

## **ГАЗОВЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ ДЛЯ ПЛАВКИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ**

*Аннотация.* Газовые плавильные агрегаты на водородном топливе позволяют вести плавку шихтовых материалов, имеющих высокую температуру плавления. Добавка в продукты горения углеродсодержащих веществ снижает энергоёмкость процесса плавки, достигается повышение температуры, уменьшается расход топлива, повышается производительность плавильного агрегата.

*Ключевые слова:* газовый плавильный агрегат, водород, углеродсодержащие вещества.

*Abstract.* The gas melting system based on hydrogen fuel enable to melt charge materials with high melting point. The addition of carbonaceous substances in the combustion products reduces energy intensity of the melting process, raises the temperature, reduces fuel consumption, increases productivity of a melting unit.

*Key words:* gas melting system, hydrogen, carbonaceous substances.

### **Введение**

Энергетика, основанная на ископаемом топливе, создает много экологических проблем. Возникает дилемма: без энергии нельзя сохранить нашу цивилизацию, однако существующие методы производства энергии и высокие темпы роста ее потребления приводят к загрязнению окружающей среды. Естественно, что поиск путей преодоления экологических проблем – одна из основных задач, стоящих перед современной энергетикой.

Проблема состоит в том, что существующие источники энергии ограничены. Для того чтобы иметь топливо, когда на Земле будут исчерпаны запасы нефти и газа, и решить экологические проблемы, необходимо переходить к новым источникам энергии и иметь «чистую энергетику». Поэтому перспективной является водородная энергетика – использование водорода как основного энергоносителя. Благодаря этому резко сократится потребление ископаемых топлив, потому что водород можно получать из воды, разлагая ее на водород и кислород. Вода является более дешевым и доступным сырьем для получения водорода.

Как топливо, водород применяется в двигателях ракет и в топливных элементах. Водород используется и в черной металлургии, с его помощью восстанавливают металлы из окислов, он легко транспортируется по газопроводам и имеет значительное преимущество перед другими видами топлива. Водород можно будет использовать для отопления печей литейного производства.

### **1. Описание процессов, происходящих при сжигании водородного топлива**

Одной из важнейших задач для предприятий машиностроительного и металлургического комплекса, имеющих литейное производство, является задача достижения экономичности при использовании водородного топлива для нагрева железоуглеродистых сплавов, так как продуктами сгорания водо-

родного топлива являются пары воды, которые при высокой температуре могут окислять железо, способствовать увеличению потерь металла и ухудшать процессы теплопередачи. Все это свидетельствует о проблеме нагрева углеродсодержащих материалов, уменьшения потерь материала, уменьшения теплообмена при нагреве.

Идея решения этой проблемы заключается в том, что процесс, включающий сжигание водородного топлива, нагрев материала продуктами сгорания, осуществляют таким образом, что в местах теплообмена снижают окислительные свойства продуктов сгорания путем введения газообразных или порошкообразных раскислителей, содержащих мелкодисперсный углерод.

Проблемой плавки тугоплавких материалов является необходимость повышения температуры в печи. Решить эту проблему можно, если для плавки материала, включающей сжигание в печи газообразного топлива, нагрев, плавление и перегрев материала продуктами сгорания, использовать водород, к которому добавлять углеродсодержащие вещества. Это позволяет повысить экономичность процесса, интенсифицировать теплопередачу, повысить термический коэффициент полезного действия тепловых агрегатов, уменьшить потери, повысить тепловое напряжение и температуру, снизить энергоемкость процесса плавки, повысить температуру в печи, что обеспечит проведение плавки тугоплавких материалов, так как водород имеет большую, по сравнению с природным газом, теплоту сгорания и жаропроизводительность, факел при горении более короткий, следовательно, тепловое напряжение выше и не затрачивается энергия на диссоциацию метана. Так как продукты горения водорода обладают малой светимостью, то возникает необходимость в наличии в печной атмосфере мелких частиц углерода, что делает газовые потоки светящимися и повышает эффективность теплопередачи в зоне перегрева расплава и в зоне плавления шихты.

