладі повітря). Встановлено, що у разі використання розрядного пристрою із зануреним електродом сила струму, що формує активований газ, має квадратичну залежність від відстані між електродами з максимумом при відстані близько 15 мм та тиску продувального газу 0,25—0,3 МПа. При використанні розрядного пристрою із виступаючим електродом отримані значно вищі показники сили іонізованого струму при збереженні візуального розряду навіть при високих тисках продувального газу (0,6 МПа). При цьому сила струму зростає при збільшенні дистанції розряду — із найбільшими показниками при низьких продувних тисках. Тобто варіант розрядного пристрою із виступаючим електродом більш перспективний з точки зору активізації нітрогенвмісного газового потоку.*

**Ключові слова:** продувка; фурма; активізація; електрод; кистьовий розряд.

*Nitrogen is one of the effective alloying agents, that improves a number of steel parameters, but it has limited dissolution in iron, especially when introduced in a more ecological way in a gaseous state - direct blowing. In this regard, it is relevant to study the possibility of increasing the dissolution of gaseous nitrogen during blowing. There are various methods of gas activation, but in order to ensure relatively low energy costs, it was proposed to investigate the option of activation through the influence of low-temperature plasma - electric brush discharge. The research was carried out on a physical bench that simulates the section of the lance at the outlet for the supply of activated gas when using different types of closed-type discharge devices: with a submerged non-insulated electrode and a protruding almost completely insulated electrode. The effect of purge gas pressure and arc length (distance between electrodes) was analyzed on the efficiency of the nitrogen-containing gas flow ionization process (using air as an example). It was established that when using a discharge device with a submerged electrode, the current strength that forms the activated gas has a quadratic dependence on the distance between the electrodes with a maximum at a distance of about 15 mm and*

*a purge gas pressure of 0.25—0.3 MPa. When using a discharge device with a protruding electrode, much higher indicators of the strength of the ionized current were obtained while maintaining a visual discharge even at high pressures of the purging gas (0.6 MPa). At the same time, the current strength increases with an increased discharge distance — with the highest values at low blowing pressures. That is, the version of the discharge device with a protruding electrode is more promising from the point of view of activation of the nitrogen-containing gas stream.*

**Keywords:** blowing; lance; activation; electrode; brush discharge.

### Постановка проблеми

Підвищення міцності сталей та покращення їх експлуатаційних якостей — це одне з основних завдань, що сприяють вирішенню питання надійності, довговічності деталей та конструкцій та металоємності загалом. Серед великої кількості способів покращення властивостей сталей окреме місце займає легування, у тому числі нітрогеном.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нітроген, як легуючий елемент, відомий досить давно, а його достатньо високий вміст у атмосфері робить нітроген ще більше привабливим для технологів [1—5]. Легування нітрогеном дозволяє загалом підвищити якісні експлуатаційні показники сталей, а сам процес має великий вплив на довкілля.

Попри високу «привабливість» нітрогену існує досить значна перешкода для його масового використання — обмежена розчинність у залізних сплавах, особливо при високому вмісті інших компонентів [6—8]. При виплавці сталей у звичайних металургійних агрегатах верхня межа розчинності нітрогену обумовлена стандартною розчинністю нітрогену у сталі при температурі ліквідус. Так при вдуванні нітрогену у 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 % [9].

### Формулювання мети дослідження

Існує велика кількість різноманітних способів введення нітрогену в рідкий метал, проте найбільше застосування отримали два способи: продування ванни рідкого металу газоподібним нітрогеном (легування газоподібним нітрогеном при продуванні у конвертері чи ковші [10—13]) та використання азотованих лігатур [14—16]. Найчастіше на практиці використовують обидва способи введення нітрогену у рідкий розплав, бо продувка газоподібним нітрогеном не дозволяє отримати високий вміст його в металі (понад 0,1 %) і часто характеризується нерівномірністю засвоєння. Для інтенсифікації розчинення нітрогену із газової фази існує спосіб індукційної плавки під тиском з використання низькотемпературної плазми нітрогенвмісних газових сумішей [17], який, відповідно до матеріалів авторів, дозволяє значно підвищити розчинність газоподібного нітрогену у сталі. Маючи позитивний досвід робіт з електричної високовольтної активації кисню [18], в роботі було запропоновано використання аналогічного методу для активації нітрогену.

