УДК 669.046.554-982

**Закономерности удаления водорода на установке вакуумирования стали камерного типа**

***Тутарова В.Д.1****,к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий и оборудования*

***Шаповалов А. Н.1****,к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий и оборудования*

***Калитаев А.Н.2****,к.т.н., доцент кафедры вычислительной техники и программирования*

**1Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,**

**Новотроицкий филиал**

(462359, Россия, Оренбургская обл., г. Новотроицк, Фрунзе, 8)

**2Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова**

(455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

***Реферат.*** Выявлены основные параметры вакуумирования стали, определяющие эффективность удаления водорода на установке вакуумирования стали камерного типа, действующей в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь»: глубина и продолжительность вакуумирования, расход аргона, температура металла, толщина слоя шлака и величина свободного борта.

Установлено количественное влияние параметров вакуумирования и получено уравнение регрессии, позволяющее прогнозировать результаты удаления водорода, а также подбирать величину параметров с целью достижения заданного содержания водорода в стали.

Определены рациональные с экономической и технологической точек зрения уровни параметров вакуумирования, обеспечивающие получение стали с содержанием водорода 2,1 ppm: температура перегрева металла 100-110 °С, длительность вакуумирования 20 минут при давлении в вакуум-камере не более 1,5 мбар, расход аргона на продувку – 0,05 м3/т.

Минимальное для изученной установки остаточное содержание водорода в стали, составляющее 1,6 ppm, обеспечивается при проведении вакуумной обработки стали с температурой перегрева 120-125 °С в течение 40 минут при давлении в вакуум-камере не более 1 мбар и расходе аргона на продувку до 0,072 м3/т.

***Ключевые слова:*** водород, камерный вакууматор, вакуумирование стали, вакуумная камера, продолжительность вакуумной обработки, глубина вакуума, температура металла в ковше, расход аргона.

Постоянный рост требований к качеству стали ведет к необходимости совершенствования технологии и созданию новых сталеплавильных процессов, соответствующих современному уровню развития техники, что позволяет расширить возможности регулирования физических и физико-химических условий протекания процессов плавки стали в сталеплавильных агрегатах и значительно повысить качество стали.

Внедрение современных способов внепечной обработки показало, что они позволяют существенно улучшить качество стали и получить сталь с принципиально новыми свойствами. Одним из современных способов внепечной обработки стали является вакуумирование [1-4].

В 2012 году в электросталеплавильном цехе (ЭСПЦ) АО «Уральская Сталь» была введена в эксплуатацию установка вакуумирования стали камерного типа, что позволило существенно улучшить показатели непрерывной разливки и качество проката [5-7]. Технические характеристики двухпозиционного вакууматора фирмы SIEMENS-VAI, действующем в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь», приведены в таблице 1.

Обработке на установке вакуумирования подвергают сталь, выплавленную в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и обработанную на установке «ковш-печь» (УКП). При этом температура металла перед выпуском из дуговой сталеплавильной печи должна составлять 1670-1700 ºС, а в конце обработки на установке «ковш-печь» перед отдачей на установку вакуумирования стали – 1620-1640 ºС [8].

Действующая в АО «Уральская Сталь» установка вакуумирования стали (УВС) позволяет добиваться глубокого удаления водорода из жидкой стали [5], однако его снижение ведет к значительному повышению затрат [9]. Поэтому необходима корректировка технологии вакуумирования с учетом требований к различным маркам стали.

На результат вакуумирования влияет большое количество факторов [1-5, 10-15], как технических, так и технологических и организационных. При анализе работы конкретного агрегата роль технических факторов и, отчасти, организационных – минимизируется, что позволяет более объективно оценить влияние технологических параметров вакуумирования на его результаты.

Для изучения эффективности удаления водорода при вакуумировании стали в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» был проведен анализ производственных данных за май-июль 2015 года. Всего за исследуемый период на УВС камерного типа была обработана 1821 плавка, наиболее массовый сегмент марок стали представлен на рисунке 1.

Усредненные технологические параметры и результаты вакуумирования наиболее массовых марок стали приведены в таблице 2.

Как видно из данных таблицы 2, рабочие параметры вакуумирования изменяются в достаточно широких пределах, что вызывает значительные колебания содержаний водорода в стали от 1,0 до 4,5 ppm.

