



УДК 669. 18. 046.517-982:621.746

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ СТАЛИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВКЕ И ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ВАКУУМИРОВАНИИ*

А. Д. Чепурной, Б. И. Разинкин, А. Б. Церцек,
А. Г. Ковалев, А. А. Леонтьев

Изучено влияние основных технологических параметров электродуговой плавки и вакуумирования на степень изменения содержания водорода и азота в жидкой стали. В результате математической обработки экспериментальных данных электродуговых плавок выведены уравнения зависимости содержания водорода в стали от скорости окисления углерода, продолжительности восстановительного периода, при вакуумировании — от скорости охлаждения металла, продолжительности вакуумирования и температуры стали.

Effect of main technological parameters of electric arc melting and vacuum degassing on the degree of changing the content of hydrogen and nitrogen in molten steel was studied. After mathematical processing of experimental data of electric arc melts the equations of dependence of hydrogen content in steel on the rate of carbon oxidation, duration of reduction period and also of its dependence in vacuum degassing on the metal cooling rate, duration of vacuum degassing and steel temperature were derived.

Ключевые слова: азот; водород; скорость окисления углерода; продолжительность восстановительного периода; скорость охлаждения; вакуумирование

В связи с выходом в последнее десятилетие продукции машиностроения и металлургии на международные рынки, усилением конкурентного соперничества производителей все больше возрастает актуальность повышения качества изделий.

Ужесточаются требования по содержанию водорода, кислорода, азота в металле. В Украине,

России, странах СНГ плавильные агрегаты металлургических и машиностроительных предприятий оснащаются установками печь-ковш и внепечного вакуумирования. Например, на Магнитогорском металлургическом комбинате реконструируют вакуумную установку, чтобы изготавливать металл высокопластичный, с содержанием углерода не более 0,004% для автомобильной промышленности [1, 2]; на Молдавском металлургическом заводе с целью изготовления качественной кордовой, пружинной и сварочной проволоки в 2000 г. принято решение о внедрении технологии вакуумирования стали для ее глубокой дегазации от азота и водорода [3]; на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе установлен комплекс для вакуумирования стали в 100-тонных ковшах при производстве железнодорожных колес [4]; вакууматор фирмы «Маннесман-Демаг» имеет ОАО «Завод Днепроспецсталь» для изготовления качественных спецсталей [5], установки фирмы Danieli — завод утяжеленных бурильных и ведущих труб (г. Сумы) и ЗАО «Машиностроительный завод ИСТИЛ» (г. Донецк) [6]. Возрастает потребление вакуумированной стали на машиностроительных предприятиях Украины.

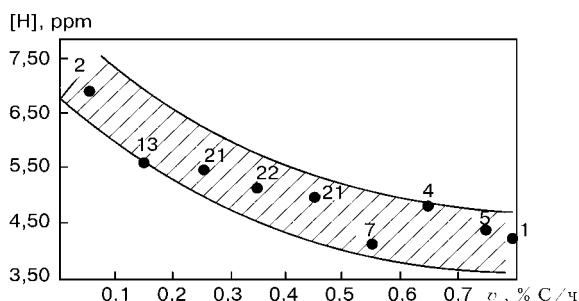


Рис. 1. Зависимость суммарного содержания водорода в готовой стали от средней скорости окисления углерода при электродуговой плавке (здесь и далее на рис. цифры у точек — количество плавок)

*В работе принимали участие Л. В. Ребров, А. В. Збышевский и А. П. Варчич

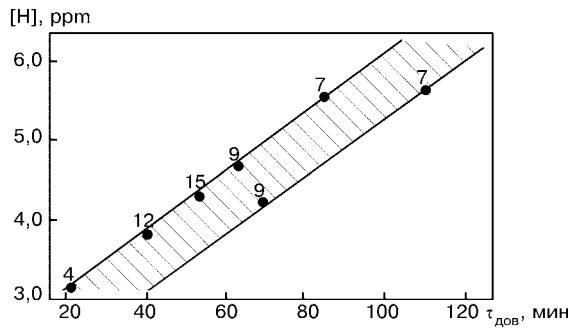


Рис. 2. Влияние продолжительности восстановительного периода на содержание водорода в стали перед выпуском из печи