У звичайному стані всі гази майже повністю складаються з нейтральних атомів чи молекул, адсорбція яких поверхнею металевого розплаву передбачає стадію розділення молекули на йони та приєднання йонів до поверхні з наступним розчиненням у розплаві [19]. Тобто, якщо газ попередньо перевести у іонний стан - «активізувати», процес поглинання його розплавом підвищиться [20, 21]. Це можна зробити двома шляхами: «зовнішнім», коли заряджені частинки створюються дією якогось зовнішнього джерела (його називають іонізатором), що формує несамостійний розряд, або «внутрішнім», коли заряджені частинки створюються в газі під дією електричного поля, яке потім наводить їх рух і створює електричний струм — самостійний розряд.

Відомі численні публікації про способи та пристрої зі створення іонізованого газового потоку різного складу (плазмова металургія) [22—25], однак вони базуються на термічній плазмі, для створення якої потрібні значні витрати електроенергії. Основою запропонованого способу є попередня активація потоку газу за рахунок електрофізичних впливів потужністю на два — три порядки нижче, що призведе до «активації» газового потоку перед моментом його взаємодії з розплавом [26]. Іонізований газовий струмінь може генеруватися в дугових, високо-

частотних та надвисокочастотних плазмотронах у тліючому та коронному розрядах, у потужних лазерах [19—25]. Однак переважним напрямом у створенні засобів «активізації» струменю газу стосовно умов металургійного виробництва є дія високовольтного розряду зі створенням кистьового або тліючого електричного розряду на поверхні електрода. Це зумовлено як простою реалізації даного способу і можливістю широкого регулювання параметрів активізації потоку, так і енергетичною ефективністю процесу, стабільністю та надійністю у роботі.

### Виклад основного матеріалу

#### Матеріали та методи дослідження

У рамках проведеної роботи на лабораторній ділянці відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАНУ було створено стенд для дослідження високовольтної активізації газового струменя, що витікає з продувної фурми, при вільному поширенні при використанні розрядного пристрою із занурювальним електродом (рис. 1 А) та виступаючим електродом (рис. 1 Б). Дослідження щодо встановлення закономірностей утворення та поширення йонів при продуванні нітрогеновмісним газом були виконані з використанням зондового методу Ленгмюра [27]. Вимірювальна система (рис. 2) включала: вимірювальний зонд, джерело напруги та реєструючий зміну сили струму в ланцюзі гальванометр. Кількість йонів певного знаку визначалося за величиною йонного струму за умови встановлення відповідної полярності потенціалу на зонді.

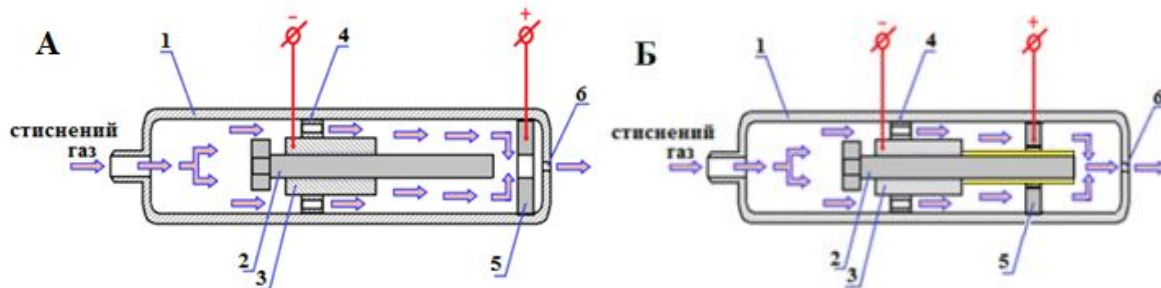


Рис. 1. Ескіз стенда для дослідження високовольтної активізації газового потоку, що витікає з продувної фурми, при вільному поширенні (із зануреним електродом А та виступаючим Б): 1 — корпус установки, виконаний з прозорого полікарбонату; 2 — рухомий анод виконаний з нержавіючої сталі діаметром 4 мм (у випадку Б вкритий керамічною ізоляцією); 3 — шина для підведення електричного струму до аноду; 4 — пластикова основа для кріплення аноду з шиною, що також забезпечує проходження стисненого газу; 5 — катод, виконаний з нержавіючої сталі та оснащений отвором діаметром 4 мм у випадку А, та 7 мм у випадку Б, для забезпечення еквівалентності прохідного перетину; 6 — вихідне циліндричне сопло діаметром 2 мм