Известно, что в практике производства низколегированных сталей для нефтегазовых труб, судостроения и др. областей народного хозяйства водород является вредной примесью [1-4,10,16,17]. Количество водорода в стали определяется типом процесса выплавки, шлаковым режимом, используемыми материалами и другими факторами [1-4]. Так как присутствие растворенного в стали водорода заметно влияет на механические свойства металла и пораженность проката различными поверхностными и внутренними дефектами, практически вся выплавляемая в условиях АО «Уральская Сталь» сталь подвергается обработке на УВС. Кроме того, для дополнительного удаления водорода из литых заготовок применяется технология их замедленного охлаждения, в ходе которого обеспечивается диффузионное удаление водорода. Однако вакуумная обработка стали является определяющей операцией в технологии производства высококачественных сталей с пониженным содержанием водорода.

Анализ эффективности вакуумирования стали проводился на примере стали 09Г2С, являющейся наиболее массовой маркой стали, производимой в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» - более 15 % от общего производства стальных заготовок. Несмотря на то, что сталь 09Г2С не флокеночувствительна, при анализе качества заготовок периодически выявляются дефекты сплошности, одной из причин которых является повышенная газонасыщенность. Поэтому данная марка стали подвергается вакуумированию по стандартной технологии, реализуемой на АО «Уральская Сталь» [8].

На рисунке 2 приведена частота распределения содержания водорода по анализируемым плавкам стали марки 09Г2С (на основе 253 плавок).

Как видно из рисунка 2, на более 90 % плавок содержание водорода в стали 09Г2С обеспечивалось на уровне менее 3 ppm, однако в некоторых плавках отмечалось увеличение содержание водорода до 4-4,5 ppm, что свидетельствует о нестабильности процесса и необходимости совершенствования технологии вакуумирования.

Для изучаемой УВС камерного типа к основным технологическим параметрам, определяющим остаточное содержание водорода относятся: глубина и продолжительность вакуумирования, расход аргона, температура металла, толщина слоя шлака и величина свободного борта. При этом, по сложившейся практике эксплуатации УВС на АО «Уральская Сталь», толщина слоя шлака устойчиво поддерживается на уровне 100-150 мм, а величина свободного борта в более чем 90 % случаев составляет 400 мм. Поэтому для дальнейшей обработки от первоначальных производственных данных был выполнен отсев плавок с величиной свободного борта более 500 мм, а влияние толщины слоя шлака, уровень которого определяется визуально, не учитывали.

Для качественной оценки вида влияния каждого параметра в отдельности на содержание водорода построены графики, представленные на рисунке 3.

Из представленных диаграмм следует, что глубина вакуума, длительность обработки и температура металла влияют на содержание водорода экстремально:

- наиболее существенное влияние на содержание водорода наблюдается с увеличением длительности глубокого вакуумирования до 20 минут, дальнейшее увеличение длительности обработки не целесообразно;

- наибольший эффект от остаточного давления при вакуумировании наблюдается при снижении минимального давления до 2 мбар, при его увеличении результаты дегазации металла существенно ухудшаются;

- повышение температуры металла до 1600-1620 °С способствует удалению водорода, при температуре свыше 1620 °С удаление водорода существенно замедляется.

Влияние расхода аргона при вакуумировании наиболее достоверно описывает линейное уравнение регрессии, согласно которому увеличение расхода аргона способствует улучшению качества металла по содержанию водорода.

Полученные частные зависимости имеют невысокие показатели достоверности, что связано с одновременным влиянием большого количества факторов на удаление водорода.

Для оценки совокупного количественного влияния основных параметров вакуумирования на удаление водорода был проведен регрессионный анализ производственных данных, результаты которого приведены в таблице 3.

Полученное уравнение регрессии позволяет количественно оценить совокупное влияние технологических параметров на остаточное содержание водорода, а также прогнозировать его содержание при изменении какого-либо из параметров (в исследуемом диапазоне их варьирования) для условий эксплуатации УВС АО «Уральская Сталь».

Из полученного уравнения следует, что все включенные в регрессионную модель параметры вакуумирования оказывают влияние на удаление водорода, однако наибольшее влияние оказывает длительность глубокого вакуумирования (46,8 %) и температура перегрева металла (49 %). При этом низкая весомость остаточного давления в вакуумной камере объясняется как достаточно низким уровнем этого давления (для удаления водорода), так и небольшим интервалом варьирования. Что же касается воздействия аргона, то ограниченное его влияние также объясняется благоприятным уровнем других, не менее весомых, факторов.

