

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 (alshapo@yandex.ru)

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

¹ Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»

(462359, Россия, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8)

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

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

Аннотация. Проведен анализ технологии дегазации стали 09Г2С, выплавленной в дуговой электропечи и обработанной на установке ковш-печь в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь». Выявлены основные параметры вакуумирования стали, определяющие эффективность удаления водорода на установке вакуумирования стали камерного типа: глубина и продолжительность вакуумирования, расход аргона, температура металла, толщина слоя шлака и величина свободного борта. Установлено, что наиболее существенное влияние данных параметров на содержание водорода происходит при увеличении продолжительности глубокой дегазации стали до 20 мин. Дальнейшее увеличение времени обработки не рекомендуется. Наибольший эффект остаточного давления во время дегазации наблюдается при одновременном снижении минимального давления до 2 мбар. Результаты вакуумирования стали значительно ухудшаются при возрастании остаточного давления. Повышение температуры металла до 1600 – 1620 °С способствует удалению водорода, но при температуре выше 1620 °С удаление водорода замедляется в значительной степени. 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 мин при давлении в вакуум-камере не более 1,5 мбар, расход аргона на продувку 0,05 м³/т. Потери температуры металла определяются общей длительностью обработки, которая зависит от продолжительности глубокого вакуумирования, технических возможностей оборудования и организации процесса дегазации стали. 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 мин 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.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-192-199

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 является вакуумирование [1 – 4].

В 2012 г. 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]. Техничес-

кие характеристики двухпозиционного вакууматора фирмы SIEMENS-VAI, действующего в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь», приведены ниже.

Максимальная масса металла в ковше, т	120
Высота свободного борта, не менее, мм	500
Общая высота вакуум-камеры, мм	5900
Диаметр вакуум-камеры, мм	5800
Число ступеней/эжекторов	5/7
Максимальная продолжительность вакуумной обработки, мин	56
Время работы насоса (разрежение >0,5 кПа), мин	6
Время вакуумирования (разрежение <0,5 кПа), мин	28
Максимальный расход пара, т/ч	14,230
Температура пара на входе, °С	205 – 210
Максимальное давление аргона, (МПа) бар	(1,7) 16

Максимальное давление азота, (МПа) бар	(1,2) 12
Расход аргона (максимальный)/(средний), м ³ /т	0,072/0,03
Расход азота, м ³ /т	0,016

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 ДСП должна составлять 1670 – 1700 °С, а в конце обработки на УПК перед отдачей на установку вакуумирования стали (УВС) – 1620 – 1640 °С [8].

Действующая в АО «Уральская Сталь» 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 – 19], как технических, так 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.

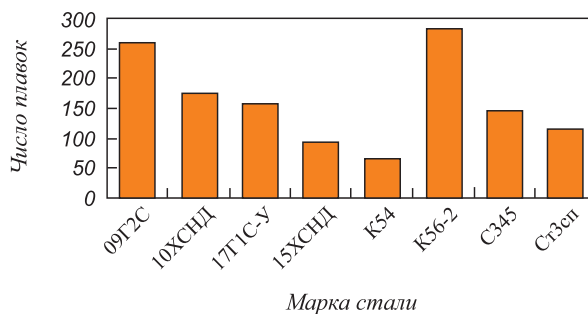


Рис. 1. Распределение плавков по маркам стали за исследуемый период

Fig. 1. Distribution of heats for steel grades during the studied period

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

Усредненные технологические параметры и результаты вакуумирования наиболее массовых марок стали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры и результаты вакуумирования стали*

