

## ВОЗМОЖНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ВОДОРОДА

*М. С. Лопаев, Д. А. Мовенко, Г. И. Котельников, Г. Н. Касаткин*

НИТУ «МИСиС», ЗАО «Ланит»

Водород в металле может быть источником брака в производстве. Непосредственным источником водорода является влага, содержащаяся в воздухе и металлургическом сырье. В работе показано, что глубокая осушка воздуха в производственных трактах является залогом получения стабильно низких содержаний водорода (менее 2 ppm) в различных сталях и сплавах. Для получения сухого воздуха предполагается использовать установки адсорбционного или конденсационного типа.

*Ключевые слова:* водород, сталь, сухой воздух.

При прокатке стали в структуре металла из-за повышенного содержания водорода могут появляться дефекты: трещины, волосовины и флокены, что приводит к значительному росту брака [1]. В настоящее время считается, что содержание водорода в качественных сталях не должно превышать 2 ppm [2].

В работе [5] подробно рассмотрены источники наводороживания стали, и влага в воздухе может быть одним из источников. Она может сорбироваться ферросплавами и шлакообразующими материалами, взаимодействовать с жидким металлом и шлаком. Основная часть влаги попадает в металл со шлакообразующими материалами, в основном, с известью в виде  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Сконденсированная при определенных условиях влага может накапливаться в порах и трещинах ферросплавов. При расплавлении металла содержащаяся в нем вода испаряется, тем самым повышая парциальное давление паров воды над расплавом, что в свою очередь ведет к повышению содержания водорода в стали.

Давление паров воды в атмосфере электросталеплавильного цеха при стопроцентной относительной влажности (см. табл.) рассчитано как равновесное парциальное давление паров воды над поверхностью воды и льда (лед может попасть в печь с ломом при хранении его на улице в зимний период) в соответствии с данными, рекомендованными Всемирной метеорологической организацией [3]:

над поверхностью воды

$$\ln P_{\text{H}_2\text{O}} = -6094,4692T^{-1} + 21,1249952 - 0,027245552T + 0,000016853396T^2 + 2,4575506 \ln T, \text{ Па};$$

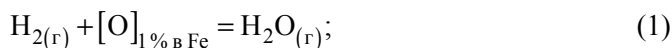
над поверхностью льда

$$\ln P_{\text{H}_2\text{O}} = -5504,4088T^{-1} - 3,5704628 - 0,017337458T + 0,0000065204209T^2 + 6,1295027 \ln T, \text{ Па}.$$

Зависимость абсолютной влажности воздуха от температуры при условии 100 %-ой относительной влажности и нормальном атмосферном давлении

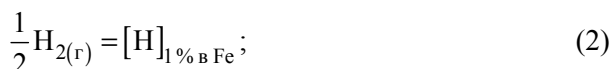
$T, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{насыщ.}}, \text{ атм.}$	$m_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ г/м}^3$
0	0,005549	4,484272
10	0,011004	8,941235
20	0,020824	17,09045
30	0,037784	31,55574
40	0,065995	56,78138
50	0,111357	100,7012

Растворимость водорода при известном давлении  $\text{H}_2\text{O}$  рассчитывали по приведенным ниже уравнениям. Термодинамические характеристики взяты из [4].



$$\Delta G_1^0 = -134070 + 60,54T, \text{ Дж/моль};$$

$$\ln K_1 = -\frac{\Delta G_1^0}{RT}, \quad K_1 = 3,77;$$



$$\Delta G_2^0 = 36500 + 30,46T, \text{ Дж/моль};$$

$$\ln K_2 = -\frac{\Delta G_2^0}{RT}, \quad K_2 = 0,00246;$$

$$[\text{H}] = K_2 p_{\text{H}_2}^{1/2};$$

$$p_{\text{H}_2} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{a_{[\text{O}]} K_1}.$$

В расчете приняли, что активность кислорода в металле перед выпуском из сталеплавильного агрегата  $a_{[\text{O}]} = 0,04 \%$ . Полученное расчетное равновесное содержание водорода в зависимости от парциального давления паров воды в атмосфере представлено на рис. 1. Из данного рисунка видно, что результаты расчета достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными данными по содержанию водорода [5].

