

ДАВЛЕНИЕ ГАЗОВ В РЕАКЦИОННОМ СЛОЕ ШИХТЫ В ПРОЦЕССЕ ВНЕПЕЧНОЙ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОВОЛЬФРАМА

К.Ю. Пашкеев, И.Ю. Пашкеев, К.С. Калинин, Е.Н. Карпенко

THE GAS PRESSURE IN THE REACTION LAYER OF THE BLEND IN THE PROCESS OF LADLE SMELTING OF FERROTUNGSTEN

K.Yu. Pashkeev, I.Yu. Pashkeev, K.S. Kalinin, E.N. Karpenko

Приведены методика и результаты измерения давления газов в реакционной зоне при выплавке ферровольфрама внепечным способом; результаты исследования металла и шлака в образцах шлакометаллических выбросов из горна. Дополнен сравнительный анализ работы горна с футеровкой из огнеупорного кирпича и перфорированного горна с теплоизолирующей засыпкой фактическими измерениями давления газов в зоне горения.

Ключевые слова: алюминотермия, ферровольфрам, газообразование, перфорированный горн.

The paper describes the method and results of measuring of gas pressure in the reaction zone of the ferrotungsten smelting hearth. Results of study of metal and slag in the slag-metal blowout from the hearth are also presented. A comparative analysis of functioning of standard hearth with fireproof brickwork and a hearth of new construction where gases leave reaction zone through a gas-permeable heat isolation filling and perforated frame is thus supplemented with the results of measuring the gas pressure in reaction zone.

Keywords: aluminothermy, ferrotungsten, gas formation, perforated hearth.

В исследованиях выделения газов при внепечном восстановлении металлов установлено, что источниками газовой выделению в горне являются компоненты шихты, их влажность и поровое пространство в шихте [1–4]. Вопросу выделения газов в процессе плавки много внимания уделено в работах А.С. Дубровина и соавторов, а в его монографии [3] впервые систематизированы результаты собственных экспериментальных работ и других авторов за длительный период времени. Анализ причин образования газов в процессе плавки и рекомендации по их снижению дали положительные результаты, однако до недавнего времени оставалась нерешенной задача отвода газов из реакционного слоя шихты.

В наших исследованиях [4, 5] было выполнено принципиальное требование нормального протекания процесса – отвод газов из реакционного слоя. Измерение давления газов в реакционном слое шихты алюминотермической плавки внепечного процесса выполнено впервые.

Типовые горны для проведения плавки представляют собой металлические цилиндрические шахты, футерованные огнеупорным кирпичом, отличающиеся объемом и отношением высоты шахты к диаметру. Многолетняя практика работы на горнах, футерованных огнеупорным кирпичом, описана в монографиях [6–9]. Следует отметить, что ни одна типовая конструкция горна не преду-

сматривает отвода газов из реакционной зоны, и это является их общей характерной особенностью. Во время выплавки 220–240 кг ферровольфрама ФВ-75 из горна объемом 0,285 м³ выделяется около 30 м³ газа [4]. При интенсивном течении реакции плавка сопровождается бурлением расплава и шлакометаллическими выбросами. Анализ состава и структуры шлакометаллических выплесков указывает на неоднородность металла, несоответствие металлических включений в выплесках составу слитка. Также следует отметить высокое содержание невосстановленного WO₃ в шлаке.

На рис. 1 представлена структура металла и шлака в выплесках, а в таблице – их составы.

В результате плавки был получен сплав: W – 71,51 %, Fe – 27,95 %, Al – 0,54 %, остальные элементы в металле не превышают требований ГОСТ 17293–93. Неоднородность капли металла хорошо видна на рис. 1. Микровключения вольфрама (светлые округлые пятна, рис. 1, г.) не растворились в железе (серая матрица, рис. 1, в) на момент выплеска.