Таким образом, для снижения содержания водорода необходимо проводить вакуумирование стали в условиях АО «Уральская Сталь» при следующих параметрах:

- минимальное давление в вакуумной камере менее 2 мбар;

- длительность глубокого вакуумирования в пределах 20 минут;

- расход аргона не менее 0,05 м3/т;

- перегрев металла в начале обработки на верхнем пределе, обеспечивающем оптимальные температурные условия разливки металла.

При выборе температуры начала вакуумирования необходимо учитывать не только ее влияние на результаты удаления водорода, но и снижение температуры металла, как при обработке на УВС, так и в процессе выдержки в стальковше до начала разливки. Очевидно, что потери температуры металла при вакуумировании определяются общей продолжительностью обработки, которая зависит от длительности глубокого вакуумирования, технических возможностей оборудования и организации процесса. Анализ производства стали марки 09Г2С по традиционной технологии в условиях АО «Уральская Сталь» (рисунок 4) выявил определяющее влияние общей продолжительности обработки, с увеличением которой линейно растет падение температуры, а скорость ее падения постепенно замедляется.

Общая длительность обработки определяется, главным образом, продолжительностью глубокого вакуумирования (рисунок 5).

Из ранее выполненного анализа следует, что увеличение длительности глубокого вакуумирования более 20 минут нерационально, ни с точки зрения удаления водорода, ни с точки зрения потерь температуры. Так, при длительности глубокого вакуумирования 20 минут общая продолжительность обработки на УВС составит 40 минут (рисунок 5) и, как следует из зависимости снижения температуры металла на УВС (Δt, °С) от длительности обработки (τ, мин) Δt = 1,045·τ +15,685 (рисунок 4 а), потери температуры металла составят 60 °С. При реализации технологии обработки металла по схеме ДСП-УКП-УВС-МНЛЗ, оптимальном перегреве металла в стальковше в процессе непрерывной разливки 35-45 °С, потерях температуры металла при транспортировке от УВС до разливки (в течение не более до 15 мин) до 5 °С, рациональная температура перегрева металла в начале обработки на УВС составит ~ 100-110 °С. Для стали 09Г2С при температуре ликвидус 1510 °С рациональная температура начала обработки на УВС должна находиться в пределах 1610-1620 °С.

Таким образом, подбирая параметры вакуумирования с учетом технологических возможностей и рациональных уровней, можно прогнозировать уровень содержания водорода в стали по полученному ранее уравнению регрессии (таблица 3), а также определять рациональное сочетание параметров обработки для получения требуемой глубины удаления водорода. Текущие и расчетные параметры, а также результаты вакуумирования при различных целевых установках представлены в таблице 4.

***Заключение***

Определены основные параметры вакуумирования стали, определяющие эффективность удаления водорода в камерном вакууматоре, эксплуатируемом в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь».

Выявлено количественное влияние параметров вакуумирования, позволяющее прогнозировать его результаты, а также подбирать величину параметров с целью достижения заданного содержания водорода в стали.