Table 1. The process parameters and results of steel degassing*

Показатель	09Г2С	10ХСНД	17Г1С-У	К56-2	С-345
Число плавков	260	174	157	282	146
Конечное содержание водорода, ppm**	<u>1,3 – 4,5</u> 2,45	<u>1,1 – 3,7</u> 2,48	<u>1,0 – 3,5</u> 2,49	<u>1,2 – 4,0</u> 2,45	<u>1,2 – 3,6</u> 2,51
Длительность обработки на УВС, мин	<u>1 – 57</u> 38,2	<u>6 – 34</u> 21,8	<u>5 – 42</u> 21,1	<u>0 – 89</u> 21,6	<u>5 – 53</u> 21,61
Время обработки при глубоком вакууме (<0,5 кПа), мин	<u>0 – 47</u> 16,74	<u>6 – 34</u> 21,8	<u>1 – 33</u> 15,9	<u>0 – 30</u> 15,7	<u>1 – 31</u> 16,3
Минимальное давление в камере, мбар	<u>0,5 – 4,7</u> 2,22	<u>0,5 – 4,1</u> 1,7	<u>0,4 – 4,1</u> 1,8	<u>0,4 – 3,5</u> 1,9	<u>0,5 – 4,3</u> 1,9
Расход аргона, м ³ /т	<u>0,004 – 0,120</u> 0,033	<u>0,003 – 0,097</u> 0,030	<u>0,004 – 0,102</u> 0,031	<u>0,002 – 0,146</u> 0,030	<u>0,002 – 0,081</u> 0,027
Температура перед УВС, °С	<u>1616 – 1662</u> 1615,7	<u>1593 – 1650</u> 1615,9	<u>1602 – 1660</u> 1624,2	<u>1599 – 1653</u> 1617,5	<u>1592 – 1646</u> 1615,9
Температура после УВС, °С	<u>1541 – 1624</u> 1552	<u>1545 – 1603</u> 1552,8	<u>1543 – 1635</u> 1559,5	<u>1542 – 1646</u> 1556,5	<u>1555 – 1587</u> 1541,9
Снижение температуры металла на УВС, °С	54,7	55,9	55,3	54,6	65,8
Скорость падения температуры на УВС, °С/мин	1,44	1,44	1,48	1,42	1,44
Уровень шлака в ковше, мм	<u>100 – 150</u> 139	<u>100 – 150</u> 140,2	<u>100 – 150</u> 140,1	<u>100 – 150</u> 139,4	<u>100 – 200</u> 138,9
Свободный борт, мм	<u>400 – 600</u> 413,2	<u>400 – 900</u> 422,7	<u>400 – 700</u> 421,9	<u>400 – 650</u> 420,5	<u>400 – 900</u> 419,3

* В числителе – диапазон изменения, в знаменателе – среднее значение.

** Содержание водорода в стали перед вакуумированием в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» не определяется.

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

Известно, что в практике производства низколегируемых сталей для нефтегазовых труб, судостроения и других областей народного хозяйства водород является вредной примесью [1 – 4, 10, 20 – 23]. Количество водорода в стали определяется типом процесса выплавки, шлаковым режимом, используемыми материалами и другими факторами [1 – 4]. Поскольку 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, производимой в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» – более 15 % 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 рис. 2 приведена частота распределения содержания водорода по анализируемым плавкам стали 09Г2С (на основе 253 плавки).

Как видно из рис. 2, на более 90 % плавки содержание водорода в стали 09Г2С обеспечивалось на уровне менее 3 ppm, однако в некоторых плавках отмечалось увеличение содержания водорода до 4,0 – 4,5 ppm, что свидетельствует о нестабильности процесса и необхо-

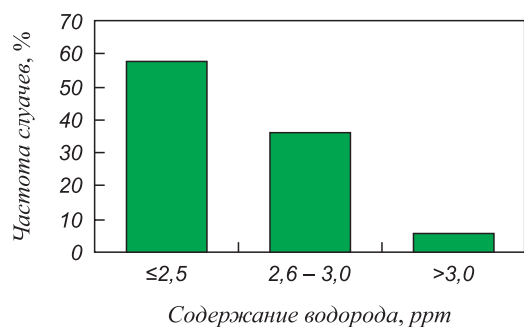


Рис. 2. Частота распределения содержания водорода

Fig. 2. Allocation frequency of the hydrogen content

димости 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 плавки 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 рис. 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 мин, 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 табл. 2.