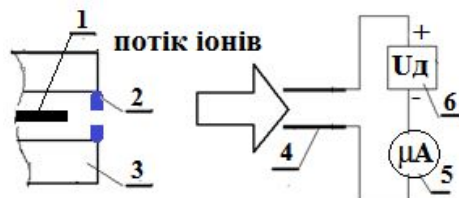


Рис. 2. Вимірювальна схема оцінки ступеня активізації газу із застосуванням зонда Ленгмюра: 1 — стрижневий електрод, 2 — катод-шайба, 3 — продувна фурма, 4 — пластини датчика Ленгмюра, 5 — мікроампер метр, 6 — блок живлення датчика

Конструкція розрядних пристроїв передбачала розміщення у прозорому корпусі, виконаному з полікарбонату, металевих аноду і катоду. При цьому анод виконаний таким чином, що дозволяє регулювати відстань між ними. Електроди виготовлено з нержавіючої сталі. Катод має вигляд шайби товщиною 2 мм із отвором по центру 4 мм. Анод виготовлено зі стрижня із різьбовою частиною, товщина 4 мм. У випадку занурювального електрода анод не був ізолюваний,

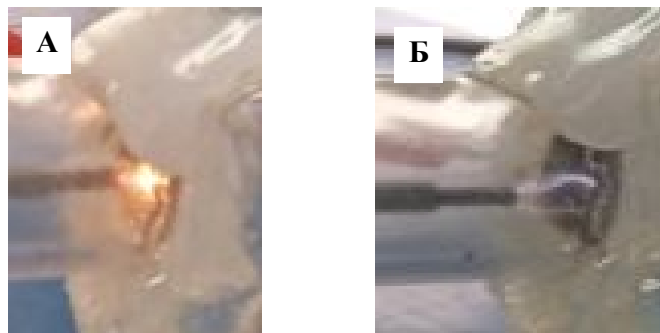
а у випадку виступаючого електроду — був ізольований за виключенням кінцевої частини, яка формувала розряд із катодом. Вихідний отвір з полікарбонатного корпусу складає 2 мм. На кінці анод має плоский зріз. (рис. 1). Електроди розміщувалися на фіксованій відстані один від одного 3—21 мм у випадку занурю вального електроду та від 20 до 40 мм у випадку виступаючого електроду із однаковим шагом 3 мм.

Продувний газ (повітря) подавався в порожнину лабораторного пристрою за допомогою компресора крізь додатковий осушувач повітря із регулюванням тиску. Тис газу під час виміру підтримувався на встановленому рівні. Було досліджено величини тиску продувного газу від 0,1 МПа до 0,6 МПа із шагом 0,05 МПа.

Також було досліджено та зафіксовано відеокамерою вплив тиску та відстані між електродами на величину сили струму, що формує активований потік.

#### **Результати досліджень**

Перш за все, слід відмітити, що за умов відсутності подачі газу між електродами спостерігався кистьовий розряд (фото на рис. 3).



*Рис. 3.* Характерний вигляд розрядів між електродами без подачі продувного газу при відстані між електродами: А — 6 мм та Б — 12 мм

При чому його потужність була високою, що при невеликій відстані між електродами (до 9 мм) провокувала значний розігрів електродів (розряд набував жовтогарячого кольору), а при більшій відстані розряд мав вигляд кистьового із синім кольором дуги і зберігався протягом всього дослідженого діапазону відстаней між електродами (до 21 мм).

Спочатку був досліджений варіант пристрою для формування розряду із занурювальним електродом. Подача газу з величиною тиску до 0,25 МПа збільшувала візуально електричний розряд (кількість на частоту формування розрядів). На рис. 4 це відповідає фото 1—4. Подальше збільшення тиску продувного газу до 0,3 МПа зменшувало візуальний прояв розряду (фото 5 та 6) до одиничних пробоїв і вище 0,35 МПа розряд не спостерігався при даному типові розрядного пристрою, тому результати для цих тисків не наведені (продувку додатково проводили до 0,6 МПа для уточнення можливості появи розряду при високому тиску продувного газу).

Зареєстровані результати виміру величини «активізації» газового потоку від параметрів формування розряду наведені на рис. 5. Перш за все проаналізовано вплив відстані між електродами — довжини дуги, на силу іонізаційного потоку. Встановлено, що для тиску продувного газу 0,1—0,15 МПа збільшення відстані між електродами (довжини дуги) відбивалося у збільшенні сили струму «активізованого» потоку. Проте ці величини тиску газу досить низькі для умов реальної продувки. При більших величинах тиску продувного газу встановлено, що сила струму «активізованого» потоку від довжини дуги має нелінійний характер із максимізацією показників при відстані між електродами 12—18 мм. При цьому чим більше тиск продувного газу, тим при меншій відстані між електродами сила струму набуває максимальних значень. Крім того слід відзначити, що максимальні величини сили струму «активізованого» потоку відповідають тиску продувного газу 0,25 МПа — тиску, вище якого починає «зникати» видима дуга.