Определены рациональные с экономической и технологической точек зрения уровни параметров вакуумирования, обеспечивающие получение стали с содержанием водорода 2,1 ppm, а также предельные величины параметров, при которых достигается минимальное содержание водорода - 1,6 ppm.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: Мир, ООО «Издательство ACT», 2003 – 528 с.
2. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. Внепечная обработка стали: Учебник для вузов. – М.: МИСиС, 1995 – 256 с.
3. Морозов А.Н. Внепечное вакуумирование стали / Морозов А.Н., Стрекаловский М.М., Чернов Г.И., Кацнельсон Я.Е. – М.: Металлургия, 1975 – 288 с.
4. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1. Термодинамические и кинетические закономерности: Пер. с нем.- М.: Металлургия, 1973.-312 с.
5. [Шаповалов А.Н.](http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=477659), [Тутарова В.Д.](http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=455931), [Калитаев А.Н.](http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=658151) Совершенствование технологии вакуумирования осевых марок сталей в условиях ЭСПЦ ОАО «Уральская Сталь» // Литейные процессы, 2003. №12. С. 93-103.
6. Калитаев А.Н., Тутарова В.Д., Шаповалов А.Н., Бажуков Д.О. Проблемы формирования качественной непрерывнолитой круглой заготовки на МНЛЗ // Известия вузов. Черная металлургия, 2013. №5. С. 27-32.
7. Шевченко Е.В., Шаповалов А.Н. Проблемы получения качественной слябовой заготовки на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия», 2013, том 13, № 1. С. 68-73.
8. Технологическая инструкция ТИ 13657842-СТ. ЭС-03-2014 Обработка стали на установке вакуумирования. – Новотроицк: ОАО «Уральская Сталь», 2014. – 18 с.
9. Бургман В., Давене Ж. Структура затрат на вакуумирование стали с учетом обработки в агрегате ковш-печь // Черные металлы, 2012. № 11. С. 41-49.
10. Зинченко С.Д. Технологические аспекты удаления водорода с использованием установки ковшевого вакуумирования стали / Зинченко С.Д., Филатов М.В., Ефимов С.В., Дуб А.В., Гошкадера С.В. // Металлург, 2004. № 11. С. 41-42.
11. Смирнов А.Н., Сафонов В.М. Вакуумирование стали: технология, оборудование // Электрометаллургия, 2008. № 11. С. 8-14.
12. Николаев А.О. Особенности вакуумирования трубных марок стали в условиях ККЦ ОАО «ММК» / Николаев А.О., Бигеев В.А., Николаев О.А., Чигасов Д.К. // Электрометаллургия, 2013. № 4. С. 19-24.
13. Житлухин Е.Г. Освоение и повышение эффективности технологии вакуумирования стали / Житлухин Е.Г., Мелинг В.В., Дресвянкина Л.Е., Гудов А.Г., Степанов И.А. // Сталь, 2014. № 6. С. 12-14.
14. Протасов А.В. Состояние и перспективы развития ковшового вакуумирования жидкой стали / Протасов А.В., Сивак Б.А., Лукьянов А.В., Никитенко А.С., Щёголев Н.А. // Черная металлургия, 2010. № 11 (1331). С. 38-44.
15. Небосов Ю.И., Сухарев С.В., Казаков С.В. Расчет кинетики удаления водорода в газовую фазу при ковшевом вакуумировании // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2007. № 7. С. 16-18.
16. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. – М.: Металлургия, 1968. – 283 с.
17. Карпенко Г.В., Крипяткевич Р.И. Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 197 с.

UDC 669.046.554-982

**Regularities of hydrogen removing on the ladle degassing plant**

***Tutarova V.D. 1****, Cand.Sci. (Eng.), Assist. Proffessor of the Chair of metallurgical technologies and equipment*

***Shapovalov A.N.1****, Cand.Sci. (Eng.), Assist. Proffessor of the Chair of metallurgical technologies and equipment*

***Kalitaev A.N.2****, Cand.Sci. (Eng.), Assist. Proffessor of the Chair of Computer Engineering and Programming*

**1The National University of Science and Technology MISiS, Novotroitsk branch**

(8, Frunze, Novotroitsk, 462359, Russia)

**2Nosov Magnitogorsk State Technical University**

(38, Lenin Avenu, Magnitogorsk, 455000, Russia)

***Abstract.*** In this paper have been identified the main parameters of steel degassing. They determine hydrogen removal efficiency by ladle degassing plant, operating in EAF JSC "Ural Steel": vacuum level, vacuum period, argon consumption, ladle temperature, the thickness of slag layer and freeboard.

The quantitative effect of the vacuum parameters was determined. The regression equation that allows to predict the results of the removal of hydrogen was obtained. This equation can choice value of vacuum parameters in order to achieve a specified of hydrogen content in the steel.

The rational vacuum parameters have been defined which provide of hydrogen content of 2.1 ppm in the steel: a metal superheat temperature 100-110 °C, vacuum period to 20 minutes under pressure in the vacuum vessel at most 1.5 mbar, argon consumption - 0.05 m3/t.

The minimum residual content of hydrogen in steel, which is 1,6 ppm, is ensured at carrying out of steel degassing with superheat temperature of 120-125 °C for 40 minutes at a pressure in the vacuum vessel at most 1 mbar and the argon consumption to 0.072 m3/t.

***Keywords:*** hydrogen, ladle degassing plant, steel degassing, vacuum vessel, vacuum period, vacuum level, ladle temperature, argon consumption.

