

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИПЛАВКИ ВИСОКОАЗОТИСТОЇ СТАЛІ X21Г17АН2 У ПЛАЗМОВО-ДУГОВІЙ ПЕЧІ

В.Р. Бурнашев, Ю.О. Никитенко, В.В. Якуша, І.В. Шейко, Д.М. Жиров

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Головною відмінною рисою плазово-дугового перепау з формуванням зливка у мідному кристалізаторі, що охолоджується, є можливість обробляти рідкий метал газом. Перепау у газовому середовищі, що містить азот, дозволяє здійснювати легування азотом безпосередньо з газової фази. На прикладі перепау економнолегованої нікелем хромомарганцевої сталі X21Г17АН2 показана висока ефективність легування азотом із газової фази під час плазово-дугового перепау та наведені деякі особливості такої технології. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: плазово-дуговий перепау; високоазотиста сталь; стандартна розчинність; виплавка; якість

Сталі аустенітного класу, що мають високу міцність, корозійну та підвищену релаксаційну стійкість, знаходять широке застосування в промисловості для виготовлення виробів відповідального призначення, дроту, канатів, пружних елементів турбогенератора, а також матеріалів для зварювання елементів виробів з високоазотистих сталей. Азот, як аустенізуєчий елемент, є заміником нікелю. У більшості випадків сталі містять 8...10 % Ni і можуть бути замінені на леговані азотом малонікелеві або безнікелеві сталі з такими ж або більш високими властивостями. Крім того нікель є алергеном, що також стимулює розширення застосування безнікелевих сталей зі спеціальними властивостями: стійких в біоактивних середовищах, бактерицидних, високоміцних, конструкційних та ін. [1].

Високоазотисті аустенітні сталі можуть бути застосовані для виготовлення холоднокатаного нержавіючого дроту з межею міцності понад 2000 МПа. Прикладом для перспективного застосування таких сталей є виготовлення високоміцних тросів, експлуатованих в морській воді, газоконденсатних родовищах з підвищеним вмістом сірководню, дротів для бронювання морських кабелів.

Відомі у світовій практиці способи виплавки високоазотистих сталей наступні:

обробка рідкого металу газовим противотиском [2]; електрошлаковий перепау під тиском (ЕШПТ) [1, 3]; плазово-дуговий перепау (ПДП) [4–9], які характеризуються різною ефективністю легування сталі азотом з газової фази.

Авторами роботи [4] проведено аналіз ефективності азотування вищевказаними способами, який показав, що найкращим є плазово-дуговий перепау. ПДП забезпечує більш високу ефективність легування сталі азотом при низькому тиску газу

($P_{N_2} = 60 \dots 120$ кПа) для хромомарганцевих сталей економнолегованих нікелем типу X21Г10АН4. При таких парціальних тисках вміст азоту перевищує стандартну його розчинність. Для способу противотиску такий вміст азоту можливо отримати при $P_{N_2} = 210 \dots 530$ кПа для аналогічних сталей. Для способу ЕШПТ необхідний тиск становить 3000 кПа. При цьому розподіл азоту за висотою і перетином зливка ПДП досить однорідний. Максимальний розкид абсолютних величин вмісту азоту становить по висоті 0,06 %, по перетину — 0,03 %. Для способу противотиску розкид вмісту азоту за висотою і перетином — 0,1 % [2].

При виплавці азотовмісних сталей при ПДП необхідно розраховувати вміст азоту в залежності від концентрації легуючих елементів і супутніх домішок, а також в залежності від температури в зоні реакції.

З огляду на наведені вище теоретичні передумови, а також розрахункові та експериментальні дані автори роботи [7] запропонували для розрахунку розчинності азоту в багатокомпонентному сплаві на основі заліза в широкому діапазоні температур і концентрацій легуючих елементів наступну формулу:

$$\lg K_N^{\Sigma} = -\frac{293}{T} - 1,16 - \left\{ \left(\frac{3757}{T} - 0,81 \right) \times \sum e_{N,2073K}^R [R, \%] + \left(\frac{5132}{T} - 1,48 \right) \frac{1}{2} \times \sum r_{N,2073K}^R [R, \%]^2 + \frac{1}{6} \sum q_{N,2073K}^R [R, \%]^3 \right\}. \quad (1)$$

У даній роботі для досліджень була обрана хромомарганцева сталь, економнолегована нікелем марки X21Г17Н2. Завдання поставлене в цих дослідженнях — отримати в сталі надрівноважний