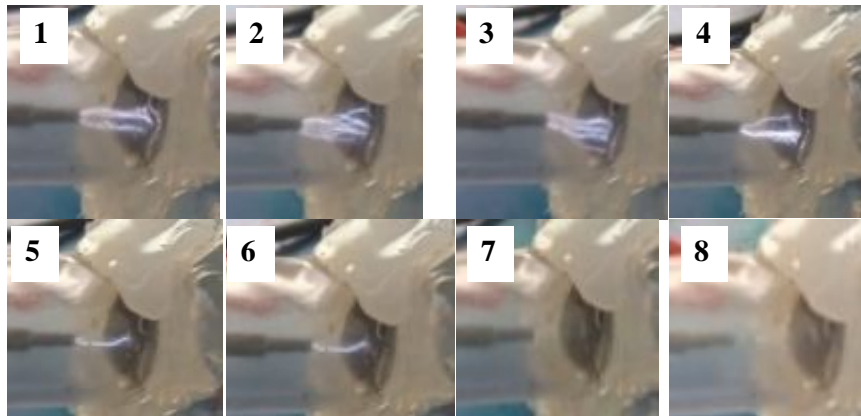


Рис. 4. Характерні фото розряду між електродами при відстані 18 мм під час подачі продувного газу із тиском: 1 — 0,1 МПа, 2 — 0,15 МПа, 3 — 0,2 МПа, 4 — 0,25 МПа, 5 — 0,3 МПа, 6 — 0,35 МПа, 7 — 0,4 МПа, 8 — 0,45 МПа

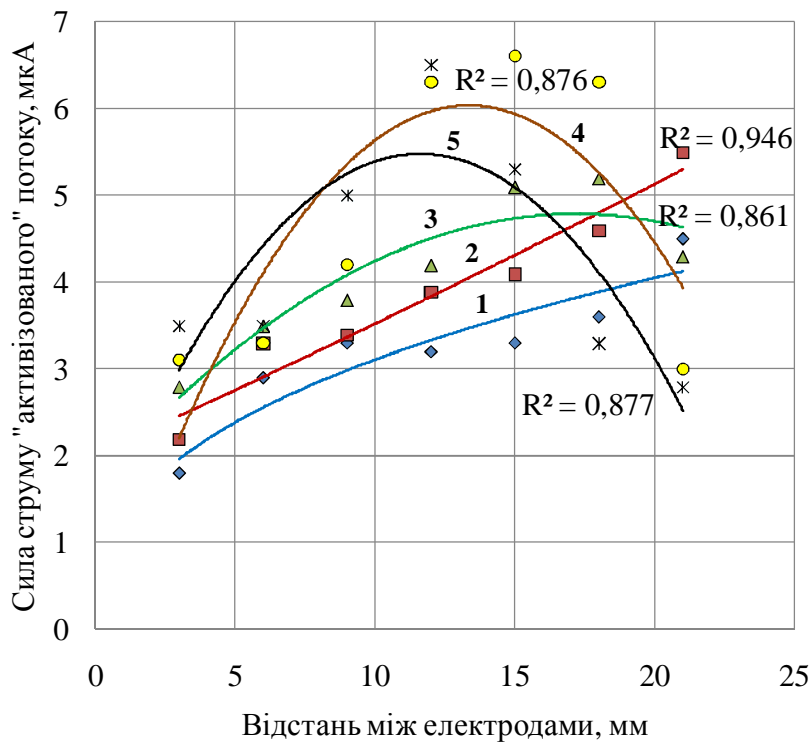


Рис. 5. Залежність сили струму іонізаційного потоку від відстані між електродами при різній величині тиску продувного газу: 1 — 0,1 МПа, 2 — 0,15 МПа, 3 — 0,2 МПа, 4 — 0,25 МПа, 5 — 0,3 МПа

На другому етапі було досліджено варіант розрядного пристрою із електродом, що висувається вперед (виступаючий заізолюваний електрод). Було встановлено, що у такому варіанті протяжність розрядної дуги значно збільшилася при тих же відстанях між електродами через мимовільне наведення розряду додатково всередині камери, не дивлячись на ізоляцію. Узагальнені результати проведених дослідів наведені на рис. 6. Перш за все слід відзначити, що при використанні цього типу розрядного пристрою була можливість провести досліди з широким діапазоном тиску продувного газу (до 0,6 МПа), що було значною відмінністю від попере-

дніх дослідів, де вже при тиску більше 0,3 МПа розряд просто зникав. Другою значною відмінністю були отримані значення сили струму іонізаційного потоку: на порядок більше, ніж при використанні першого типу розрядного пристрою. Крім того слід відзначити, що у цьому варіанті не було отримано оптимуму за величиною, а спостерігалось зростання сили струму при збільшенні відстані між електродами.