По результатам анализа металла и шлака можно сделать следующие выводы:

– Шлакометаллические выплески связаны с газовыми выбросами, прерывающими нормальное течение алюминотермического процесса, в результате которого из компонентов шихты образуются капли металла. Только после их взаимного раство-

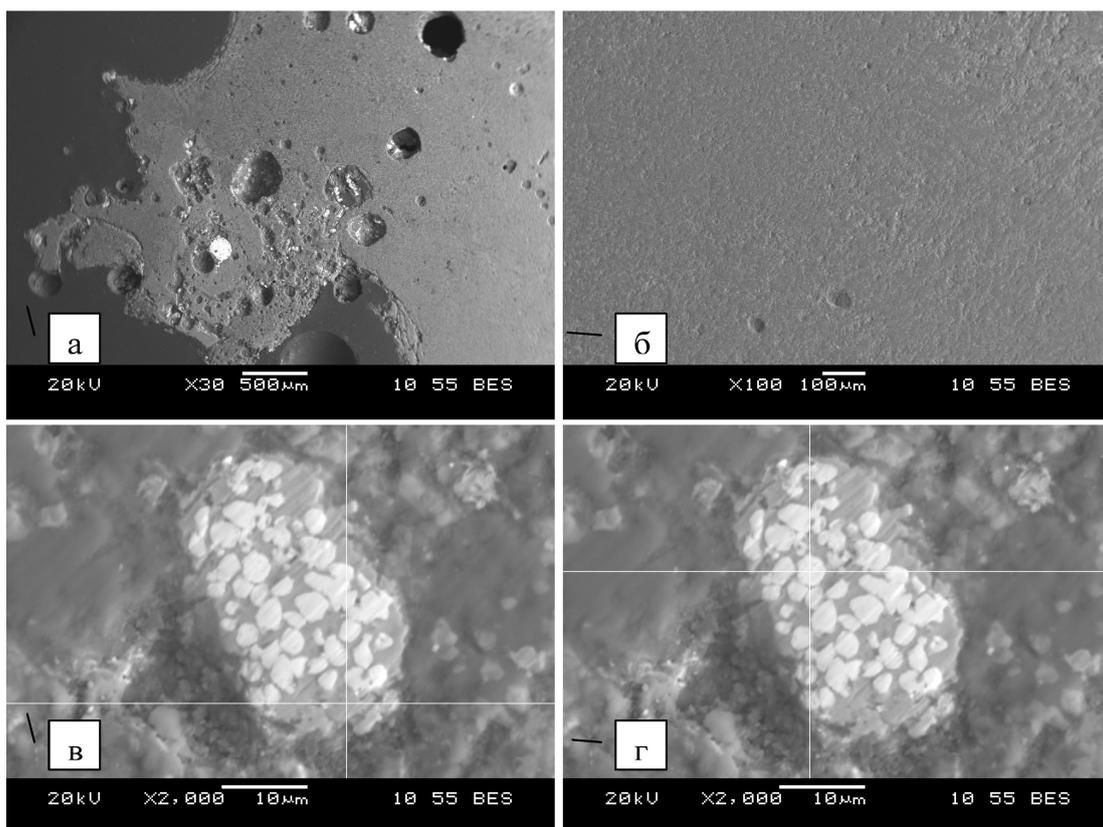


Рис. 1. Микрорентгеноспектральный анализ шлакометаллических выплесков: а – общий вид шлакометаллического выплеска, серое поле – шлак, светлые включения – металл; б – шлаковый выплеск без видимых металлических включений; в, г – металлические включения в шлаке

Элементный состав фаз шлакометаллического выплеска

Спектр	O	F	Na	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Cu	W
б	41,40	2,60	2,15	20,02	1,50	0,67	20,03	1,03	4,82	–	5,79
в	1,71	–	0,48	–	0,25	–	0,71	–	89,89	6,97	–
г	2,78	–	0,87	–	–	–	1,37	–	–	–	94,97

рения и гомогенизации образуется сплав марочного состава.

– В шлаковых выплесках повышенное содержание оксида вольфрама также подтверждает неполноту протекания процесса восстановления.

– Основная причина потерь вольфрама в процессе плавки – это вынос в виде возгонов и мелкодисперсной фракции концентрата с газами, а при интенсивном течении плавки – газовые выбросы шлакометаллического расплава. По результатам микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) в возгонах содержится от 5 до 6,5 % вольфрама.