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».

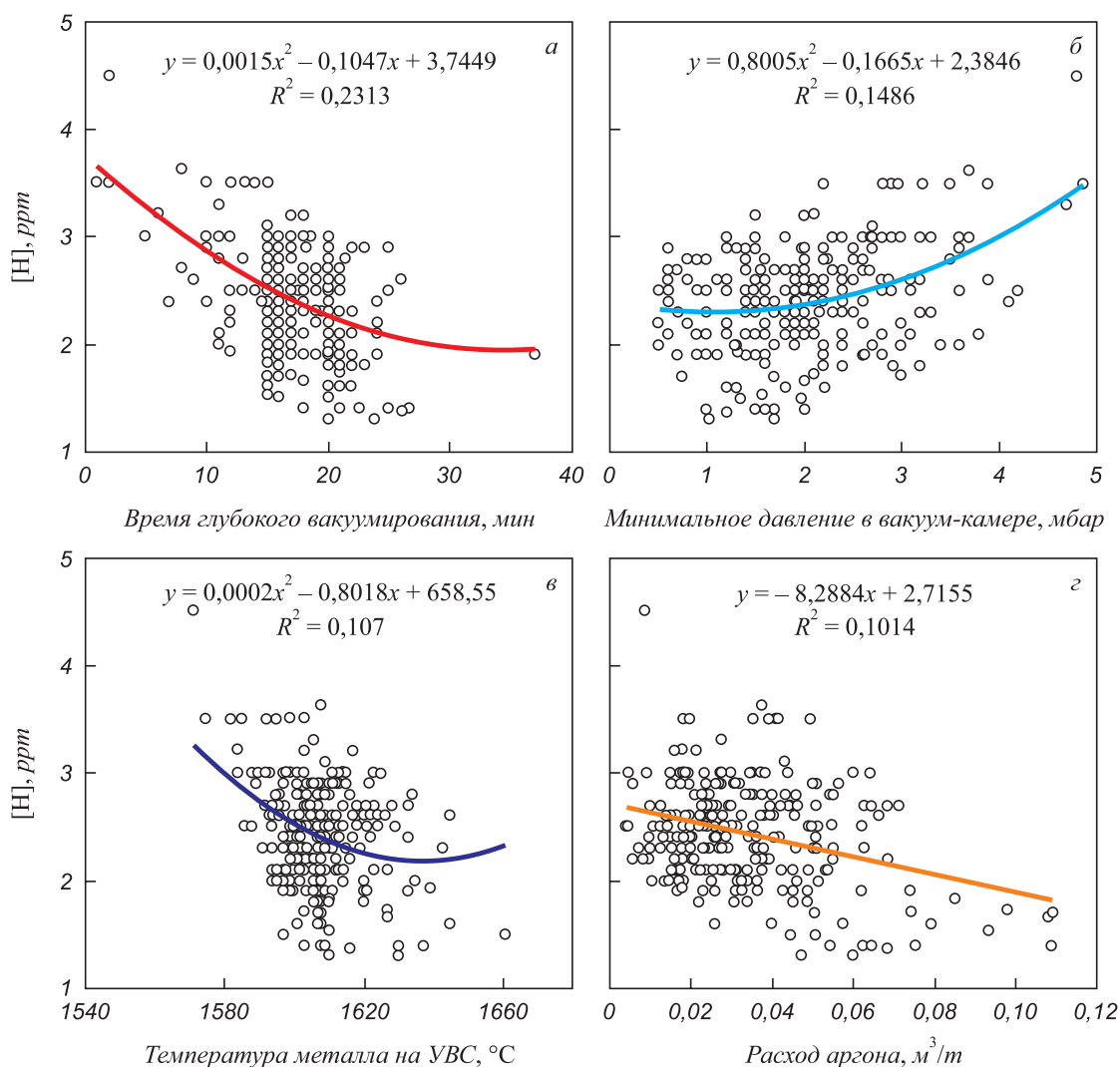


Рис. 3. Влияние параметров вакуумирования на остаточное содержание водорода в стали