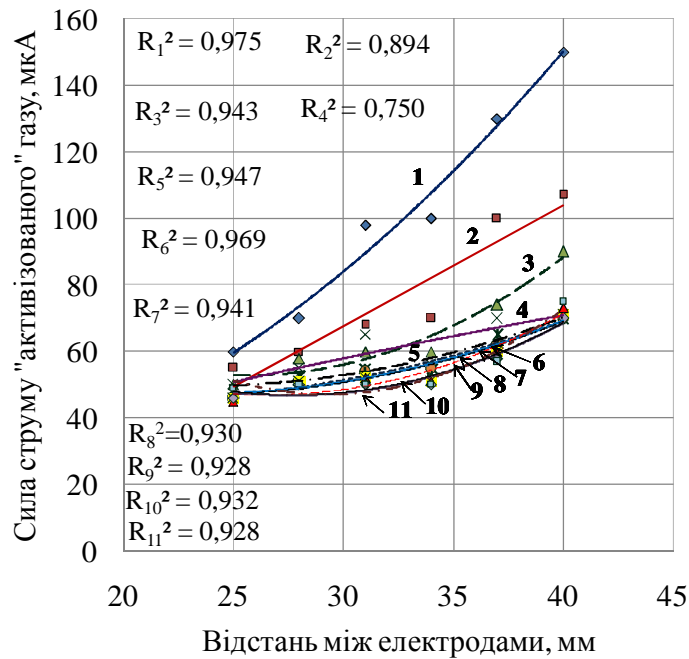


Рис. 6. Залежність сили струму іонізаційного потоку від відстані між електродами при використанні другого типу розрядного пристрою при різній величині тиску продувального газу: 1 — 0,1 МПа, 2 — 0,15 МПа, 3 — 0,2 МПа, 4 — 0,25 МПа, 5 — 0,3 МПа, 6 — 0,35 МПа, 7 — 0,4 МПа, 8 — 0,45 МПа, 9 — 0,5 МПа, 10 — 0,55 МПа, 11 — 0,6 МПа

Також було відмічено, що при збільшенні тиску продувального газу сила струму активізованого газу не збільшувалася, а навпаки, знижувалася: спочатку інтенсивно — при збільшенні тиску з 0,1 до 0,3 МПа, потім інтенсивність зниження сили струму значно зменшилася і отримані залежності при тиску продувального газу від 0,3 до 0,45 МПа дуже близькі, а при подальшому збільшенні тиску з 0,5 до 0,6 МПа знову декілька почала знижуватись. Тобто використання даного типу розрядного пристрою є більше ефективним для активізації нітрогеновмісного газу, а найбільш ефективною є продувка з низьким тиском продувального газу.

#### Висновки

На фізичному стенді, що моделює ділянку фурми для подачі активованого газу шляхом використання різних типів розрядних пристроїв закритого типу було проаналізовано вплив тиску та довжини дуги на ефективність процесу іонізації потоку нітрогеновмісного газу (на прикладі повітря). Встановлено, що у разі використання розрядного пристрою із зануреним електродом сила струму, що формує активований газ, від відстані між електродами має квадратичну залежність з максимумом при відстані близько 15 мм та тиску продувального газу 0,25—0,3 МПа. При використанні розрядного пристрою із висувним електродом отримані значно вищі показники сили іонізованого струму, які зростають при збільшенні дистанції розряду — із найкращими показниками при низьких продувних тисках. Тобто варіант розрядного пристрою із висувним електродом більш перспективний з точки зору активізації нітрогеновмісного газового потоку.