В.Р. Бурнашев — <https://orcid.org/0000-0001-6807-3810>, Ю.О. Никитенко — <https://orcid.org/0000-0002-3603-2333>,

В.В. Якуша — <https://orcid.org/0000-0001-5962-9194>, Д.М. Жиров — <https://orcid.org/0000-0002-9435-8075>

Таблиця 1. Хімічний склад отриманих заготовок, мас. %

Номер зливка	Cr	Mn	Ni	C	S	P	O	N
1	21,2	17,1	2,2	0,1	0,025	0,02	0,04	0,017
2	21,6	17,6	3,3	—>—	—>—	—>—	0,05	—>—
3	21,5	16,8	3,0	—>—	—>—	—>—	—>—	0,016

вміст азоту (0,6...0,7 %) і відповідно аустенітну структуру. У разі перевищення рівня стандартної розчинності в 1,5...2,0 рази можна отримати чисто аустенітну структуру для тих сталей, які в разі відсутності азоту містять до 80 % фериту [8].

Для проведення досліджень було виплавлено 3 зливки вагою 25 кг кожен в індукційній тигельній печі ємністю 35 кг. У проведених дослідженнях використовували наступні матеріали: хром марки Х98, залізо Армко, нікель катодний марки Н0, марганець металевий МР-1.

В результаті були отримані зливки наступного хімічного складу (табл. 1).

За отриманими результатами хімічного аналізу відлитих заготовок сталі Х21Г17Н2 була розрахована стандартна розчинність азоту в цій сталі в

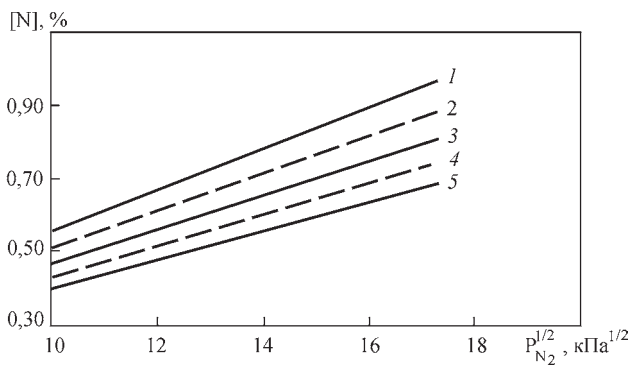


Рис. 1. Залежність розчинності азоту в сталі Х21Г17Н2 від парціального тиску азоту та температури розплаву, К: 1 — 1873; 2 — 1923; 3 — 1973; 4 — 2023; 5 — 2073

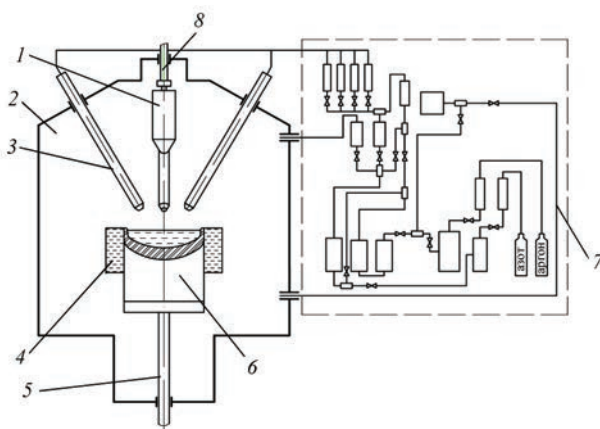


Рис. 2. Принципова схема плазмово-дугової печі УПП-3 з системою газоочистки: 1 — витратна заготовка; 2 — плавильна камера; 3 — плазмотрон; 4 — кристалізатор; 5 — механізм витягування зливки; 6 — зливок; 7 — система газоочистки; 8 — механізм подачі витратної заготовки

залежності від парціального тиску азоту і температури розплаву (рис. 1).