В настоящей работе исследовано удаление водорода и азота из жидкой стали в процессе электродуговой плавки и вакуумирования. С целью изучения основных особенностей дегазации была проведена серия плавов стали типа 12ХНЗМФА. Сталь выплавляли на ОАО «Энергомашспецсталь» в электродуговой печи с использованием для окисления примесей газообразного кислорода и железной руды. В ряде работ совершенно определенно указывается на зависимость между содержанием газов в металле и скоростью окисления углерода [7].

Специфической особенностью поведения водорода по ходу окислительного периода плавки в электродуговой печи является то, что при содержании водорода в металле выше равновесных значений с газовой фазой печи, кроме удаления пузырями СО, происходит также его переход из металла в атмосферу печи. Вследствие малого содержания ($P_{H_2O} \approx 2500 \text{ Н/м}^2$) водорода в газовой фазе система металл – газ быстро приходит к равновесию.

Анализ опытных данных показывает, что содержание водорода в стали при выплавке в электродуговых печах снижается с повышением скорости окисления углерода v_C (рис. 1). На конечное содержание водорода в стали влияет не только v_C по ходу окислительного периода, но и продолжительность восстановительного периода.

Методом множественной регрессии авторами получено уравнение, объединяющее влияние интенсивности окисления углерода и продолжительности

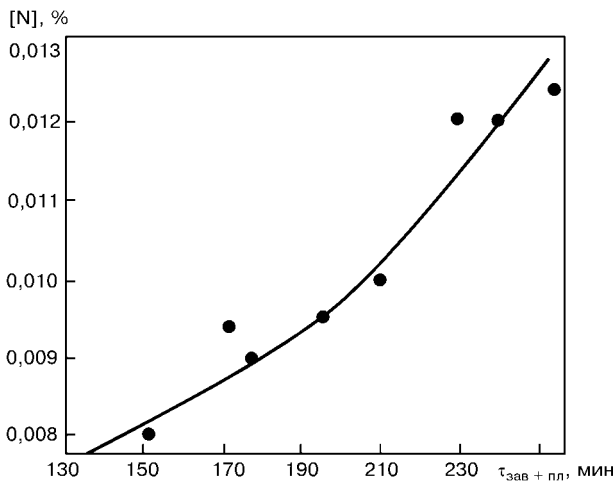


Рис. 3. Влияние суммарной продолжительности заправки и плавки на концентрацию азота в металле по расплавлению

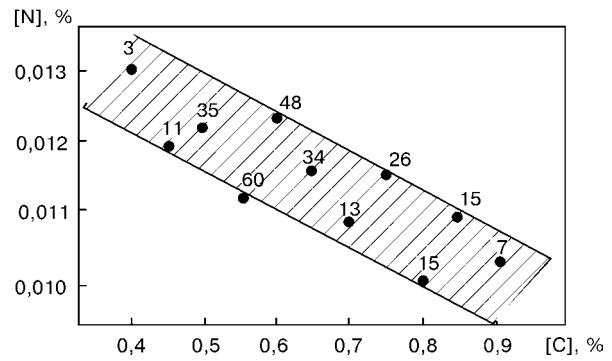


Рис. 4. Зависимость концентрации азота в готовой стали от содержания углерода по расплавлению шихты

восстановительного периода (периода доводки) $\tau_{дов}$ на содержание водорода в стали:

$$[H] = 5,3849 - 4,1165v_C + 0,0018\tau_{дов}, \quad r = 0,574. \quad (1)$$

Низкий коэффициент корреляции уравнения (1) обусловлен тем, что на содержание водорода в готовой стали влияют другие, неучтенные факторы.

Зависимость продолжительности восстановительного периода от суммарного содержания водорода в стали носит прямолинейный характер (рис. 2).