### Список використаної літератури

1. Gavreljuk V.G., Bems H. High nitrogen steel. Structure, properties, manufacture, application. Berlin: Springer, 1999, 300 p.
2. Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями: підручник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008, 348 с.
3. Руденко Л.Ф., Говорун Т.П. Леговані сталі та сплави: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2012, 171 с.
4. Сігова В.І., Хижняк В.Г., Курило Н.А. Азототитанування конструкційних та інструментальних сталей. *Вісник СумДУ. Технічні науки*. 2007. № 2. С. 73–79.
5. Пройдак Ю.С., Підгорний С.М., Трегубенко Г.М., Паляков Г.А., Палаш Б.В. Дослідження кінетики азотування мало- та безнікельових корозійностійких сталей в твердому стані. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 2. С. 22–29.
6. Jang J.M., Kim D.H., Paek M.K. Nitrogen solubility in cast iron containing C, Si and Mn. *ISIJ International*. 2018. Vol. 58, No. 7. P. 1185–1190.
7. Jung-Mock JANG, June-Yong EOM, Min JIANG, Min-Kyu PAEK, Jong-Jin PAK Nitrogen solubility in liquid manganese alloys containing silicon, iron and Carbon. *ISIJ International*. 2013. Vol. 53, No. 5. P. 768–773.
8. Jung-Mock JANG, Min-Kyu PAEK, Jong-Jin PAK Thermodynamics of nitrogen solubility and AlN formation in multi-component high Mn steel melts. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57, No. 10. P. 1821–1830.
9. Min-Kyu Paek, Saikat Chatterjee, Jong-Jin Pak, In-Ho Jung Thermodynamics of nitrogen in Fe-Mn-Al-Si-C alloy melts. *Metallurgical and materials transactions B*. 2016. Vol. 47. P.1243–1262.
10. Rabinovich A.V., Zaslavskii Ya.B., Tregubenko G.N. Use of new high-strength corrosion-resistant steels alloys with nitrogen in the manufacture of multilayer bellows. *Chemical and petroleum engineering*. 1993. Vol. 6. P.30–32.
11. Воденніков С.А., Галицький Ю.П., Воденнікова О.С. Теорія та технологія електросталеплавильного виробництва: навчальний посібник. Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2010, 246 с.
12. Gaye, H., Huin, D., Riboud, P.V. Nitrogen alloying of carbon and stainless steels by gas injection. *Metall Mater Trans B*. 2000. Vol. 31. P. 905–912.
13. Jacques Foc, Charlotte S Becquart. High nitrogen steel and interstitial alloying. *Materials science forum*. 2003. Vol. 8. P. 161–170.
14. Азотовмісна лігатура: пат. 43747 У Україна: МПК (2009) C22C 35/00. № u200903896; заявл. 21.04.09; опубл. 25.08.09, Бюл. № 16. 6 с.
15. Gizatulin R.A., Kozyrev N.A., Saprykin Alexander, Sheshukov O.Yu. Nitrogen alloying of steel by blowing in the ladle through bottom and submersible tuyeres. *Applied mechanics and materials*. 2015. Vol. 6. P. 14–18.
16. Спосіб одержання азотовмісної лігатури: пат. 59276 А Україна: МПК(7) C22C35/00. № 20021210430; заявл. 23.12.02; опубл. 15.08.03, Бюл. № 8. 8 с.
17. Lakomsky V.I. Alloying liquid metal with nitrogen from an electric arc plasm. Cambridge: International science publishing, 1999. 223 p.
18. Семикін С.І., Голуб Т.С., Прокопенко П.Г. Стендове дослідження особливостей електрофізичної активізації газового кислородвміщуючого струменя. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Дніпро. 2019. № 22. С. 94–103.
19. Курс фізики: У 3 кн.: Кн. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / Г.Ф. Богуш, Є.Ф. Венгер. – Київ: Вища школа, 2003. 278 с.
20. Yuri P. Raizer. Gas discharge physics. Berlin: Springer-Verlag. 2011. 460 p.
21. Howatson A. M. An introduction to gas discharges. Oxford: Pergamon Press, 1976. 244 p.
22. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: science and engineering — an overview. *Surface and coatings technology*. 2007. Vol. 8. P. 1–32.
23. Kozhevnikov O.E., Pylypenko M.M., Stadnik Yu.S., Azhazha R.V. Zone refining of zirconium in an electric field. *PAST*. Kharkiv. 2020. № 125. P. 27–34.

24. Tsvetkov Yu.V. Plasma metallurgy: current state, problem and prospects. *Pure Appl. Chem.* 1999. Vol. 71, No. 10. P. 1853–1862.
25. Mihovsky M. Thermal plasma application in metallurgy. *Journal of the University of chemical technology and metallurgy.* 2010. Vol. 45, No 1. P. 3–18.
26. Критська Т.В., Туришев К.О., Таранець А.В. Екологічні та технічні перспективи застосування кисню й озону. *Металургія.* Запоріжжя. 2016. № 36. С 119–122.
27. Stetter J.R., Korotcenkov G., Zeng X., Tang Y., Liu Y. *Chemical Sensors: Comprehensive Sensor Technologies.* Vol. 5. Electrochemical and Optical Sensors. – New York: Momentum Press, 2011. P.1–89.