В 1990 г. был разработан способ плавки в газовой вагранке [1], содержащей водоохлаждаемую шахту с встроенными газовыми горелками и водоохлаждаемые балки, на которые загружается огнеупорная насадка, состоящая из тугоплавких и термостойких материалов. Недостатком этого способа является то, что он не позволяет проводить плавку тугоплавких шихтовых материалов, так как при повышении температуры в зоне расположения огнеупорной насадки выше 1650 °С наблюдается деформация насадочных тел. Они начинают подплавляться и слипаются, что приводит к уменьшению проходного сечения шахты, затрудняет процесс горения и ведет к срыву плавки.

Известен также способ плавки металла в газовой вагранке [2], согласно которому плавку осуществляют в газовой вагранке с уступами в шахте таким образом, что природный газ сжигают над поверхностью расплава с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha \approx 0,9-0,98$ . Выше горелочных туннелей состав газовой фазы в камере перегрева меняют за счет подачи природного газа,  $\alpha \approx 0,6-0,7$ , в зоне плавления  $\alpha \approx 0,4-0,5$ . Однако этот способ не позволяет создавать высокую температуру в вагранке, приводит к увеличенному расходу энергоносителя, так как значительное количество тепла затрачивается на диссоциацию метана.

Техническим результатом предлагаемого способа плавки материалов в шахтной печи – в газовой вагранке, который может быть применен в литейном производстве, является снижение энергоемкости процесса плавки, по-

вышение температуры в печи и возможность плавки тугоплавких материалов. Плавку материала в газовой вагранке [3], в которой имеется опорная часть, шахта, газовые горелки, копильник, путем сжигания газообразного топлива, нагрева, плавления и перегрева материала продуктами сгорания осуществляют таким образом, что в качестве топлива используют водород, к которому добавляют углеродсодержащие вещества. Например, газообразные, жидкие углеводороды или мелкодисперсный углерод в виде дробленого графита, древесного угля, термоантрацита. Футеровка выполняется из огнеупорных изделий, имеющих огнеупорность 2500 °С. В газовые горелки подается топливо – водород и воздух в качестве окислителя. Кроме того, для повышения светимости продуктов горения водорода в горящий факел подают углеродсодержащие вещества, что повышает эффективность теплопередачи в камере перегрева и шахте вагранки. В течение 20–30 мин прогревают камеру перегрева, шахту вагранки и копильник, затем загружают шихтовые материалы. Поднимаясь вверх, подсвеченные продукты сгорания водорода нагревают и плавят шихту. Расплав в капельно-струйном режиме стекает в камеру перегрева, где дополнительно перегревается в ванне, образованной на подине камеры перегрева, и затем поступает в копильник. Ввод углеродсодержащего вещества обусловлен необходимостью повышения эффективности теплопередачи за счет увеличения светимости продуктов сгорания водорода.

Экспериментальные плавки проводили в газовой вагранке с водоохлаждаемыми уступами в шахте (рис. 1).

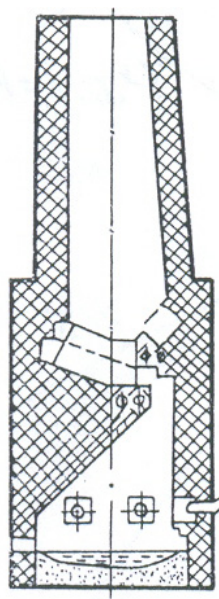


Рис. 1. Газовая вагранка с водоохлаждаемыми уступами в шахте

В качестве топлива использовали технический водород, который сжигали в воздушной среде. Непосредственно в горящий факел вводили углеродсодержащее вещество в виде мелкодисперсного углерода, количество которого изменяли от 0,5 до 21 % от массы водорода.