Для определения давления выделяющихся газов в реакционной зоне была разработана авторами статьи методика, пояснение которой дополняет рис. 2.

В соответствии с методикой измерения газы отводились корундовыми трубками 6 из различных горизонтов горна 1, а их давление измерялось деформационным манометром 9 класса 1,5. Показания манометра записывались на цифровую камеру, которая включалась в момент зажигания

шихты. Далее запись с камеры передавалась на компьютер. По результатам показаний манометра, фиксированных во времени, строили график изменения давления в горне в процессе плавки. В исследованиях применялась двухканальная схема измерения давления в реакционном слое с помощью переключателя газовых каналов 8 на уровнях 500 и 750 мм, соответствующих $\frac{1}{2}$ и $\frac{3}{4}$ высоты горна 1 от верхней кромки.

Аналогичное измерение давления было выполнено и в перфорированном горне таких же размеров, но плавка в нем протекала иначе [4, 5]. Рис. 3 поясняет принципиальное отличие в работе агрегата.

Перфорированный корпус устанавливается на газопроницаемое основание 5, в котором копильник для металла заполнен металлотермической шихтой. Затем в перфорированный корпус соосно на копильник с металлотермической шихтой устанавливается тонкостенный цилиндр. Металлотермическая шихта 6 засыпается в тонкостенный цилиндр, а пространство между корпусом 1 и временно устанавливаемым цилиндром заполняется

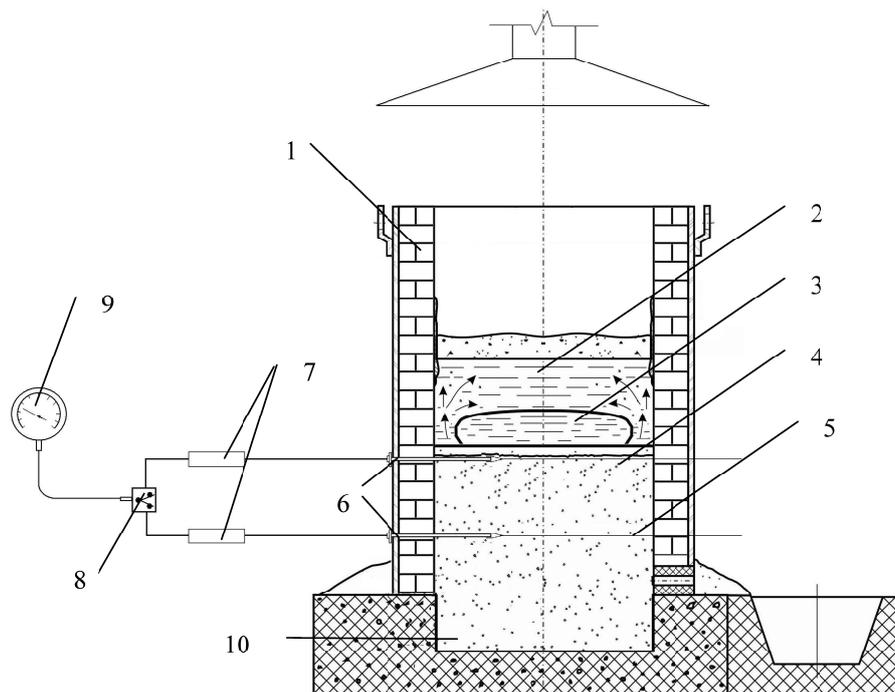


Рис. 2. Схема измерения давления газов в процессе алюминотермической плавки в типовом футерованном горне (стрелками показан выход газов из горна): 1 – горн; 2 – жидкий шлак; 3 – жидкий металл; 4 – реакционный слой; 5 – металлотермическая шихта; 6 – газоотводные трубки; 7 – газовые фильтры; 8 – переключатель газовых каналов; 9 – манометр; 10 – копильник для металла