Fig. 3. Influence of degassing parameters on the residual hydrogen in steel

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа

Table 2. Results of the regression analysis

Фактор	Коэффициент в уравнении	Среднее значение фактора	Абсолютное влияние фактора	Степень влияния фактора, %
$[H] = 4,224 - 0,064\tau_b + 0,0008\tau_b^2 + 0,0136p_{\min} + 0,0215p_{\min}^2 - 0,015t_{\text{пер}} + 6,23 \cdot 10^{-5}t_{\text{пер}}^2 - 5,966v_{\text{Ar}}$ Коэффициент множественной регрессии 0,58				
Длительность глубокого вакуумирования на УВС (τ_b), мин	-0,064	16,906	-0,837	-46,762
τ_b^2	0,0008	303,042		
Минимальное давление в вакуум-камере (p_{\min}), мбар	0,0136	2,003	0,130	7,218
p_{\min}^2	0,0215	4,751		
Температура перегрева на УВС ($t_{\text{пер}}$), °C	-0,015	97,318	-0,880	-49,114
$t_{\text{пер}}^2$	$6,23 \cdot 10^{-5}$	9621,337		
Расход аргона (v_{Ar}), м³/т	-5,966	0,034	-0,203	-11,340

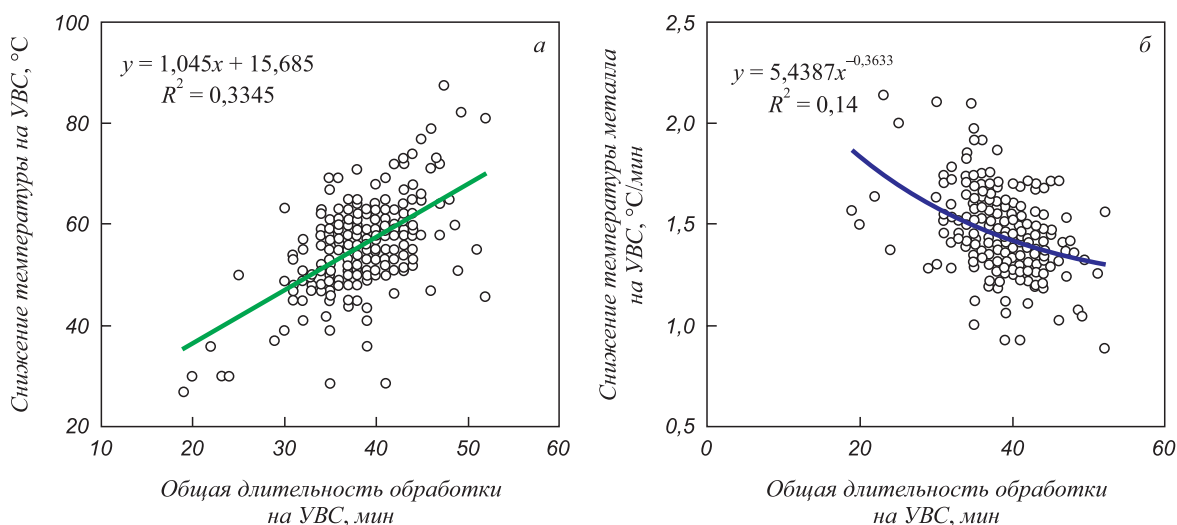


Рис. 4. Влияние продолжительности вакуумной обработки на температуру металла

Fig. 4. Influence of degassing period on the metal temperature

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 мин;
- 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 сталеразливочном ковше 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 09Г2С по традиционной технологии в условиях АО «Уральская Сталь» (рис. 4) выявил определяющее влияние общей продолжительности обра-

ботки, с увеличением которой линейно растет падение температуры, а скорость ее падения постепенно замедляется.