На опытных плавках изучали также массоперенос азота. Установлено, что при увеличении суммарной продолжительности заправки и плавки $\tau_{зав+пл}$ повышается концентрация азота в металле по расплавлению (рис. 3). Это можно объяснить более длительным воздействием электрических дуг, что приводит к диссоциации азота в газовой фазе и переходу его атомов в металл.

С увеличением содержания углерода по расплавлению шихты концентрация азота в металле, даже обработанном синтетическим шлаком, уменьшается (рис. 4). Глубина деазотации тем больше, чем продолжительнее барботирование расплава всплывающими пузырями окиси углерода, иными словами, чем длительнее окислительный период плавки (рис. 5).

Иное влияние на содержание азота в металле оказывает продолжительность периода доводки. С увеличением ее длительности концентрация азота в металле возрастает (рис. 6). Это объясняется воздействием электрических дуг на оголенный металл после скачивания окисленного шлака до наведения нового шлака на предварительно раскисленный металл.

Вакуумирование производили на установке циркуляционного типа западногерманской фирмы

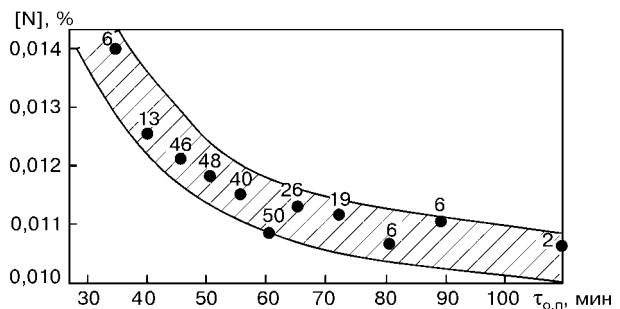


Рис. 5. Изменение концентрации азота в готовой стали в зависимости от продолжительности окислительного периода

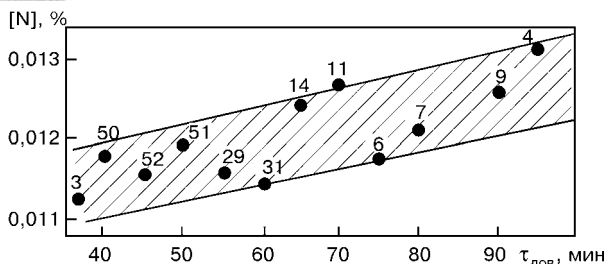


Рис. 6. Влияние продолжительности восстановительного периода плавки на содержание азота в готовой стали

«Руршталь-Геркус», электродуговая сталь содержала от 3,0 до 11,0 ppm водорода. Значительный разброс объясняется одновременным влиянием многих технологических факторов, меняющихся от плавки к плавке. Циркуляционное вакуумирование является одним из наиболее эффективных методов, позволяющих стабильно дегазировать металл. Обработка опытных данных позволила установить ряд закономерностей вакуумирования стали на установках типа RH.

Продолжительность вакуумирования $\tau_{\text{вак}}$ существенно влияет на степень удаления водорода (рис. 7). Увеличение продолжительности вакуумирования с 5 до 25 мин позволяет в среднем снизить содержание водорода с 4,0 до 2,0 ppm [1,8]. Установлена прямолинейная зависимость содержания водорода в стали от скорости ее охлаждения $v_{\text{охл}}$ (рис. 8). Эффективным средством снижения скорости охлаждения является надлежащий прогрев футеровки ковша и вакуумной камеры перед вакуумированием [5].