После прогрева футеровки вагранки и копильника загружали шихту, содержащую чугуны и до 65 % стального лома. Расход водорода во всех плав-

ках сохранялся постоянным. Доводку расплава по химическому составу производили в индукционном миксере. Результаты плавов представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты исследований

Условия плавки	Температура продуктов сгорания в камере перегрева, °С	Температура расплава, °С	Расход углеродсодержащего вещества, % от массы водорода	Производительность печи, т/ч	Удельный расход топлива, кг/т	Примечание
Известный способ. Топливо – природный газ	1700	1480	0	0,5	143,4	В расплаве образовалось 30 % FeO
Предлагаемый способ. Топливо – водород	1900	1490	0,5	0,7	42,9	
	1900	1535	1,0	0,75	40,0	
	1900	1540	2,0	0,96	31,25	
	1900	1540	7,0	0,98	30,6	
	1900	1540	13,0	1,0	30,0	
	1900	1540	19,0	0,97	30,9	
	1870	1530	20,0	0,95	31,6	
1850	1520	21,0	0,95	31,6		

**Примечания.** 1. Диапазон температур продуктов сгорания в камере перегрева  $\pm 20$  °С; 2. Диапазон температур расплава  $\pm 10$  °С.

Как видно из табл. 1, применение в качестве топлива водорода позволяет вести плавку шихтовых материалов, имеющих высокую температуру плавления, а добавка в продукты горения 2–19 % углеродсодержащих веществ снижает энергоёмкость процесса плавки [4, 5].

Применение в качестве топлива водорода позволяет вести плавку шихтовых материалов, имеющих высокую температуру плавления, а добавка в продукты горения углеродсодержащих веществ снижает энергоёмкость процесса плавки, достигается повышение температуры на 46–63 °С, уменьшается расход топлива на 26,3–32,0 %, повышается производительность плавильного агрегата на 35,7–44,0 %.

Добавка в высокотемпературную зону горящего факела водорода менее 2 % углеродсодержащих веществ не обеспечивает необходимую светимость факела, температура расплава понижается, производительность вагранки падает, а удельный расход топлива увеличивается. При добавке в продукты горения более 19 % мелкодисперсного углерода снижается температура расплава, так как большее количество тепла затрачивается на нагрев частичек углерода, а производительность печи и удельный расход топлива не изменяются.

## 2. Математическое моделирование процессов, происходящих при сжигании водородного топлива

Применение эффективной методики математического моделирования позволяет оптимизировать литейные процессы и прогнозировать их улучшение.

Математическое моделирование и расчеты по математическим моделям выполнены по программе NV5 (план 5, количество опытов по плану  $X = 5$ ) [6–8].

Таблица 2

Данные для математического моделирования  
(показатели степени  $J1 = 1$ ,  $O1 = 1,5$ ,  $P1 = 2$ ,  $T1 = 2,5$ )\*

Расход углеродсодержащего вещества, % от массы водорода	Повышение температуры, °C	Уменьшение расхода топлива, %	Повышение производительности, %
1	2	3	4
A1 = 0,5	Y(1) = 0,1	Y(1) = 0,1	Y(1) = 0,1
B1 = 21	Y(2) = 40	Y(2) = 26,3	Y(2) = 35,7
C1 = 2	Y(3) = 55	Y(3) = 27	Y(3) = 37
D1 = 20	Y(4) = 50	Y(4) = 26,3	Y(4) = 35,7
E1 = 12	Y(5) = 60	Y(5) = 30	Y(5) = 42,9
Данные анализа адекватности математической модели			
Количество опытов на среднем уровне факторов N0	4	4	4
F8	3	3	3
Дисперсия опытов U9	0,08	0,07	0,09
Табличный <i>t</i> -критерий T0	3,182	3,182	3,182
Табличный <i>F</i> -критерий F7	9,12	9,12	9,12
Проверка точности и расчеты по модели	F(1) = 1 F(2) = 4 F(3) = 15 F(4) = 18 F(5) = 22	F(1) = 1 F(2) = 4 F(3) = 15 F(4) = 18 F(5) = 22	F(1) = 1 F(2) = 4 F(3) = 15 F(4) = 18 F(5) = 22

**Примечание.** \*  $J1$ ,  $O1$  – показатели степени первого фактора в уравнении регрессии (соответствуют величинам  $n$ ,  $r$  для первого фактора);  $P1$ ;  $T1$  – коэффициенты ортогонализации, определяемые при первом уровне фактора;  $Y$  – значения показателей процесса;  $F8$  – число степени свободы при определении дисперсии неадекватности;  $t$  – критерий Стьюдента;  $F7$  – табличный критерий Фишера;  $F(n)$  – расчетное значение критерия Фишера.