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

Из ранее выполненного анализа следует, что увеличение длительности глубокого вакуумирования более 20 мин нерационально ни с точки зрения удаления водорода, ни с точки зрения потерь температуры. Так, при длительности глубокого вакуумирования 20 мин, общая продолжительность обработки на УВС составит 40 мин (рис. 5) и, как следует из зависимости снижения температуры металла на УВС (Δt , °C) от длительности обработки (τ , мин) $\Delta t = 1,045\tau + 15,685$ (рис. 4, а),

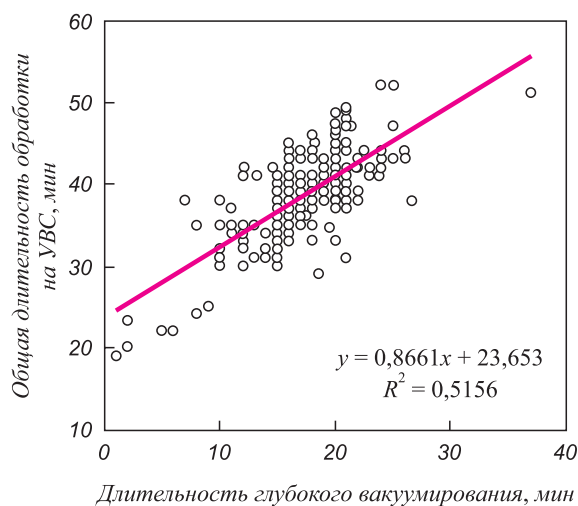


Рис. 5. Взаимосвязь общей продолжительности обработки на УВС с длительностью глубокого вакуумирования

Fig. 5. Correlation of total treatment time on the ladle degassing plant with the duration of deep degassing

Текущие и расчетные параметры и результаты вакуумирования в условиях АО «Уральская Сталь»

Table 3. Current and calculated parameters and degassing results in conditions of JSC “Ural Steel”

Параметр вакуумирования	Значение параметра		
	фактическое	оптимальное*	рациональное
Длительность глубокого вакуумирования на УВС, мин	16,91	39,92	20
Минимальное давление в вакуум-камере, мбар	2	1	1,5
Температура перегрева на УВС, °С	97,32	122	105
Расход аргона, м ³ /т	0,034	0,072	0,05
Остаточное содержание водорода, ppm	2,39	1,63	2,13

* С точки зрения достижения минимального содержания водорода.

потери температуры металла составят 60 °С. При реализации технологии обработки металла по схеме ДСП–УКП–УВС–МНЛЗ, оптимальном перегреве металла в сталеразливочном ковше 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 примерно 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 (табл. 2), 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 табл. 3.

Выводы. Определены основные параметры вакуумирования стали, влияющие на 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 АСТ», 2003. – 528 с.
2. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарёв А.Ф. Внепечная обработка стали: Учебник для вузов. – М.: МИСиС, 1995. – 256 с.
3. Внепечное вакуумирование стали / А.Н. Морозов, М.М. Стрелков, Г.И. Чернов, Я.Е. Кацнельсон. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
4. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 1. Термодинамические и кинетические закономерности: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1973. – 312 с.
5. Шаповалов А.Н., Тутарова В.Д., Калитаев А.Н. 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 // Изв. вуз. 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. Т. 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., Филатов М.В., Ефимов С.В. и др. Технологические аспекты удаления водорода с использованием установки ковшевого вакуумирования стали // 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., Бигеев В.А., Николаев О.А., Чигасов Д.К. Особенности вакуумирования трубных марок стали в условиях ККЦ ОАО «ММК» // Электрометаллургия. 2013. № 4. С. 19 – 24.
13. Житлухин Е.Г., Мелинг В.В., Дресвянкина Л.Е. и др. Освоение и повышение эффективности технологии вакуумирования стали // Сталь. 2014. № 6. С. 12 – 14.
14. Протасов А.В., Сивак Б.А., Лукьянов А.В. и др. Состояние и перспективы развития ковшевого вакуумирования жидкой стали // 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 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 7. С. 16 – 18.
16. Ardelean E., Neput T., Vătăşescu M., Crişan E. Researches regarding the influence of vacuum parameters on the efficiency of gas removal from the liquid steel // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 254. P. 218 – 223.

