

**ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ АЗОТОМ ПРИ ПРОДУВКЕ В КОВШЕ
ЧЕРЕЗ ДОННЫЕ И ПОГРУЖАЕМЫЕ ФУРМЫ**

*Р.А. Гизатулин **, д.т.н., проф., *Н.А. Козырев ***, д.т.н., проф., *А.А. Сапрыкин**, к.т.н.,
*О.Ю. Шешуков *****, к.т.н., доц., *Д.А. Дудихин **, студ.

** Юргинский технологический институт (филиал)*

*Национального исследовательского Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

*** Сибирский государственный индустриальный университет*

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, тел.: (384) 346-35-02

**** Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина*

620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира 19, тел.: (343) 350-74-01

***** Институт металлургии УрО РАН*

620016, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, тел.: (343) 267-91-24

E-mail: gizatulin@tpu.ru

Использование молекулярного азота для насыщения стали представляет значительный интерес ввиду его низкой стоимости и простоты процесса. Примеры использования газообразного азота для легирования стали [1] в соответствии с теорией взаимодействия азота с жидкими металлами показывают, что скорость растворения азота и достигаемые его концентрации в металле зависят от многих факторов, в частности, от размеров пузыря.

Процесс легирования стали азотом базируется на растворении его в режиме массопереноса из пузыря в жидкий металл, скорость, которой описывается уравнением [2]

$$v_p = \frac{dC}{d\tau} = \frac{\beta S n}{V} (C_h - C), \quad (1)$$

где C , C_p – текущая и равновесная концентрации, %;

β – средний эффективный коэффициент массопередачи от пузыря к металлу, см/с;

n – среднестатистическое число пузырей;

V – объем металла, см³;

S – поверхность пузыря, см².

Форма большинства пузырей в условиях продувки близка к грибовидной. Площадь поверхности пузыря можно определить как площадь шарового сегмента и выразить ее через радиус эквивалентного по объему шара

$$S = 18,033 \cdot r_3^2. \quad (2)$$

Среднее число пузырей в металле определили по секунднему расходу газа J , приведенному к температуре и среднему давлению в объеме металла, по среднестатистическому объему пузыря, высоте столба металла H над продувочным устройством, средней скорости всплывания пузырей относительно неподвижных координат, которую для стесненного всплывания можно принять равной

$$u = \xi \sqrt{gr_3}, \quad (3)$$

где ξ – постоянный множитель.

Тогда

$$n = \frac{J}{4/3\pi r_3^3} \cdot \frac{H}{\sqrt{gr_3}} \cdot \frac{T}{273} \left(1 + \frac{H}{290}\right). \quad (4)$$

Среднеравновесную концентрацию, достигаемую за время подъема пузыря от продувочного устройства до поверхности металла можно определить, зная константу равновесия и коэффициент активности азота

$$C_p = \frac{K_N}{2f_N} \sqrt{\frac{1+H}{145}} + 1. \quad (5)$$

Константу равновесия определили по формуле

$$\lg K_N = -\frac{188}{T} - 1,25, \quad (6)$$

а коэффициент активности азота – по методу Вагнера [3]

$$\lg f_N = \sum e_i^j [\% i].$$

Средний эффективный коэффициент массопередачи [2, 4]

$$\beta = \frac{D_N}{\delta}, \quad (7)$$

$$\delta = D_N^{0,5} v^{0,15} \sqrt{\frac{r}{W}}, \quad (8)$$

где $W = 10$ см, $r = 1,55$ см [2];
 $D_N = 3,77 \cdot 10^{-5}$ см²/с, $v = 9 \cdot 10^{-3}$ см²/с [4].

Тогда количество растворившегося в металле азота, % [5]

$$N = v_p \cdot \tau, \quad (9)$$

где τ – время продувки, с.

В опытах использовали донные огнеупорные фурмы фирмы «Вайчер» («Veitsher»). Длительность продувки через щелевые фурмы изменяли от 5 до 72 мин при давлении в магистрали от 0,6 до 0,8 МПа и расходе азота от 40 до 70 нм³/ч. Результаты обработки стали азотом приведены в таблице 1.