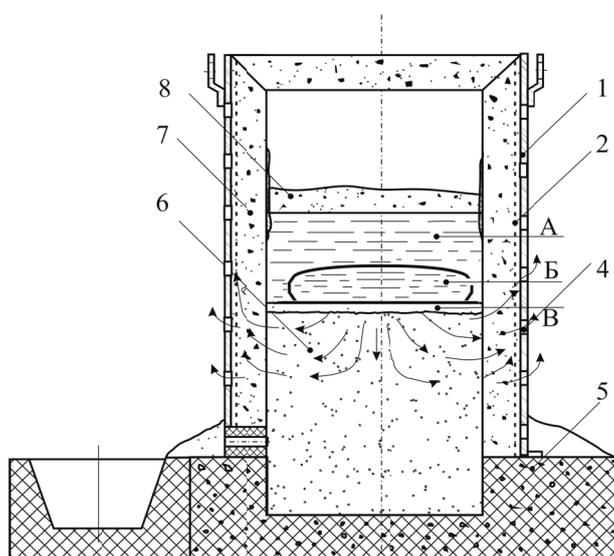


Рис. 3. Схема работы перфорированного горна: А – шлак; Б – металл; В – реакционный фронт горения, стрелками показан выход газов; 1 – корпус горна; 2 – металлическая сетка; 4 – отверстия в корпусе; 5 – основание с углублением для слитка (копильник); 6 – шихта; 7, 8 – засыпная футеровка; 3 – непоказанный на рисунке тонкостенный цилиндр, применяемый для разделения засыпной футеровки и металлотермической шихты, удаляемый после сборки горна

огнеупорной крупкой 7. После этого тонкостенный цилиндр удаляется, верхняя часть горна засыпается огнеупорной крупкой, там же устанавливается запальная смесь. Таким образом, в горне перед началом работы между металлотермической шихтой и газопроницаемым огнеупорным слоем отсутствует металлическая перегородка.

В начале процесса восстановления газы из реакционного слоя удаляются через слой верхней засыпки и боковую поверхность горна, а после образования шлакового слоя – через газопроницаемую засыпку 7 и отверстия 4 в боковой поверхности перфорированного горна. Результаты измерения давления в горне представлены на рис. 4 и 5.