**REFERENCES**

1. Kudrin V.A. Teorija i tehnologija proizvodstva stali [The theory and steel production technology]. Moskow: Mir, OOO «Izdatel'stvo ACT», 2003. 528 p. (In Russ.)
2. Povolockij D.Ja., Kudrin V.A., Vishkarev A.F. Vnepechnaja obrabotka stali [Secondary Metallurgy]. Moskow: MISiS, 1995. 256 p. (In Russ.)
3. Morozov A.N., Strekalovskij M.M., Chernov G.I., Kacnel'son Ja.E. Vnepechnoe vakuumirovanie stali [tapped-metal degassing]. Moskow: Metallurgija, 1975. 288 p. (In Russ.)
4. Knjuppel' G. Raskislenie i vakuumnaja obrabotka stali. Chast' 1. Termodinamicheskie i kineticheskie zakonomernosti [Deoxidation and steel degassing. Part 1: Thermodynamic and kinetic regularities]. Moskow: Metallurgija, 1973. 312 p. (In Russ.)
5. Shapovalov A.N., Tutarova V.D., Kalitaev A.N. Sovershenstvovanie tehnologii vakuumirovanija osevyh marok stalej v uslovijah JeSPC OAO «Ural'skaja Stal'» [Improving the technology of vacuum degassing axial steels under EAF JSC "Ural Steel"]. Litejnye processy, 2003. No.12. pp. 93-103. (In Russ.)
6. Kalitaev A.N., Tutarova V.D., Shapovalov A.N., Bazhukov D.O. Problemy formirovanija kachestvennoj nepreryvnolitoj krugloj zagotovki na MNLZ [Continuous quality problems of formation round billets at CCM №1 JSC "Ural Steel"]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya, 2013. No.5. pp. 27-32. (In Russ.)
7. Shevchenko E.V., Shapovalov A.N. Problemy poluchenija kachestvennoj sljabovoj zagotovki na MNLZ №2 OAO «Ural'skaja Stal'» [Problems for good slab ingot in CCM №2 JSC «Ural Steel»]. Vestnik JuUrGU. Serija «Metallurgija», 2013. Vol. 13. No.1. pp. 68-73. (In Russ.)
8. Tekhnologicheskaya instruktsiya TI 13657842-СТ. ЭС-03-2014. Obrabotka stali na ustanovke vakuumirovanija [Technological instruction TI 13657842-СТ. ЭС-03-2014. Steel degassing], Novotroitsk, JSC "Ural Steel", 2014. 18 p. (In Russ.)
9. Burgman V., Davene Zh. Struktura zatrat na vakuumirovanie stali s uchetom obrabotki v agregate kovsh-pech' [The structure of the vacuum steel in the cost with processing in the ladle furnace]. Chernye metally, 2012. No.11. pp. 41-49. (In Russ.)
10. Zinchenko S.D., Filatov M.V., Efimov S.V., Dub A.V., Goshkadera S.V. Tehnologicheskie aspekty udalenija vodoroda s ispol'zovaniem ustanovki kovshevogo vakuumirovanija stali [Technological aspects of the removal of hydrogen using a ladle degassing plant]. Metallurg, 2004. No.11. pp. 41-42. (In Russ.)
11. Smirnov A.N., Safonov V.M. Vakuumirovanie stali: tehnologija, oborudovanie [Steel degassing: technology, equipment]. Jelektrometallurgija, 2008. No.11. pp. 8-14. (In Russ.)
12. Nikolaev A.O., Bigeev V.A., Nikolaev O.A., Chigasov D.K. Osobennosti vakuumirovanija trubnyh marok stali v uslovijah KKC OAO «MMK» [Features of vacuum tube steel grades in a CCC OJSC "MMK"]. Jelektrometallurgija, 2013. No.4. pp. 19-24. (In Russ.)
13. Zhitluhin E.G., Meling V.V., Dresvjankina L.E., Gudov A.G., Stepanov I.A. Osvoenie i povyshenie jeffektivnosti tehnologii vakuumirovanija stali [The development and improvement of the efficiency of steel degassing]. Stal', 2014. No.6. pp. 12-14. (In Russ.)
14. Protasov A.V., Sivak B.A., Luk'janov A.V., Nikitenko A.S., Shhjogolev N.A. Sostojanie i perspektivy razvitija kovshovogo vakuumirovanija zhidkoj stali [Condition and Prospects of vacuum ladle of molten steel]. Chernaja metallurgija, 2010. No.11(1331). pp. 38-44. (In Russ.)
15. Nebosov Ju.I., Suharev S.V., Kazakov S.V. Raschet kinetiki udalenija vodoroda v gazovuju fazu pri kovshevom vakuumirovanii [Calculation of kinetic remove hydrogen in the gas phase during ladle vacuum treatment]. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija, 2007. No.7. pp. 16-18. (In Russ.)
16. Morozov A.N. Vodorod i azot v stali [Hydrogen and nitrogen in steel]. Moskow: Metallurgija, 1968. 283 p. (In Russ.)
17. Karpenko G.V., Kripjatkevich R.I. Vlijanie vodoroda na svojstva stali [The effect of hydrogen on the properties of steel]. Moskow: Metallurgizdat, 1962. 197 p. (In Russ.)