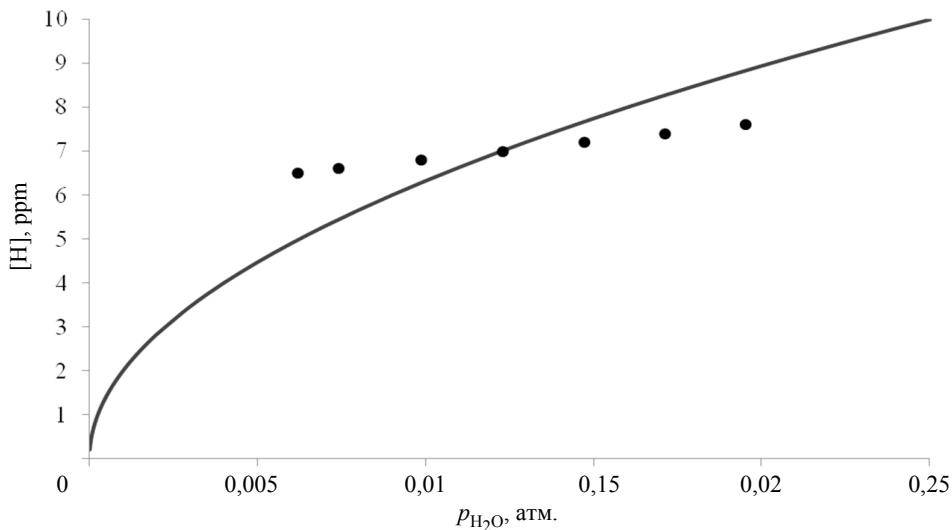


Рис. 1. Изменение концентрации водорода в низколегированной стали с увеличением парциального давления паров воды в атмосфере: ● – экспериментальное содержание водорода перед выпуском из сталеплавильного агрегата

Из результатов расчета следует, что снизить концентрацию водорода в стали до безопасного уровня (2 ppm и ниже) можно за счет вакуумирования металла (снижение общего давления над металлом) либо за счет осушки воздуха и понижения в нем парциального давления воды до безопасного уровня, порядка 0,00025 атм. При такой влажности концентрация водорода составляет около 1 ppm.

На данном этапе развития промышленности борьба с высоким содержанием водорода в сталях происходит только за счет вакуумирования жидкого металла. В то же время защите жидкого металла, в том числе от повторного наводороживания после вакуумирования, внимания не уделяется. Из рис. 2 видно, что после вакуумирования концентрация водорода снова возрастает на этапе разливки металла.

Физико-химический анализ взаимодействия атмосферы с металлом показывает, что в дополнение к вакуумированию целесообразно поместить бункера и все трубопроводы, по которым подаются сыпучие материалы, в специальный герметичный кожух. Сухой воздух, полученный с помощью установок осушения воздуха, подают в эти кожухи, бункера и тому подобные нагреваемые емкости. Таким образом, сухая атмосфера защищает материалы от влаги окружающей среды, обеспечивая сушку материалов (рис. 3).

Для получения сухого воздуха предлагается использовать установки адсорбционного или конденсационного типа. Адсорбционный метод основан на сорбционных (влагопоглощающих) свойствах сорбентов. Конденсационный метод основан на принципе конденсации водяных паров, содержащихся в воздухе, при охлаждении его ниже точки росы [6].

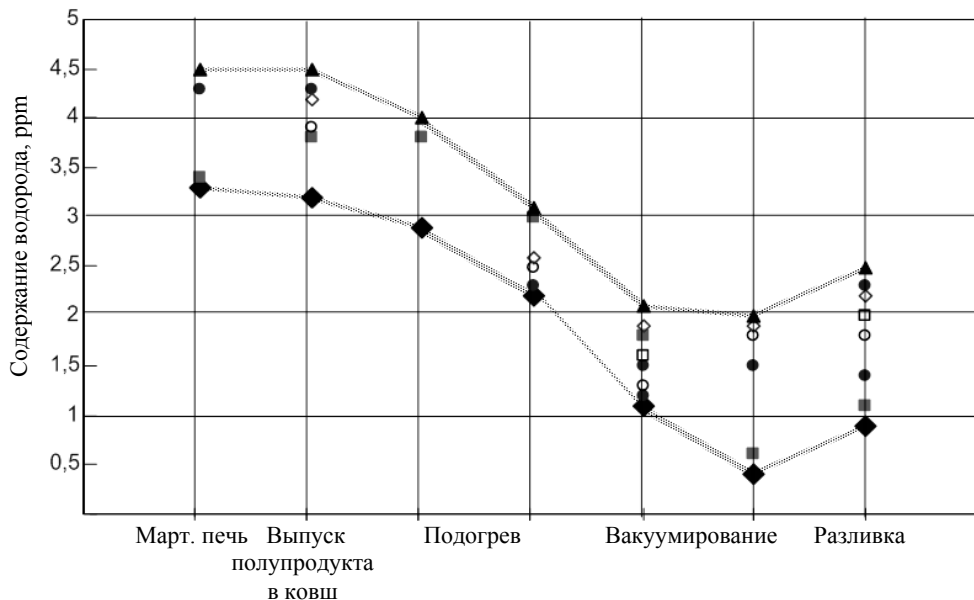


Рис. 2. Изменение содержания водорода на различных этапах производства стали с внепечным ковшевым вакуумированием [5]