Отбор проб для определения содержания азота в стали осуществлялся до обработки стали, а также по ходу и после продувки расплава в ковше. Анализ проводили с использованием метода тигель-вакуумной плавки на газоанализаторе фирмы «Strohlein».

Во время продувки происходит значительное насыщение стали азотом. Прирост азота в сталь связан с общим количеством введенного в ковш газообразного азота (рисунок 1). Из рисунка 1 видно, что концентрация азота в стали значительно возрастает при введении более 20 м³ азота, что при расходе от 45 до 60 нм³/ч соответствует 20 мин продувки через донную фурму. В течение этого времени содержание азота прирастает в среднем на 0,005 % и не превышает 0,015 %.

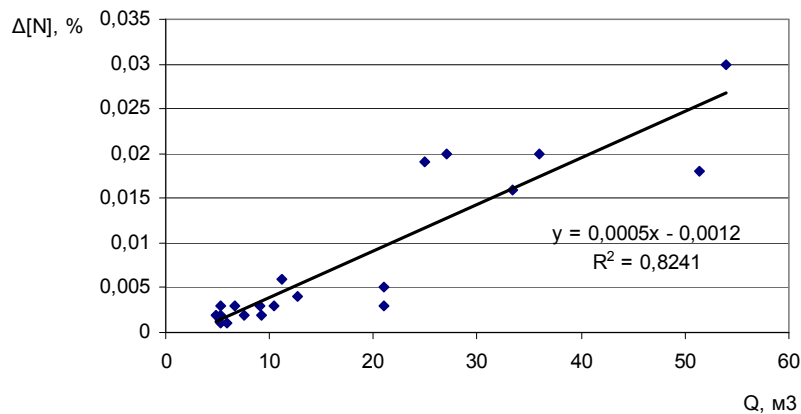


Рис. 1. Зависимость прироста содержания азота в стали и общим количеством введенного газообразного азота

При этом на плавках сравнения (продувка через верхнюю погружаемую фурму) прирост содержания азота за 5 – 15 мин продувки значительно меньше (таблица 2, рисунок 2). При среднем приросте 0,003 % содержание азота после продувки не превышало 0,012 %. В ходе исследования определено, что при введении в сталь в течение 25 – 72 мин более 0,025 % азота наблюдается «рост» слитков, поскольку значительные изменения растворимости азота в железе при фазовых превращениях $\gamma \rightarrow \delta$ и $\gamma \rightarrow \alpha$ ведут к образованию пузырей (таблица 3). В связи с этим при любых способах насыщения жидкого металла азотом предельно возможная концентрация его при условии получения плотного слитка определяется равновесием последних объемов закристаллизовавшегося металла с парциальным давлением азота в окружающей среде при температуре конца кристаллизации. Известно, что азот в стали находится в состоянии твердого раствора и в неметаллической фазе (с нитридообразующими элементами: алюминием, титаном, ванадием и др.) [6, 7].

Литературный анализ позволил установить зависимость образования тугоплавких соединений типа MeC и MeN и их влияния на механические характеристики рельсовой стали. Результаты исследований показали, что тугоплавкие наночастицы карбонитридов, карбидов и нитридов ванадия повышают прочностные характеристики металла (таблица 4), и в особенности увеличения стойкости рельсовой стали при пониженных температурах.

