

качественной стали в одном из конвертерных цехов Украины. Весь металл, произведенный с применением технологии предварительного раскисления ферроалюминием, был отгружен по заказам. Экономический эффект от применения этой технологии в результате снижения затрат при замене вторичного алюминия АВ 87 на ферроалюминий ФА 30 составлял более 3 грн/т стали.

УДК 669.18.046.5

**С. Г. Мельник**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев

### **ТЕРМОДИНАМИКА ПОВЕДЕНИЯ ВОДОРОДА В КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АТМОСФЕРЫ**

Для высококачественных сталей ответственного назначения, изделия из которых работают в сложных условиях, вполне закономерно требование о необходимости снижения в них концентрации водорода до 3, а в ряде случаев и до 1 ppm, что существенно улучшает служебные свойства металлопродукции. Водород при производстве конвертерной стали попадает в металл с шихтовыми материалами, из огнеупоров, через шлаковую фазу и из атмосферного воздуха.

Если переход водорода из газовой в металлическую фазу представить как



то константу равновесия этой реакции  $K_{[H]}$  можно определить равенством

$$K_{[H]} = \frac{\alpha_{[H]}}{\sqrt{P_{\{H_2\}}}} \quad (2)$$

где  $\alpha_{[H]}$  - активность водорода в стали;  $P_{\{H_2\}}$  - парциальное давление водорода в газовой фазе, атм.

$$\text{Активность водорода при его растворении в стали} \quad \alpha_{[H]} = f_{[H]} \cdot |H| \quad (3)$$

где  $|H|$  - содержание водорода в стали, %;  $f_{[H]}$  - коэффициент активности водорода в стали.

$$\text{Из (2) и (3)} \quad K_{[H]} \cdot \sqrt{P_{\{H_2\}}} = f_{[H]} \cdot |H| \quad (4) \quad \text{и} \quad |H| = \frac{K_{[H]}}{f_{[H]}} \cdot \sqrt{P_{\{H_2\}}} \quad (5)$$

Константу равновесия  $K_H$ , зная температуру  $T$ , можно определить по уравнению [1]:

$$\lg K_H = -\frac{1900}{T} - 1,577 \quad (6)$$

Из уравнений (4) и (5) для содержания водорода в стали получим

$$|H| = \frac{K_{|H|}}{f_{|H|}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\{H_2O\}}}{K_O \cdot \alpha_{|O|}}} \quad (7)$$

Исходное парциальное давление водяного пара в газовой фазе  $P_{\{H_2O\}}^{ИСХ}$  состоит из суммы парциальных давлений водорода  $P_{\{H_2\}}$  и водяного пара  $P_{\{H_2O\}}$

$$P_{\{H_2O\}}^{ИСХ} = P_{\{H_2\}} + P_{\{H_2O\}} \quad (8)$$

С целью определения возможного наводороживания стали найдем парциальное давление водорода в газовой фазе  $P_{\{H_2\}}$  для реакции  $|O| + \{H_2\} \rightleftharpoons \{H_2O\}$  [1,2]:

$$P_{\{H_2\}} = \frac{P_{\{H_2O\}}}{K_O \cdot \alpha_{|O|}} \quad (9)$$

Константа равновесия реакции взаимодействия кислорода с водородом  $K_O$  при температуре  $T$  может быть определена из уравнения [1]:

$$\lg K_O = \frac{64900}{T} - 2,976 \quad (10)$$

Из уравнения (8) с учётом (9) получаем равенство:

$$\frac{P_{\{H_2O\}}}{K_O \cdot \alpha_{|O|}} = P_{\{H_2O\}}^{ИСХ} - P_{\{H_2O\}} \quad (11)$$

После проведения необходимых преобразований:

$$P_{\{H_2O\}} = \frac{P_{\{H_2O\}}^{ИСХ} \cdot K_O \cdot \alpha_{|O|}}{1 + K_O \cdot \alpha_{|O|}} = \frac{P_{\{H_2O\}}^{ИСХ}}{\frac{1}{K_O \cdot \alpha_{|O|}} + 1} \quad (12)$$

Содержание водорода в стали  $|H|$  по уравнению (7) с учётом выполненных преобразований можно представить следующим равенством:

$$|H| = \frac{K_{|H|}}{f_{|H|}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\{H_2O\}}}{K_O \cdot \alpha_{|O|}}} = \frac{K_{|H|}}{f_{|H|}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\{H_2O\}}^{ИСХ}}{1/K_O \cdot \alpha_{|O|} + 1} \cdot \frac{1}{K_O \cdot \alpha_{|O|}}} = \frac{K_{||H||}}{f_{|H|}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\{H_2O\}}^{ИСХ}}{1 + K_O \cdot \alpha_{|O|}}} \quad (13)$$

Результаты расчетов (расчеты выполнены Е.И. Быковым) насыщения стали водородом в реальных условиях при производстве трубной стали X70 по стандарту API 5L на основе данных термодинамического анализа представлены в виде графиков на рис.

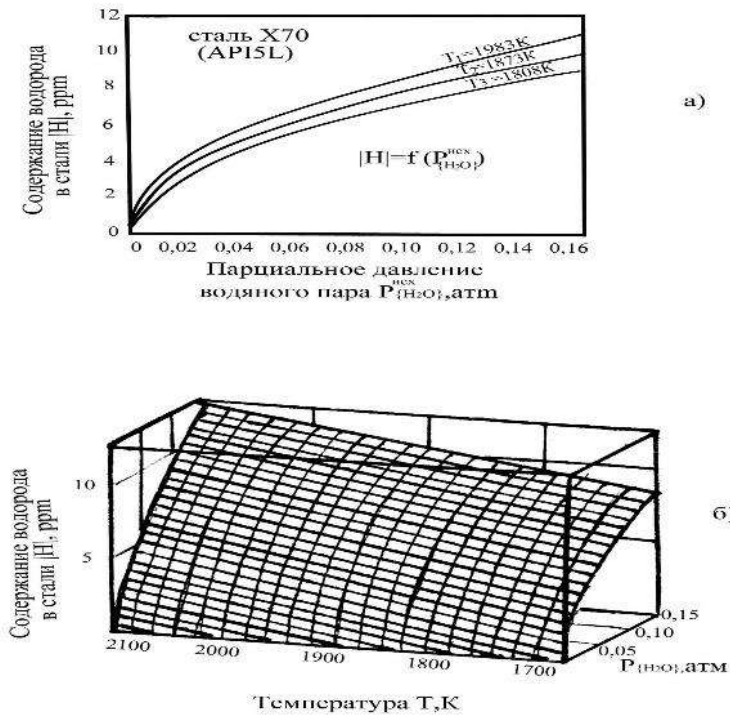


Рис. Влияние температуры  $T$  (б) и парциального давления водяного пара  $P_{\{H_2O\}}^{исх}$  (а) на равновесную концентрацию водорода  $[H]$  в стали X70 (API5L)

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении парциального давления водяного пара  $P_{\{H_2O\}}$  от 0 до 0,15 атм содержание водорода в стали  $[H]$  может достигнуть от 8,5 до 10,5 ppm в зависимости от температуры стали  $T$ .

### Список литературы

1. Казачков, Е.А. Расчёты по теории металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1988. 288с..
2. Мельник С.Г., Быков Е.И. Термодинамический анализ удаления водорода из штрипсовой стали по стандарту API 5L при ее производстве в большегрузных конвертерах / International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. 2004. - N. 11 (19). – P. 24 – 26.