### Заключение

В результате проведенной работы были выявлены процессы, происходящие в газовых плавильных агрегатах, работающих на водородном топливе и позволяющие значительно снизить их энергоемкость и существенно улучшить экологическую обстановку, снизить выбросы вредных веществ в атмосферу: пыли – в 3 раза; сернистого ангидрида – в 50 раз; оксида углерода – в 100 раз; оксидов азота – в 3 раза.

Техническое решение предлагаемого способа (Патент РФ № 2340855 «Способ сжигания углеводородного топлива в вагранке» Черный А. А. и др.) может быть использовано при плавке тугоплавких неметаллических материалов, содержащих оксиды кремния, алюминия, магния, хрома, при плавке ми-

нерального сырья (тугоплавких природных минералов) для получения минеральной ваты в промышленности строительных материалов, литых огнеупорных изделий, каменного литья, причем конструкция печи может быть с водоохлаждаемыми элементами в шахте, с выносной камерой перегрева, с холостой огнеупорной колошей.

Применение методов математического моделирования, выявление математических моделей, выполнение расчетов по математическим моделям, анализ математических моделей и результатов расчетов позволяют прогнозировать и совершенствовать процессы плавки материалов в газовых плавильных агрегатах.

#### Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 1610209 / Грачев В. А. и др., кл. F 27 В 1/08, Б.И. № 44, 1990.
2. Авторское свидетельство СССР № 269947 / Черный А. А., Грачев В. А. и др., кл. С 21 С; В 22 В, Б.И. № 16, 1970.
3. **Грачев, В. А.** Конструктивные особенности газовых вагранок с холостой огнеупорной колошей / В. А. Грачев, А. А. Черный, В. Н. Моргунов // Труды восьмого съезда литейщиков России. – Ростов н/Д : Российская ассоциация литейщиков, 2007. – Т. 2. – С. 35–39.
4. **Соломоницина, С. И.** Закономерности воздействия на нагреваемый материал переменной подачи высокотемпературных продуктов сгорания водородсодержащего топлива / С. И. Соломоницина // Актуальные проблемы науки и образования : тр. XXI науч.-практ. Конф., посвященной 65-летию Победы в ВОВ. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010.
5. Пат. 2340855 Российская Федерация. Способ сжигания углеводородного топлива в вагранке / Черный А. А., Черный В. А., Соломоницина С. И., Фролова Т. Н. ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2007113999/02 ; опубл. 10.12.2008.
6. **Черный, А. А.** Применение математического моделирования для прогнозирования свойств сплавов / А. А. Черный // Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем : сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и студентов. – Пенза : Пензенский государственный университет ; Приволжский Дом знаний, 2007. – С. 135–139.
7. **Черный, А. А.** Компьютерные программы математического моделирования и расчетов по математическим моделям : учеб. пособ. / А. А. Черный. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 197 с. (Электронное учебное пособие).
8. **Черный, В. А.** Эффективные методы математического моделирования литейных процессов / В. А. Черный, А. А. Черный // Прогрессивные литейные технологии : тр. 4 Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. проф. В. Д. Белова. – М. : ИД МЕДПРАКТИКА–М, 2007. – С. 169–172.

---

**Соломоницина Светлана Ивановна**  
ведущий инженер, кафедра сварочного,  
литейного производства  
и материаловедения, Пензенский  
государственный университет

E-mail: ssolomonidina@yandex.ru

**Solomonidina Swetlana Ivanovna**  
Engineer, sub-department of welding  
and foundry production and materials  
science, Penza State University

**Дурина Татьяна Анатольевна**

старший преподаватель, кафедра  
сварочного, литейного производства  
и материаловедения, Пензенский  
государственный университет

E-mail: Tana23@rambler.ru

**Durina Tatyana Anatolyevna**

Senior lecturer, sub-department of welding  
and foundry production and materials  
science, Penza State University

---

УДК 621.74.01

**Соломоницина, С. И.**

**Газовые плавильные агрегаты на водородном топливе для плавки литейных сплавов** / С. И. Соломоницина, Т. А. Дурина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 120–126.