## RESEARCH AND EVALUATION OF THE METHOD OF ACTIVATION OF THE GAS FLOW FOR ALLOYING WITH GASEOUS NITROGEN"

### Abstract

Increasing the strength of steels and improving their operational qualities is one of the main tasks contributing to solving the issue of reliability, durability of parts and structures. Alloying, including nitrogen, occupies a special place among the large number of ways to improve the properties of steels.

Nitrogen, as an alloying element, has been known for a long time, and its sufficiently high content in the atmosphere makes nitrogen even more attractive to technologists. However, it has limited solubility in iron alloys, especially with a high content of other components.

There are various methods of gas activation, but in order to ensure relatively low energy costs and having positive experience of works on electric high-voltage activation of oxygen, it was proposed an option of activation by creating an electric brush discharge.

The research was carried out on a physical bench that simulates the section of the lance at the outlet for the supply of activated gas when using different types of closed-type discharge devices. The devices differed by the arrangement of one of the electrodes: with a submerged non-insulated electrode and a protruding almost completely insulated electrode. The effect of purge gas pressure and arc length (distance between electrodes) on the efficiency of the nitrogen-containing gas flow ionization process (using air as an example) was analyzed. It was established that when using a discharge device with a submerged electrode, the current strength that forms the activated gas has a quadratic function on the distance between the electrodes with a maximum at a distance of about 15 mm and a purge gas pressure of 0.25–0.3 MPa. With a further increase in pressure, the visible discharge disappears and the current decreases.

When using a discharge device with a protruding electrode, much higher indicators of the strength of the ionized current were obtained while maintaining a visual discharge even at high pressures of the purging gas (0.6MPa). At the same time, the current strength increases with an increased discharge distance — with the highest values at low blow-by pressures. That is, the version of the discharge device with a protruding electrode is more promising from the point of view of activation of the nitrogen-containing gas stream.

### References

- [1] Gavreljuk V.G. & Bems H. (1999). *High nitrogen steel. Structure, properties, manufacture, application.* Berlin: Springer. [in English].
- [2] Kutsova V.Z., Kovzel M.A. & Nosko O.A. (2008). *Lehovani stali ta splavy z osoblyvymy vlasty-vostiamy: pidruchnyk [Alloy steels and alloys with special properties: a textbook].* Dnipropetrovsk: NMetAU. [in Ukrainian].
- [3] Rudenko L.F. & Hovorun T.P. (2012). *Lehovani stali ta splavy: navch. posib [Alloy steels and alloys: teaching. manual].* Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet. [in Ukrainian].