Підставивши значення параметрів взаємодії, наведені в роботах [5–8] в вираз (1), авторами роботи [5] отримана формула для визначення розчинності азоту в хромомарганцевій сталі, економнолегованої нікелем. Розчинність азоту в сталі Х21Г17Н2 розраховували за формулою:

$$\begin{aligned} \lg k = & -\frac{293}{T} - 1,16 - \left(0,042 - \frac{167}{T}\right)[Cr\%] - \\ & - 0,5 \left(\frac{3,3}{T} - 0,001\right)[Cr\%]^2 - \left(0,022 - \frac{73}{T}\right)[Mn\%] - \\ & - \left(\frac{18,4}{T} + 0,00042\right)[Ni\%] - \left(\frac{171}{T} - 0,031\right)[Si\%] - \\ & - \left(\frac{274}{T} - 0,06\right)[C\%] - \left(\frac{1640}{T} - 1,14\right)[O\%] - \\ & - \left(\frac{859}{T} - 0,487\right)[Al\%]. \end{aligned} \quad (2)$$

З наведених результатів розрахунку видно, що з підвищенням температури розчинність азоту в сталі Х21Г17Н2 знижується на 70 %, а при підвищенні парціального тиску збільшується на 58 %.

Отримані результати були використані при розробці технологічних режимів переплавки зливок сталі Х21Г17Н2 на плазмово-дуговій установці УПП-3 (рис. 2).

Плазмово-дугову піч оснащено чотирма дуговими плазмотронами. Сумарна потужність плазмотронів становить 160 кВт. Енергетичні можливості печі дозволяють виплавити зливки діаметром 125 мм і масою до 50 кг.

Дослідні плавки сталі на печі УПП-3 здійснювали в газових сумішах, до складу яких входили аргон і азот. Перед кожною плавкою після герметизації плавильної камери з неї відкачували атмосферне повітря, а потім заповнювали газовою сумішшю відповідного складу до заданого тиску. Газовий режим плавки наведено в табл. 2.

Плавку проводили наплавленням металу на мідний водоохолоджуваний піддон. Після включали механізм витягування заготовки, в результаті її проходження через мідний водоохолоджуваний кристалізатор формувалася зливка. В процесі переплавки підтримували постійні швидкості витягування, електричні та газові режими.

Таблиця 2. Газовий режим дослідних плавок

Тиск в плавильній камері, кПа		Склад газової суміші	Парціальний тиск азоту під час плавки, кПа
після відкачки	під час плавки		
0,1	150	Ar + N	130
→—	200	→—	170
→—	220	→—	190

Під час переплаву витратних заготовок швидкість витягування зливок підтримували в межах 4...6 мм/хв. Діаметр виплавлених зливок становив 100 мм, довжина — 400...600 мм (рис. 3).

Отримані зливки мали рівну поверхню без ознак дефектів металургійного походження. Дослідженнями темплету головної частини одного із зливок було встановлено, що усадочна раковина відсутня і метал, незважаючи на високий вміст азоту, щільний, без ознак шпарин та рихлості.

В обсязі даної роботи було досліджено розподіл азоту по перетину і висоті зливок. Для першого зливка, який виплавлено в умовах загального тиску у плавильній камері 150 кПа, вміст азоту по його перетину і висоті становив в середньому 0,408...0,423 мас. %, тобто вміст азоту не перевищував його стандартну розчинність у даній сталі. Для другого зливка, що виплавлено при тиску в плавильній камері 200 кПа, вміст азоту становив 0,64...0,68 мас. %, що на 12...27 % перевищує значення стандартної розчинності. Подальше підвищення тиску в плавильній камері до 220 кПа мало позначилося на зростанні вмісту азоту в металі зливка (0,698...0,700 мас. %).

Таким чином, результати виконаних досліджень однозначно показали, що під час плазово-дугового переплаву витратних заготовок в газовому середовищі, що містить азот, відбувається інтенсивне поглинання азоту із газової фази рідким металом. Так, вміст азоту в зливках сталі Х21Г17АН2 становить від 0,408 до 0,700 % залежно від парціального тиску азоту в плавильній камері під час плавки. Цей показник в десятки разів більший, ніж у вихідному металі витратних заготовок (0,017 %). Вміст азоту в зливках під час плазово-дугового переплаву регулюється зміною парціального тиску азоту у плазмоутворюючому газі, загального тиску у плавильній камері печі та швидкості витягування зливка.

Проведені дослідження показали, що плазово-дуговий переплав забезпечує досить високу чистоту сталі з понадрівноважним вмістом азоту. Оптимальне легування сталі Х21Г17Н2 азотом може бути здійснено на основі розрахунків розчинності азоту в ній, граничної концентрації та



Рис. 3. Зовнішній вигляд зливка ПДП із сталі Х21Г17АН2 експериментальної перевірки, відсутності азотної рихлості і пористості зливок і забрудненості сталі неметалевими включеннями.