17. Socalici A., Popa E., Heput T., Drăgoi F. Researches regarding the improvement of the steel quality // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 216. P. 273 – 278.
18. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Numerical study on the removal of hydrogen and nitrogen from the melt of medium carbon steel in vacuum tank degasser // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 762. P. 253 – 260.
19. Stenholm K., Andersson M., Tilliander A., Jönsson P.G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing // *Ironmaking & Steelmaking*. 2013. Vol. 40. Issue 3. P. 199 – 205.
20. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. – М.: Металлургия, 1968. – 283 с.
21. Карпенко Г.В., Криптяквич П.И. Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 197 с.
22. Fábán E.R., Dévényi L. Hydrogen in the plastic deformed steel // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 537 – 538. P. 33 – 40.
23. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L. B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 880. P. 42 – 47.

Поступила 4 августа 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 3, pp. 192–199.

REGULARITIES OF HYDROGEN REMOVAL ON THE LADLE DEGASSING PLANT

V.D. Tutarova¹, A.N. Shapovalov¹, A.N. Kalitaev²

¹Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology “MISIS”, Novotroitsk, Orenburg Region, Russia

²Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article describes the analysis of degassing technology of 09G2S steel, smelted in an electric arc furnace and processed in the ladle furnace in the conditions of EAF JSC “Ural Steel”. The main parameters of steel degassing have been identified. These parameters, determining the hydrogen removal efficiency on the degassing unit of chamber type, are: level and period of steel degassing, argon consumption, metal temperature, thickness of the slag layer and the value of free board. It was found that the most significant impact on the hydrogen content can be observed at increasing the duration of deep steel degassing up to 20 minutes. Further increase in treatment time is not advisable. The greatest effect of the residual pressure during degassing was observed while reducing the minimum pressure to 2 mbar. The results of steel degassing worsen significantly at the increasing of the residual pressure. Increasing metal temperature up to 1600 – 1620 °C promotes the removal of hydrogen, but at temperatures above 1620 °C substantially slows the hydrogen removal. The quantitative impact of steel degassing parameters and the regression equation were found and that allows to predict the results of the hydrogen removal. This equation allows to determine the steel degassing parameters and to achieve a predetermined content of hydrogen in steel. The rational parameters of steel degassing were determined, which provide of hydrogen content to 2.1 ppm in the steel: a superheat temperature of metal – 100 – 110 °C, the duration of the steel degassing process to 20 minutes under the pressure in the vacuum vessel at most 1.5 mbar, argon consumption – 0.05 m³/t. The losses of metal temperature are determined by the total duration of the processing, which depends on the duration of deep vacuum, on the technical capabilities of equipment and organization of the degassing steel process. 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 with the consumption of argon – to 0.072 m³/t.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-192-199