- [4] Sihova V.I., Khyzhniak V.H. & Kurylo N.A. (2007). Azototytanuvannia konstruktsiinykh ta instrumentalnykh stalei [Nitriding of structural and tool steels]. *Visnyk SumDU. Tekhnichni nauky – Bulletin of Sumy State University. Technical sciences*, 2, 73–79. [in Ukrainian].
- [5] Proidak Yu.S., Pidhornyi S.M., Trehubenko H.M., Paliakov H.A. & Palash B.V. (2021). Doslidzhennia kinetyky azotuvannia malo- ta beznikelyvykh koroziiostiikykh stalei v tverdomu stani [Study of nitriding kinetics of low- and nickel-free corrosion-resistant steels in the solid state]. *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and practice of metallurgy*, 2, 22–29. [in Ukrainian].
- [6] Jang J.M., Kim D.H. & Paek M.K. (2018). Nitrogen solubility in cast iron containing C, Si and Mn. *ISIJ International*, 58 (7), 1185–1190. [in English].
- [7] Jung-Mock JANG, June-Yong EOM, Min JIANG, Min-Kyu PAEK & Jong-Jin PAK (2013). Nitrogen solubility in liquid manganese alloys containing silicon, iron and Carbon. *ISIJ International*, 53 (5), 768–773. [in English].
- [8] Jung-Mock JANG, Min-Kyu PAEK & Jong-Jin PAK (2017). Thermodynamics of nitrogen solubility and AlN formation in multi-component high Mn steel melts. *ISIJ International*, 57 (10), 1821–1830. [in English].
- [9] Min-Kyu Paek, Saikat Chatterjee, Jong-Jin Pak & In-Ho Jung (2016). Thermodynamics of nitrogen in Fe-Mn-Al-Si-C alloy melts. *Metallurgical and materials transactions B*, 47, 1243–1262. [in English].
- [10] Rabinovich A.V., Zaslavskii Ya.B. & Tregubenko G.N. (1993). Use of new high-strength corrosion-resistant steels alloys with nitrogen in the manufacture of multilayer bellows. *Chemical and petroleum engineering*, 6, 30–32. [in English].
- [11] Vodennikov S.A., Halytskyi Yu.P. & Vodennikova O.S. (2010). *Teoriia ta tekhnolohiia elektrostaleplavlynoho vyrobnytstva: navchalnyi posibnyk [Theory and technology of electric steelmaking: a study guide]*. Zaporizhzhia: Vydavnytstvo Zaporizkoi derzhavnoi inzhenernoi akademii. [in Ukrainian].
- [12] Gaye, H., Huin, D. & Riboud, P.V. (2000). Nitrogen alloying of carbon and stainless steels by gas injection. *Metall Mater Trans B*, 31, 905–912 [in English].
- [13] Jacques Foct & Charlotte S Becquart. (2003). High nitrogen steel and interstitial alloying. *Materials science forum*, 8, 161–170. [in English].
- [14] Azotovmisna liatura: pat. [Nitrogen containing alloy] 43747 U Ukraina: MPK (2009) S22S 35/00. № u200903896; zaiavl. 21.04.09; opubl. 25.08.09, Biul.№ 16. [in Ukrainian].
- [15] Gizatulín R.A., Kozyrev N.A., Saprykin Alexander & Sheshukov O.Yu. (2015). Nitrogen alloying of steel by blowing in the ladle through bottom and submersible tuyeres. *Applied mechanics and materials*, 6, 14–18. [in English].
- [16] Sposib oderzhannia azotovmisnoi liatury [Method of maintaining a nitrogen-containing ligature]: pat. 59276 A Ukraina: MPK(7) S22S35/00. № 20021210430; zaiavl. 23.12.02; opubl. 15.08.03, Biul.№ 8. [in Ukrainian].
- [17] Lakomsky V.I. (1999). *Alloying liquid metal with nitrogen from an electric arc plasm*. Cambridge: International science publishing. [in English].
- [18] Semykin S.I., Golub T.S. & Prokopenko P.H. (2019). Stendove doslidzhennia osoblyvosti elektrofizychnoi aktyvizatsii hazovoho kyslorodvmishchuiuchoho strumenia [Bench study of the features of electrophysical activation of a gas oxygen-containing flow]. *Suchasni problemy metalurhii. Naukovi visti – Modern problems of metallurgy. Scientific news*, 22, 94–103. [in Ukrainian].
- [19] Bohush H.F. & Venher Ye.F. (2003). *Kurs fizyky: U 3 kn.: Kn. 2. Elektryka i mahnetyzm [Physics course: Electricity and magnetism]: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
- [20] Yuri P. Raizer. (2011). *Gas discharge physics*. Berlin: Springer-Verlag. [in English].
- [21] Howatson A. M. (1976) *An introduction to gas discharges*. Oxford: Pergamon Press. [in English].
- [22] Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O. & Ryabkov D. (2007). Electrolytic plasma technology: science and engineering—an overview. *Surface and coatings technology*, 8, 1–32. [in English].
- [23] Kozhevnikov O.E., Pylypenko M.M., Stadnik Yu.S. & Azhazha R.V. (2020). Zone refining of zirconium in an electric field. *PAST*, 125, 27–34. [in English].
- [24] Tsvetkov Yu.V. (1999). Plasma metallurgy: current state, problem and prospects. *Pure Appl. Chem*, 71 (10), 1853–1862 [in English].

- [25] Mihovsky M. (2010). Thermal plasma application in metallurgy. *Journal of the University of chemical technology and metallurgy*, 45 (1), 3–18 [in English].
- [26] Krytska T.V., Turyshev K.O. & Taranets A.V. (2016). Ekolohichni ta tekhnichni perspektyvy zastosuvannia kysniu y ozonu [Ecological and technical prospects of oxygen and ozone application]. *Metalurhiia – Metallurgy*, 36, 119–122. [in Ukrainian].
- [27] Stetter J.R., Korotcenkov G., Zeng X., Tang Y. & Liu Y. (2011). *Chemical Sensors: Comprehensive Sensor Technologies. Vol. 5. Electrochemical and Optical Sensors*. New York: Momentum Press, 1–89. [in English].

Надійшла до редколегії 24.10.2023