Таблица 1

Результаты продувки через донную фурму

| Марка стали | Длительность продувки, мин | Расход, $\text{нм}^3/\text{ч}$ | Количество вдуваемого азота, нм^3 | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | [N] _{н.} , % | [N] _{к.} , % | $\Delta[\text{N}]$, % | Химический состав шлака, % масс. | | | | | Усвоение [N] _{к.} , % |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|-------|-----------------------------------|------|------------------|--------------------------------|
| | | | | | | | | FeO | CaO | $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ | MnO | SiO ₂ | |
| Ст20 | 14 | 45 | 10,50 | 1565 | 0,007 | 0,010 | 0,003 | 3,93 | 46,52 | 2,45 | 4,39 | 18,99 | 25,00 |
| Ст20 | 25 | 60 | 25,00 | 1570 | 0,007 | 0,026 | 0,019 | 5,25 | 47,62 | 2,45 | 1,54 | 19,44 | 66,80 |
| 5пс | 28 | 45 | 21,00 | 1545 | 0,009 | 0,012 | 0,003 | 4,77 | 51,60 | 2,79 | 4,63 | 18,49 | 12,60 |
| 5пс | 11 | 50 | 9,17 | 1545 | 0,007 | 0,009 | 0,002 | 3,06 | 52,20 | 2,41 | 3,62 | 21,66 | 19,19 |
| 5пс | 6 | 48 | 4,80 | 1555 | 0,006 | 0,008 | 0,002 | 4,16 | 45,20 | 2,39 | 3,80 | 18,91 | 36,67 |
| 5пс | 7 | 50 | 5,83 | 1535 | 0,008 | 0,009 | 0,001 | 3,07 | 51,98 | 2,34 | 3,70 | 22,21 | 13,70 |
| 40X | 12 | 45 | 9,00 | 1550 | 0,007 | 0,010 | 0,003 | 3,67 | 40,26 | 1,61 | 1,70 | 25,00 | 29,30 |
| 3пс | 10 | 45 | 7,50 | 1550 | 0,008 | 0,010 | 0,002 | 4,58 | 46,71 | 2,32 | 2,39 | 20,13 | 23,50 |
| 65Г | 7 | 45 | 5,25 | 1525 | 0,008 | 0,010 | 0,002 | 1,48 | 54,11 | 2,58 | 1,96 | 20,97 | 33,50 |
| 3пс | 7 | 45 | 5,25 | 1560 | 0,009 | 0,010 | 0,001 | 6,75 | 41,44 | 2,15 | 5,97 | 19,27 | 16,80 |
| 5пс | 7 | 45 | 5,25 | 1550 | 0,007 | 0,010 | 0,003 | 6,64 | 39,95 | 2,10 | 5,86 | 19,02 | 50,30 |
| Ст45 | 36 | 60 | 36,00 | 1550 | 0,006 | 0,026 | 0,020 | 3,03 | 53,69 | 2,76 | 3,70 | 19,45 | 48,89 |
| 3пс | 56 | 55 | 51,33 | 1560 | 0,007 | 0,025 | 0,018 | 6,84 | 52,20 | 2,95 | 4,74 | 17,69 | 30,86 |
| Ст50 | 40 | 50 | 33,34 | 1545 | 0,007 | 0,023 | 0,016 | 3,38 | 48,82 | 2,25 | 1,82 | 21,70 | 42,23 |
| 40X | 36 | 45 | 27,00 | 1555 | 0,014 | 0,034 | 0,020 | 1,05 | 57,22 | 3,12 | 0,60 | 18,34 | 65,19 |
| Ст35 | 72 | 45 | 54,00 | 1560 | 0,005 | 0,035 | 0,030 | 2,39 | 49,42 | 2,69 | 2,56 | 18,37 | 48,89 |
| 5пс | 8 | 50 | 6,67 | 1580 | 0,009 | 0,012 | 0,003 | 2,72 | 50,90 | 2,56 | 2,97 | 19,88 | 39,60 |
| 3пс | 15 | 45 | 11,25 | 1560 | 0,007 | 0,013 | 0,006 | 6,25 | 43,90 | 2,27 | 4,39 | 19,33 | 46,90 |
| 3пс | 17 | 45 | 12,75 | 1555 | 0,008 | 0,012 | 0,004 | 5,66 | 43,11 | 2,35 | 5,00 | 18,34 | 27,60 |
| 3пс | 28 | 45 | 21,00 | 1555 | 0,009 | 0,014 | 0,005 | 2,27 | 51,95 | 2,37 | 2,61 | 21,92 | 21,00 |