REFERENCES

1. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali: Uchebnik dlya vuzov* [Theory and technology of steel production]. Moscow: Mir, 2003, 528 p. (In Russ.).
2. Povolotskii D.Ya., Kudrin V.A., Vishkarev A.F. *Vnepechnaya obrabotka stali: Uchebnik dlya vuzov* [Ladle treatment of steel: Textbook for universities]. Moscow: MISiS, 1995, 256 p. (In Russ.).
3. Morozov A.N., Strekalovskii M.M., Chernov G.I., Katsnel'son Ya.E. *Vnepechnoe vakuumirovanie stali* [Ladle degassing of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 288 p. (In Russ.).
4. Knüppel Helmut. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 1. Thermodynamische und kinetische Grundlagen*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1970, 310 S. (Russ.ed.: Knüppel H. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Ch. I. Termodinamicheskie i kineticheskie zakonomernosti*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 312 p.).
5. Shapovalov A.N., Tutarova V.D., Kalitaev A.N. Improving the technology of vacuum degassing of axial steels at EAF of JSC “Ural Steel”. *Liteinye protsessy*. 2003, no. 12, pp. 93–103. (In Russ.).
6. Kalitaev A.N., Tutarova V.D., Shapovalov A.N., Bazhukov D.O. Problems of formation of quality round billets at CCM. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 5, pp. 27–32. (In Russ.).
7. Shevchenko E.V., Shapovalov A.N. Problems of production of quality slab ingot at CCM no. 2 of JSC “Ural Steel”. *Vestnik YuUr-GU. Seriya “Metallurgiya”*. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.).
8. *Tekhnologicheskaya instruksiya TI 13657842-ST. ES-03-2014 Obrabotka stali na ustanovke vakuumirovaniya* [Technological instruction TI 13657842-ST. ES-03-2014. Steel degassing]. Novotroitsk: OAO “Ural'skaya Stal”, 2014, 18 p. (In Russ.).
9. Burgman V., Davene Zh. Structure of the costs of steel degassing based upon ladle furnace processing. *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. Technological aspects of hydrogen removal with the use of a ladle-type vacuum-degassing unit. *Metallurgist*. 2004, vol. 48, no. 11–12, pp. 553–556.
11. Smirnov A.N., Safonov V.M. Steel degassing: technology, equipment. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 11, pp. 8–14. (In Russ.).
12. Nikolaev A.O., Bigeev V.A., Nikolaev O.A., Chigasov D.K. Features of degassing of pipe steel grades at CCC of OJSC “MMK”. *Elektrometallurgiya*. 2013, no. 4, pp. 19–24. (In Russ.).
13. Zhitlukhin E.G., Meling V.V., Dresvyankina L.E., Gudov A.G., Stepanov I.A. 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'yanov A.V., Nikitenko A.S., Shchegolev N.A. Condition and prospects of vacuum ladle of molten steel. *Chernaya metallurgiya*. 2010, no. 11 (1331), pp. 38–44. (In Russ.).
15. Nebosov Yu.I., Sukharev S.V., Kazakov S.V. Calculation of kinetic remove hydrogen in the gas phase during ladle vacuum treatment. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 7, pp. 16–18. (In Russ.).
16. Ardelean E., Hepuț T., Vătășescu M., Crișan E. Researches regarding the influence of vacuum parameters on the efficiency of gas removal from the liquid steel. *Solid State Phenomena*. 2016, vol. 254, pp. 218–223.

17. Socalici A., Popa E., Heput T., Drăgoi F. Researches regarding the improvement of the steel quality. *Solid State Phenomena*. 2014, vol. 216, pp. 273–278.
18. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Numerical study on the removal of hydrogen and nitrogen from the melt of medium carbon steel in vacuum tank degasser. *Materials Science Forum*. 2013, vol. 762, pp. 253–260.
19. Stenholm K., Andersson M., Tilliander A., Jönsson P.G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013, vol. 40, no. 3, pp. 199–205.
20. Morozov A.N. *Vodorod i azot v stali* [Hydrogen and nitrogen in steel]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 283 p. (In Russ.).
21. Karpenko G.V., Kripyatkevich R.I. *Vliyanie vodoroda na svoistva stali* [Effect of hydrogen on the properties of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 197 p. (In Russ.).
22. Fábíán E.R., Dévényi L. Hydrogen in the plastic deformed steel. *Materials Science Forum*. 2007, vols. 537–538, pp. 33–40.
23. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L. B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 880, pp. 42–47.

Information about the authors:

V.D. Tutarova, *Cand.Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgical Technology and Equipment”*

A.N. Shapovalov, *Cand.Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgical Technology and Equipment”* (alshapo@yandex.ru)

A.N. Kalitaev, *Cand.Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Computer Engineering, and Applied Mathematics”*

Received August 4, 2016