Список літератури

- Свяжин А.Г., Капуткина Л.М. (2019) Азотистые и высокоазотистые стали. Промышленные технологии и свойства. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 63(3), 173–187.
- Рашев Ц. (1995) *Высокоазотистые стали*. Металлургия под давлением. София.
- Громов В.И., Вознесенская Н.М., Леонов А.В. (2019) Новая подшипниковая сталь ВКС241 и стали со сверхравновесным содержанием азота. *Всерос. науч.-техн. конф.: «Высокопрочные стали для аэрокосмической техники и технологии их производства»*, 06.09.2019, г. Москва, сс. 39–45. Электронное издание.
- Афанасьев Н.Д., Жданович К.К. (1990) Плазменно-дуговой переплав высокоазотистых сталей. *Тр. I Всесоюз. конф. «Высокоазотистые стали»*. Киев, Институт металлофизики НАН Украины, сс. 256–260.
- Бурнашев В.Р. (2006) *Совершенствование плазменно-дуговой гарнисажной плавки специальных сталей и чистых металлов*. Дис. ... канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, 168.
- Лакомский В.И. (1992) *Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах*. Киев, Наукова думка.
- Григоренко Г.М., Помарин Ю.М. (1989) *Водород и азот в металлах при плазменной плавке*. Киев, Наукова думка.
- Клюев М.М. (1979) *Плазменно-дуговой переплав*. Москва, Металлургиздат.
- Патон Б.С., Григоренко Г.М., Шейко И.В. и др. (2013) *Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве*. Киев, Наукова думка.

References

- Skvyazhin, A.G., Kaputkina, L.M. (2019) Nitrogen and high-nitrogen steels. *Izv. Vuzov, Chyornaya Metallurgiya*, 63(3), 173–187 [in Russian].
- Rashev, Ts. (1995) High-nitrogen steels. In: *Metallurgy under pressure*. Sofia [in Russian].
- Gromov, V.I., Voznesenskaya, N.M., Leonov, A.V. (2019) New bearing steel VKS241 and steels with super-equilibrium content of nitrogen. In: *Proc. of All-Russ. Sci.-Techn. Conf. on High-Strength Steels for Aerospace Engineering and Technologies of their Production (06.09.2019, Moscow)*, 39–45 [in Russian].
- Afanasyev, N.D., Zhdanovich, K.K. (1990) Plasma-arc remelting of high-nitrogen steels. In: *Proc. of 1st All-Union Conf. on High-Nitrogen Steels*. Kiev, IPM, 256–260 [in Russian].

5. Burnashev, V.R. (2006) Improvement of plasma-arc skull melting of special steels and pure metals. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].
6. Lakomsky, V.I. (1992) Interaction of diatomic gases with liquid metals at high temperatures. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Grigorenko, G.M., Pomarin, Yu.M. (1989) Hydrogen and nitrogen in metals during plasma melting. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Klyuev, M.M. (1979) Plasma-arc remelting. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
9. Paton, B.E., Grigorenko, G.M., Shejko, I.V. et al. (2013) Plasma technologies and equipment in metallurgy and foundry. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

SOME ASPECTS OF MELTING HIGH-NITROGEN STEEL Kh21G17AN2
IN PLASMA ARC FURNACE

V.R. Burnashev, Yu.O. Nikitenko, B.B. Yakusha, I.V. Shejko, D.M. Zhirov
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The main distinctive feature of plasma-arc remelting with formation of an ingot in a cooled copper mould is the ability to treat liquid metal with gas. Remelting in a gaseous medium containing nitrogen, allows doping with nitrogen directly from the gas phase. The high efficiency of nitrogen doping from the gas phase during plasma-arc remelting is shown on the example of remelting chromium-manganese steel Kh21G17AN2, sparsely alloyed by nickel, and some peculiarities of such technology are given. Ref. 9, Table. 2, Fig. 3.

Key words: plasma-arc remelting; high-nitrogen steel; standard solubility; smelting; quality

Надійшла до редакції 16.01.2020

XII Міжнародна спеціалізована виставка

КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК





**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
тел.: (044) 201-11-58, 201-11-65, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua,
plast@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

24–27 листопада 2020

Генеральний інформаційний партнер:



Ексклюзивний медіа партнер:



Технічний партнер:





Düsseldorf, Germany

join the best: 07 - 11 December 2020