Таблица 2

Результаты продувки через погрузаемую фурму

| Марка стали | Длительность продувки, мин | Расход, $\text{нм}^3/\text{ч}$ | Количество вдуваемого азота, нм^3 | Температура, °С | [N] _н , % | [N] _к , % | $\Delta[\text{N}]$, % | Химический состав шлака, % масс. | | | | Усвоение [N], % | |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|--|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------------------|-------|-----------------------------------|------|-----------------|------------------|
| | | | | | | | | FeO | CaO | $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ | MnO | | SiO ₂ |
| 5сп | 10 | 45 | 7,50 | 1600 | 0,006 | 0,01 | 0,004 | 2,22 | 53,62 | 2,60 | 1,97 | 20,62 | 46,90 |
| 5сп | 7 | 40 | 4,67 | 1600 | 0,008 | 0,011 | 0,003 | 4,41 | 45,25 | 2,29 | 3,47 | 19,76 | 36,50 |
| 5сп | 10 | 40 | 6,67 | 1585 | 0,008 | 0,011 | 0,003 | 2,99 | 50,56 | 2,41 | 2,43 | 20,98 | 39,58 |
| 3пс | 8 | 45 | 6,00 | 1555 | 0,007 | 0,008 | 0,001 | 2,33 | 35,56 | 2,05 | 3,45 | 17,35 | 14,67 |
| 3пс | 7 | 45 | 5,25 | 1560 | 0,009 | 0,01 | 0,001 | 4,23 | 48,92 | 2,89 | 1,96 | 16,93 | 16,76 |
| 5пс | 7 | 45 | 5,25 | 1545 | 0,009 | 0,01 | 0,001 | 3,67 | 45,87 | 2,58 | 4,00 | 17,78 | 16,76 |
| 5пс | 10 | 45 | 7,50 | 1545 | 0,006 | 0,008 | 0,002 | 2,98 | 53,34 | 2,87 | 2,49 | 18,59 | 23,47 |
| 5пс | 16 | 47 | 12,53 | 1560 | 0,006 | 0,009 | 0,003 | 1,73 | 52,10 | 2,31 | 1,27 | 22,55 | 21,07 |
| 5пс | 12 | 40 | 8,00 | 1550 | 0,009 | 0,012 | 0,003 | 1,90 | 52,11 | 2,30 | 2,08 | 22,66 | 33,00 |
| 5пс | 9 | 42 | 6,30 | 1540 | 0,007 | 0,009 | 0,002 | 7,43 | 45,83 | 2,56 | 4,61 | 17,90 | 27,94 |

Таблица 3

Растворимость азота в стали

| Фаза | Температура, °С | Содержание азота при давлении 10^5 Па, % |
|----------|-----------------|--|
| жидкая | 1536 | 0,0348 |
| δ | 1536 – 1391 | 0,0126 – 0,0106 |
| γ | 1391 – 910 | 0,0222 – 0,0310 |
| α | 910 | 0,0043 |

Таблица 4

Физико-механические свойства рельсов

| | После закалки и отпуска | | | | σ_b , Н/мм ² | $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² | δ , % | ψ , % | КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ² | КСУ ⁻⁶⁰ , Дж/см ² |
|----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------|------------|---|---|
| | НВ ₁₀ | НВ ₂ | НВ ₂ | НВ ₁₀ | | | | | | |
| С обработкой азотом | 363 | 341 | 352 | 363 | 931 | 363 | 11 | 34 | 39 | 37 |
| | 341 – 388 | 321 – 375 | 321 – 375 | 341 – 388 | | | | | | |
| Без обработки азотом | 362 | 346 | 350 | 361 | 862 – 1019 | 367 | 11 | 35 | 38,8 | 31,3 |
| | 341 – 388 | 321 – 375 | 331 – 388 | 341 – 375 | | | | | | |
| | ≥ 341 | ≥ 321 | ≤ 388 | ≤ 388 | ≥ 800 | $\geq 341-401$ | ≥ 8 | ≥ 25 | $\geq 2,5$ | $\geq 2,5$ |