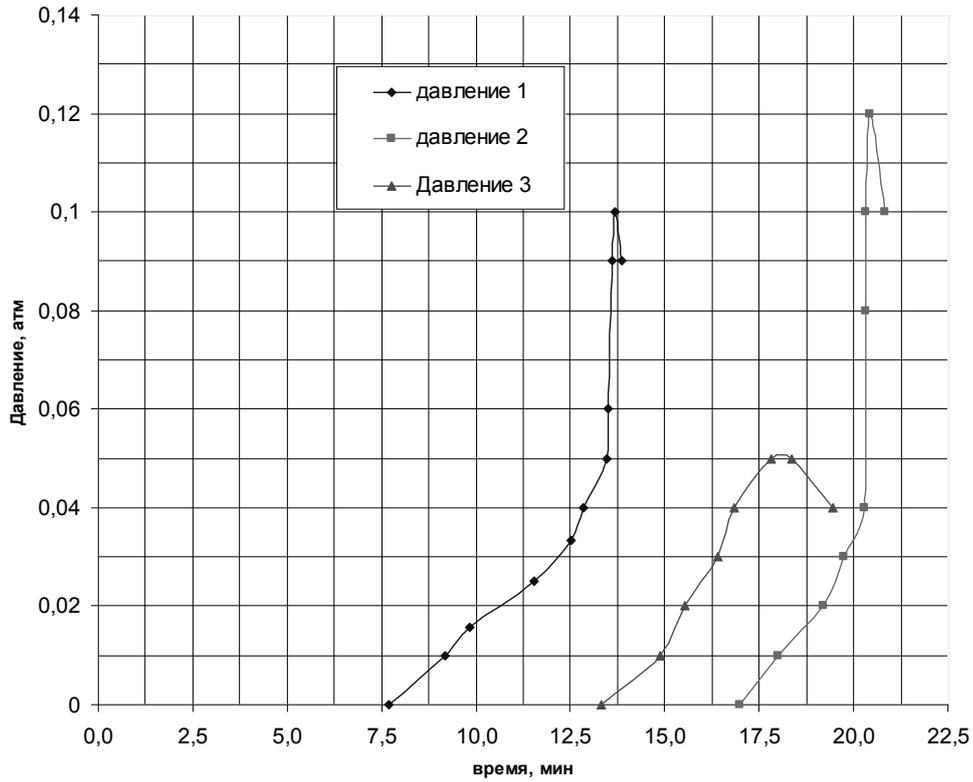


Рис. 4. Изменение избыточного давления в горне $V = 0,285 \text{ м}^3$ при выплавке 240 кг ферровольфрама: 1, 2 – горн типовой, футерованный кирпичом (горизонты измерения давления 0,5 и 0,75 м соответственно); 3 – горн перфорированный (измерение давления на уровне 0,75 м)

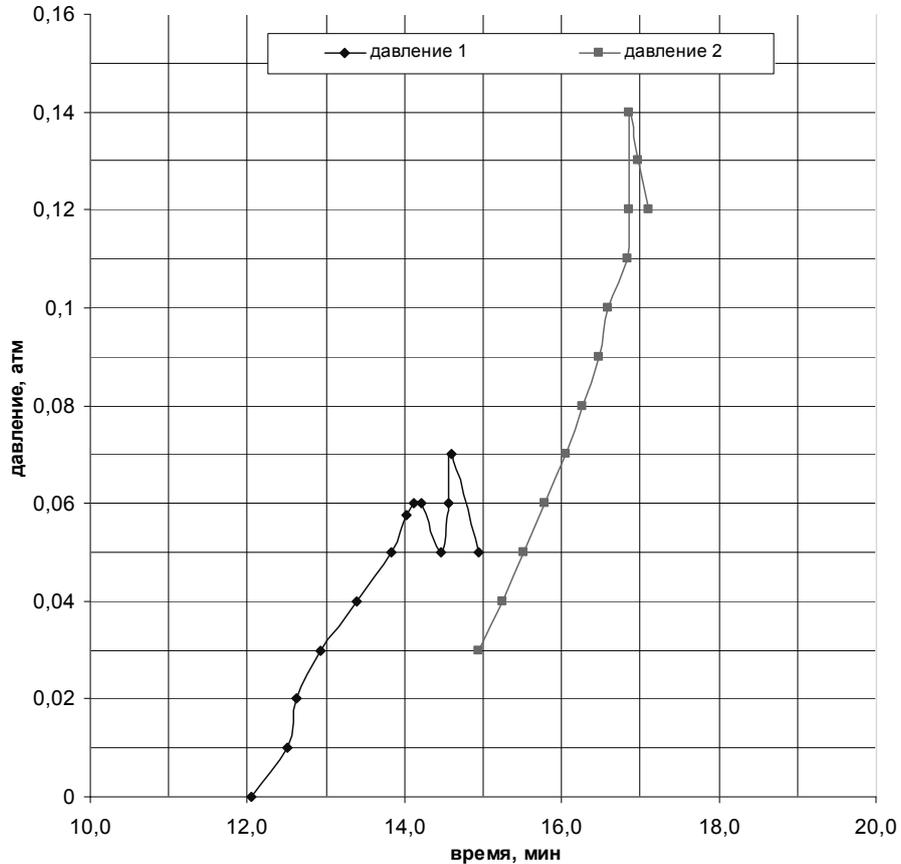
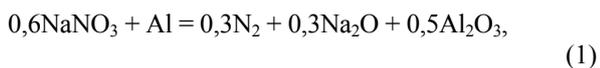


Рис. 5. Изменение давления в горне при выплавке 1240 кг ферровольфрама в футерованном горне

Аналогичные измерения давления в горне при выплавке 1240 кг в футерованном горне объемом 1,962 м³. приведены на рис. 5.