Регрессионный анализ позволил выявить зависимость содержания водорода в стали от скорости ее охлаждения и продолжительности вакуумирования:

$$[H] = 3,2711 + 0,3848 v_{\text{охл}} - 0,0499 \tau_{\text{вак}}, \quad r = 0,3299. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что чем выше продолжительность вакуумирования и ниже скорость остывания металла, тем лучше условия экстракции

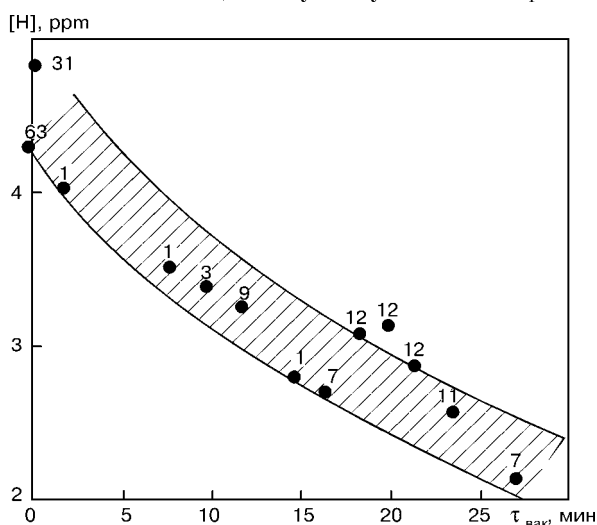


Рис. 7. Изменение содержания водорода в стали в зависимости от продолжительности вакуумирования на установке типа RH (31 и 63 — количество невакуумированных плавков)

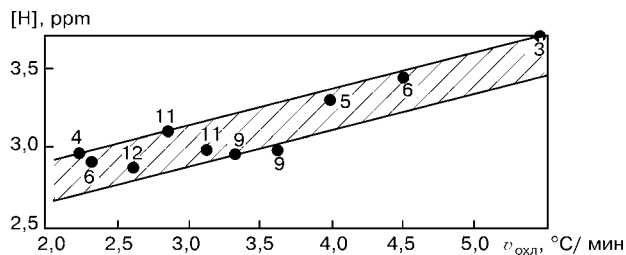


Рис. 8. Зависимость содержания водорода в стали от скорости охлаждения металла при вакуумировании

водорода вакуумированием из жидкой стали. Уравнение (2) позволяет рассчитать режим вакуумирования стали на установках типа RH.

Снижение интенсивности удаления водорода из стали при быстром ее остывании объясняется повышением вязкости металла и, как следствие, ухудшением диффузии водорода из жидкого металла в газовую фазу. Найденные закономерности хорошо согласуются с результатами производственных испытаний Вальстера и Мааса по выяснению характера изменения $[H]$ на установке типа RH [9]. Изучено также влияние температуры конструкционных сталей в начале вакуумирования на количество удаленного водорода $\Delta[H]$. Наиболее существенное влияние температуры металла на количество удаленного водорода проявляется в интервале 1570... 1630 °C, когда значительно изменяется коэффициент массопереноса водорода и скорость его удаления из металла:

$$-\frac{d[H]}{d\tau} = \beta_H \{ [H] - [H]_{p.r} \} \frac{F}{V}, \quad (3)$$

где β_H — коэффициент массопереноса водорода, м/с; F — площадь поверхности раздела газа и металла, м²; V — объем металла, м³; $\{ [H] - [H]_{p.r} \}$ — градиент начальной и равновесной концентраций водорода на поверхности раздела металла с газовой фазой, ppm.

С ростом температуры металла увеличивается коэффициент массопереноса водорода за счет уменьшения вязкости металла. Но при определенных температурах (более 1630 °C) ее рост уже не влияет на вязкость металла и коэффициент массопереноса, что обуславливает и малое ее влияние на количество удаляемого водорода (рис. 9).

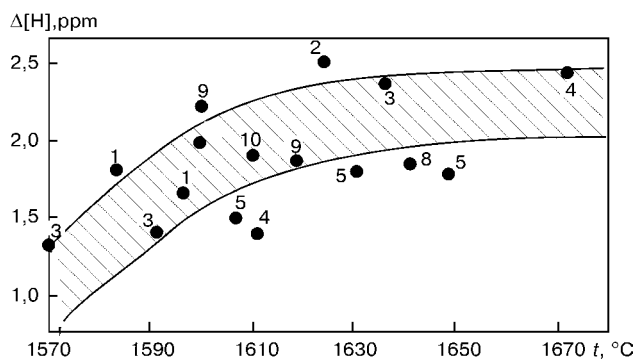


Рис. 9. Влияние температуры вакуумированной стали на количество удаленного водорода



На основании опытных данных получено уравнение парной корреляции:

$$\Delta[H] = -8,9312 + 0,0063 t, \quad r = 0,9276, \quad (4)$$

где t — температура стали в начале вакуумирования, °С.