Требования ГОСТ 51685-2000

Числитель – средние значения, знаменатель – минимальные и максимальные значения

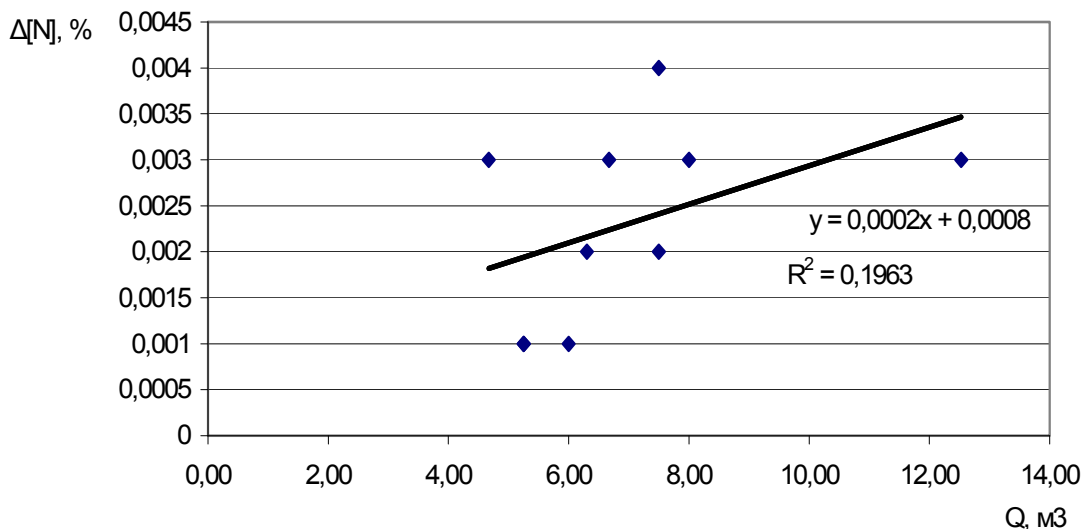


Рис. 2. Зависимость между приростом азота в стали и общим количеством введенного газообразного азота (погружаемая фурма)

Литература.

1. Свяжин А.Г. Легирование стали азотом //Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1990. – Вып. 6. – с.23 – 32.
2. Свяжин А.Г., Халек М.А., Шевченко А.Д. Массообмен при продувке жидкой стали в ковше азотом //Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. - №9. с 37 – 42.
3. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
4. Свяжин А.Г., Шевченко А.Д. Определение времени выравнивания состава и температуры жидкой стали в ковше при продувке нейтральным газом //Известия АН СССР. Металлы. – 1986. - №1. – с. 10 – 14.
5. Обработка конвертерной стали аргоном /Колпаков С.В., Шалимов А.Г., Поживанов А.М. и др. //Сталь. – 1979. - №3. – с. 177 – 179.
6. Аверин В.В., Ревякин А.В., Федорченко В.И., Козина Л.Н. Азот в металлах. М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
7. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. М.: Металлургия, 1968. – 281 с.
8. Valuev D. V. , Danilov V. I. , Serikbol A. - , Valueva A. V. Research into the Causes of the Cracking of Large Workpieces Low Carbon Steel by Pressure Treatment // Advanced Materials Research. - 2014 - Vol. 1040. - p. 250-255
9. Valuev D. V. , Danilov V. I. Reasons for Negative Formation of Structures in Carbon Steel Processing of Pressure // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. - Tomsk: TPU Press, 2012 - Vol. 2 - p. 151-154

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СВАРКИ И СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ РАВНОГО СЕЧЕНИЯ

В.Г. Добровольский, аспирант, И.В. Смирнов, к.т.н., доц.,

Тольяттинский государственный университет

445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. (8482)-53-92-45

E-mail: aquaweld@yandex.ru

Повышение энергоэффективности промышленных предприятий, снижение потребления ими электроэнергии является приоритетной задачей в развитии науки и техники.

В существующей практике сварочного производства применяются способы дуговой сварки основанные, преимущественно, на передаче тепла от сварочной дуги к свариваемому изделию через слой жидкого металла сварочной ванны. При этом жидкий металл сварочной ванны, располагающийся под сварочной дугой выступает в качестве теплового демпфера, в котором непроизводительно теряется часть тепловой энергии сварочной дуги. Непроизводительность потерь обусловлена тем, что