В процессе измерения давления зафиксировано бурное течение процесса с газовыми выбросами. При этом шлакометаллический расплав срабатывает как жидкий затвор, и цифровая камера зафиксировала снижение давления во время выплеска. Для горизонта $\frac{3}{4}h$ общее давление в зоне реакции выше в сравнении с горизонтом $\frac{1}{2}h$ и оно нарастает к концу процесса. На завершающем этапе горн работает особенно напряженно. Износ футеровки в нижней части горна больше, чем в верхней. Нередко происходят прорывы шлака между нижним торцом горна и основанием. Этому способствуют выделяющиеся газы, давление которых возрастает настолько, что газы способны приподнять и даже опрокинуть горн с металлом и шлаком.

Таким образом, газовая фаза, состоящая практически из чистого азота, активно участвует в алюминотермическом процессе. Взаимодействие натриевой селитры с алюминием происходит с выделением тепла и азота:



$$\Delta H = 6843,5 \text{ кДж.}$$

Воздух, который в исходном состоянии заполняет поровое пространство в металлургической шихте, также на 79 % состоит из азота. Согласно закону квадратного корня (закон Сиверца) растворимость азота в ферровольфраме пропорциональна квадратному корню из давления азота над расплавом:

$$[N]_{\text{FeW}} = k\sqrt{P_{\text{N}_2}}, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры. По физическому смыслу – это растворимость азота при $P_{\text{N}_2} = 1$ для данной температуры. В процессе кристаллизации растворимость азота падает. В результате в слитке образуются пузыри, трещины и раковины.

По данным работы [9, с. 534] общее содержание газов в ферровольфраме не превышает обычно 100 см³/100 г, из которых на водород приходится 3–15 см³/100 г. Содержание азота в сплаве колеблется в пределах 0,01–0,04 %.

Из полученных результатов следует, что для уменьшения газонасыщенности металла необходимо вести плавку интенсивно, уменьшая тем самым время контакта жидкого металла с атмосферой горна; снижать давление газов над поверхностью жидкого ферровольфрама путем их отвода через боковую поверхность перфорированного горна и газопроницаемый теплоизолирующий слой.

Регулирование давления газов в реакционном слое может осуществляться двумя параметрами: гранулометрическим составом теплоизолирующего слоя и его толщиной. Последний параметр определяет также теплотери в процессе плавки, его толщины для промышленных горнов лежат в пределах 65–100 мм, то есть соизмеримы с размерами футеровочного кирпича. Исследования газопроницаемости теплоизолирующего слоя в зависимости от толщины и размера зерна выполнены на типовом оборудовании для определения газопроницаемости формовочных смесей литейного производства (LPIR-1, “WADAP”, Польша). Газо-