Степень удаления азота и кислорода из стали 12ХНЗМФА значительно ниже, чем водорода и составляет соответственно 6,0... 14,1 и 7,6... 18,5%. Полученные результаты согласуются с данными работы [5].

Выводы

1. Для снижения концентрации газов в исходной электродуговой стали необходимы: сокращение продолжительности периодов завалки и плавления; достаточно высокая концентрация углерода по расплавлению с одновременным обеспечением скорости окисления углерода не менее 0,5% С/ч; снижение до минимума контакта оголенного металла с электрическими дугами, т. е. хорошо организованный шлаковый режим в период доводки и минимальная его продолжительность.

2. Получено уравнение, объединяющее влияние интенсивности окисления углерода и продолжительности восстановительного периода на содержание водорода в стали.

3. В результате математической обработки опытных данных вакуумирования стали на установке типа РН установлено, что с увеличением продолжительности вакуумирования с 5 до 25 мин содержание водорода в среднем снижается с 4,0 до 2,0 ppm; повышение температуры металла (1570... 1670 °С) способствует удалению водорода; степень удаления водорода прямолинейно зависит от скорости охлаж-

дения металла в процессе вакуумирования. Выведены два уравнения парной и множественной корреляции, связывающие исследованные технологические параметры вакуумирования.

1. *Вакуумирование* стали процессом РН на Магнитогорском металлургическом комбинате // Ю. А. Бодяев, Е. В. Бурмистрова, В. Г. Овсянников и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2003. — Вып. 11(1247). — С. 48–52.
2. *Разработка* и освоение технологии производства особомалоуглеродистой стали для автомобилестроения // Р. С. Тахаутдинов, А. Д. Носов, А. Ф. Сарычев и др. // Сталь. — 2003. — № 4. — С. 20–23.
3. *Освоение* технологии вакуумирования стали на Молдавском металлургическом заводе // А. К. Белитченко, А. В. Черновол, И. В. Деревянченко, О. Л. Кучеренко // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2003. — Вып. 9(1245). — С. 29–32.
4. *Математическая* модель изменения уровня металла при ковшовом вакуумировании // О. Н. Кукушкин, С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, Ю. А. Редичкин // Теория и практика металлургии. — 2003. — № 1 (33). — С. 27–32.
5. *Шульга В. О., Король Л. Н., Кнох В. Г.* Освоение технологии производства стали 10Х13Г12БС2Н2Д2 // Сталь. — 2003. — № 8. — С. 28–31.
6. *Современная* технология производства электростали // В. Н. Щербина, Р. Н. Пильчук, Г. И. Касьян, А. С. Гарченко // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2003. — Вып. 10(1246). — С. 47–49.
7. *Мыльников Р. И., Гавриленко Ю. В.* Производство стали с содержанием углерода и азота менее 0,01% // Сталь. — 1980. — № 8. — С. 84–86.
8. *Разработка* и освоение технологии производства чистых сталей // С. Д. Зинченко, А. М. Ламухин, В. Г. Ордин и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2003. — Вып. 4(1240). — С. 17–19.
9. *Внепечное* вакуумирование стали // А. Н. Морозов, М. М. Стрекаловский, Г. И. Чернов, Я. Е. Кацнельсон. — М.: Металлургия, 1975. — 288 с.

ОАО «Мариупольский завод тяжелого машиностроения»

ОАО «Головной специализированный конструкторско-технологический институт», г. Мариуполь

ОАО «Энергомашспецсталь», г. Краматорск

Поступила 06.05.2004