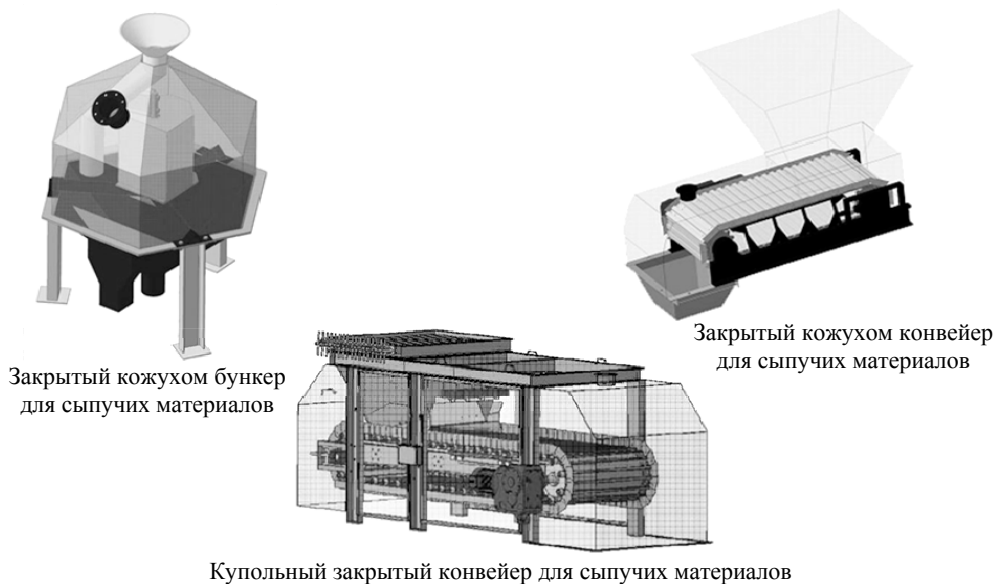


Рис. 3. Системы хранения и транспортировки сыпучих материалов Томской электронной компании

Необходимо отметить, что кожухи, которые изготавливает Томская электронная компания, предназначены в настоящее время для борьбы с запылением рабочего пространства. В данной работе предлагается подавать в эти кожухи специально осушенный воздух.

В ходе разливки сталь может поглощать из атмосферы до 1 ppm водорода (рис. 2). В связи с этим целесообразно защищать сталь от наводороживания при помощи подачи сухого воздуха в промежуточный ковш (рис. 4).

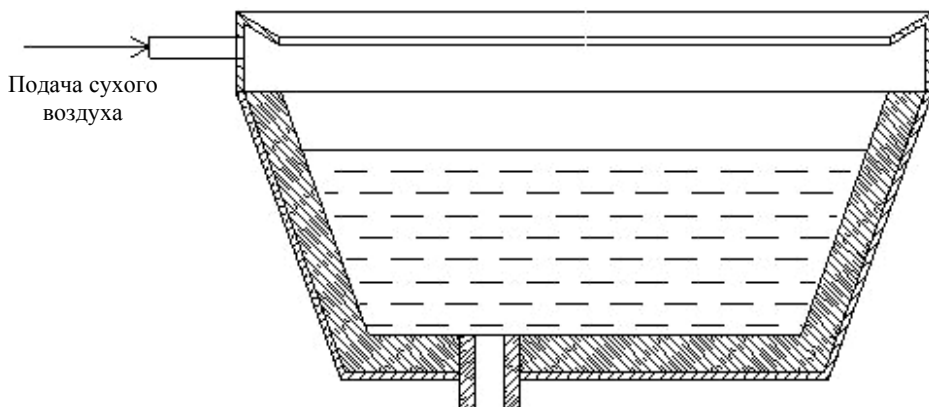


Рис. 4. Промежуточный ковш с металлом с организацией завесы из сухого воздуха

Таким образом, выполнен физико-химический анализ взаимодействия паров воды, содержащихся в атмосфере производственного цеха, с жидкой сталью. Показано, что снижение влажности атмосферы позволит получать концентрации водорода ниже 2 ppm. Предложено подготавливать и хранить ферросплавы и шлакообразующие материалы в атмосфере сухого воздуха, а также производить разливку металла в сухом воздухе для защиты металла от повторного наводороживания.

### Список литературы

1. Морозов А. Н. Водород и азот в стали. М.: Metallurgy, 1968.
2. Явойский В. И. Близнюков С. А. Вишкарец А. Ф. Включения и газы в сталях. М.: Metallurgy, 1979.
3. URL: [http://www.wmo.int/pages/index\\_ru.html](http://www.wmo.int/pages/index_ru.html) (дата обращения: 01.09.2011).
4. Григорян В. А., Стомахин А. Я., Уточкин Ю. И. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов: сборник задач с решениями. М.: МИСиС, 2007. С. 272.
5. Касаткин Г. Н. Водород в конструкционных сталях. М.: Интернет Инжиниринг, 2003. С. 336.
6. Великанов Е. Г., Гришин С. Ф., Гуревич С. Л. Криогенные насосы. М.: Машиностроение, 1977. С. 39.