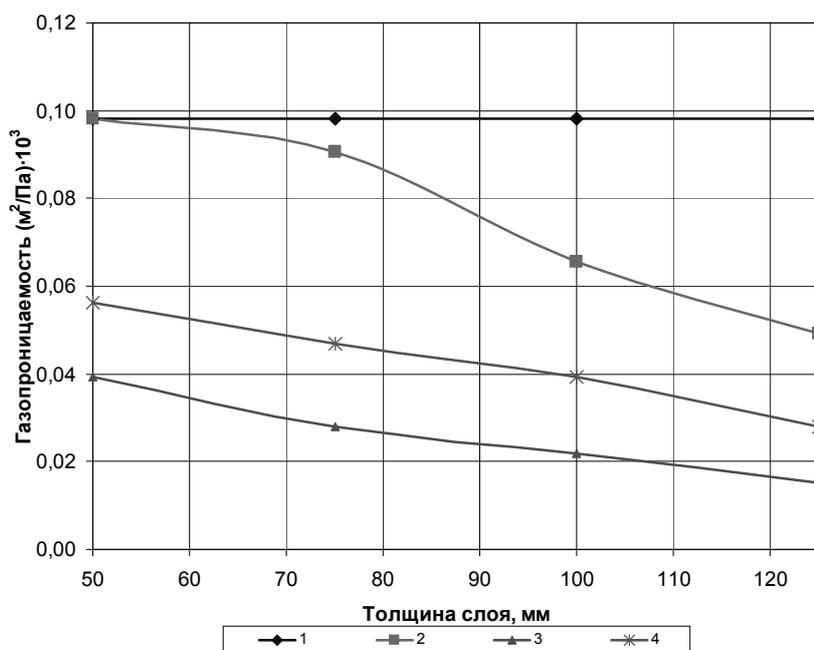


Рис. 6. Зависимость газопроницаемости огнеупорной засыпки от толщины слоя и его гранулометрического состава. 1 – фракция 1,6–2,5 мм; 2 – фракция 1,0–1,6 мм; 3 – фракция 0,5–1,0 мм; 4 – смесь фракций 1, 2, 3 в равных массовых соотношениях

проницаемость теплоизолирующего слоя определяет условие отвода газов из реакционного слоя и в связи с этим должна соответствовать производительности горна по газу. Скорость газового потока в поровом пространстве определяется по уравнению Бернулли, связывающему динамическое давление, плотность и скорость газового потока:

$$P = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

где P – давление газового потока; v – скорость газового потока; ρ – плотность газа.

Так как газ, выходящий из горна, близок по составу воздуху, то при расчете динамического давления по формуле (3) можно допустить, что плотность ρ – плотность воздуха при 1600 °С.

$$\rho_{\text{возд. 1600 °С}} \approx 0,19 \text{ кг/м}^3.$$

Зависимость газопроницаемости огнеупорной засыпки от толщины слоя и его гранулометрического состава приведена на рис. 6.

Выводы

- Разработана методика измерения давления газов в реакционном слое при внепечной алюминотермической выплавке металлов.

- Установлено изменение давления в горне в момент выброса шлакометаллической смеси из футерованного горна объемом 1,962 м³.

- Характер протекания плавки определяет условие насыщения ферровольфрама азотом и его выделение при кристаллизации.

Литература

1. Дубровин, А.С. Снижение газовыделения в металлургических процессах / А.С. Дубровин В.Л. Кузнецов // *Металлотермия: сб. науч. тр.* –

Челябинск: *Металлургия, Челяб. отд-ние.* – 1996. – № 17. – С. 41–49.

2. Алюминотермическая выплавка ферровольфрама / А.С. Дубровин, Г.Ф. Игнатенко, Н.И. Субботин и др. // *Производство ферросплавов.* – Челябинск: Южно.-Урал. кн. изд-во, 1972. – Вып 1. – С. 46–54.

3. Дубровин, А.С. Металлотермия специальных сплавов / А.С. Дубровин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 254 с.

4. Пашкеев, И.Ю. Газообразование в процессе алюминотермической выплавки ферровольфрама / И.Ю. Пашкеев, К.Ю. Пашкеев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».* – 2012. – Вып. 18. – № 15 (274). – С. 85–90.

5. Пат. 2465361 Российская Федерация, МПК C22C33/04, C21B15/02. Алюминотермический способ получения металлов и плавильный горн для его осуществления / И.Ю. Пашкеев, К.Ю. Пашкеев, Ю.И. Пашкеев, К.С. Калинин, Е.Н. Карпенко, А.В. Антипин; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). – № 2011137901/02; заявл. 14.09.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30. – 6 с.

6. Плинер, Ю.Л. Алюминотермическое производство ферросплавов и лигатур / Ю.Л. Плинер, С.И. Сучильников, Е.А. Рубинштейн. – М.: Металлургия, 1963. – 175 с.

7. Плинер, Ю.Л. Восстановление окислов металлов алюминием / Ю.Л. Плинер, Г.Ф. Игнатенко. – М.: Металлургия, 1967. – 248 с.

8. Алюминотермия / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, Г.Ф. Игнатенко, С.И. Лапто. – М.: Металлургия, 1978. – 424 с.

9. Технология вольфрамсодержащих ферросплавов / В.П. Зайко, В.И. Жучков, П.А. Дробышевский и др. – Екатеринбург: УРОРАН, 2005. – С. 557.

Поступила в редакцию 31 августа 2012 г.