

УДК 622.245

**ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫЙ ТАМПОНАЖНЫЙ МАТЕРИАЛ
ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СКВАЖИН**
BLASTFURNACE SLAG-PORTLAND CEMENT PLUGGING MATERIAL
FOR HIGH TEMPERATURE WELLS STRENGTHENING

**В. П. Овчинников, Н. А. Аксенова, О. В. Рожкова, Т. А. Харитонова,
В. А. Федоровская**

V. P. Ovchinnikov, N. A. Aksyonova, O. V. Rozhkova, T. A. Kharitonova,
V. A. Fedorovskaya

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: скважина; доменный шлак; портландцемент; термостойкость;
тампонажный материал; кремнезем*

Key words: well; blastfurnace slag; Portland cement; thermal stability; plugging material; silica

Обеспечение качества разобшения продуктивных нефтегазосодержащих пластов с высокими термодинамическими характеристиками наряду со снижением стоимости строительства скважины, в особенности глубоких (более 3 000 м), явля-

ется сегодня (в период наложения санкций со стороны Европейского союза) актуальным и приоритетным направлением.

В работах [1, 2, 3] еще в прошлом веке было показано и доказано, что применение шлаков металлургического производства, взамен либо в сочетании с тампонажным портландцементом, способствует созданию термостойкого камня в законном пространстве, в интервалах с температурами более 80 °С. Однако их применение ограничивается составом шлака, меняющегося в зависимости от технологического режима плавки, седиментационной неустойчивостью тампонажного раствора на их основе, усадочными деформациями в процессе формирования цементного камня [4].

В указанных ранее работах исследовались и были рекомендованы к применению шлаки металлургических заводов, расположенных на территории Украины. В связи со сложившейся сегодня обстановкой необходим поиск альтернативного поставщика. Нами был рассмотрен вариант использования гранулированного доменного шлака Челябинского металлургического комбината (ООО «Мечел-Материалы»). Физико-химический состав (усредненный) его представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав доменного шлака, %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	S	Mo
35,0–45,0	35,0–45,0	≤8	≤15	0,2–1,0	0,5–1,0	1,0–1,5	≤4,0	≤2,0	≤1,0	0,95–1,10

Таблица 2

Параметры доменного шлака

Показатель	Единица измерения	Параметр
Размер зерна		
Содержание фракции < 0,080 мм	%	не менее 96,0
Содержание фракции < 0,020 мм		не менее 60,0
Удельная поверхность	м ² /кг	450
Влажность	%	не более 0,3
Содержание стекловидной фазы	%	65–70
Активность шлака молотого естественного твердения в нормальных условиях в возрасте 28 суток	МПа	не менее 10
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов	Бк/кг	не менее 370

Доменный шлак состоит из алюминатов и силикатов кальция и является металлургическим продуктом. Доменный шлак пожаро- и взрывоопасный материал, который не оказывает влияния на организм человека и относится к IV классу опасности. Он является отходом производства стали (чугуна) в виде расплава, который после подвергается охлаждению. Гранулированный шлак образуется при быстром охлаждении водой, паром или воздухом, в случае, когда охлаждение происходит медленно, образуется комовый шлак. Гидравлические свойства доменного шлака снижаются при медленном охлаждении, так как в процессе охлаждения происходит его частичная кристаллизация [5].

Кварц, оксиды алюминия, кальция и магния являются основными составляющими доменного шлака, на их долю приходится 85 % всего состава. Оставшиеся 15 % представлены примесями марганца, соединения железа, серы и «следовым» количеством других элементов. Фазовый состав шлаков представлен различным соотношением двух фаз: кристаллической (мелилиты, двухкальциевый силикат,

воластонит, монтчеллит, форстерит, шпинель) и стекловидной (кальциево-магнезио-алюмосиликатное стекло переменного состава).

Условные характеристики шлаков — модули основности (Mo) и активности (Ma):

$$Mo = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3},$$

$$Ma = \frac{\%Al_2O_3}{\%SiO_2}.$$

При модуле основности, большем либо равном единице, шлак является основным, а при показателе основности менее единицы — кислотным. Гидравлические свойства и прочность камня тем выше, чем выше модуль активности. Значения модулей активности и основности шлаков представлены в табл. 3.

Однако по значениям модулей основности и активности нельзя прогнозировать свойства формирующегося цементного камня, так как кроме химического состава важное значение имеет режим грануляции, условия производства и хранения шлака и т. д.

Процесс твердения шлаков связан с образованием тех же продуктов гидратации, что и у портландцемента, однако из-за низкой основности продуктов твердения, гидроксид кальция в свободном виде практически не образуется, присутствуют низкоосновные гидросиликаты кальция, гидрогранаты, а также гидрат геленита ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$). Для ускорения гидратации и твердения цементов на шлаковой основе применяют химическую активацию введением щелочей и сульфатов, обычно в виде оксида или гидроксида кальция и гипса. В качестве химически активной добавки к шлаку нами использовался портландцемент тампонажный как поставщик $Ca(OH)_2$ для гидратации алюмоферритной фазы. Данные об изменении сроков схватывания шлаковых растворов с различным содержанием портландцемента приведены в табл. 4.

Смесь шлака с водой при нормальной температуре схватывается довольно медленно. Введение портландцемента в количестве 10 % приводит к резкому сокращению сроков схватывания шлако-цементной смеси. Дальнейшее увеличение количества цемента в смеси способствует незначительному постепенному ускорению процессов схватывания.

Таблица 3

Значения модулей активности и основности различных шлаков

Модули	Феррохромовый шлак	Шлаки цветной металлургии (никель, медь)	Сталеплавильные шлаки	Шлаки алюмотермического производства металлургического хрома	Шлаки алюмотермического производства ферробора	Доменные шлаки
Модуль основности (Mo)	1,7–2,3	0,2–0,3	0,4–0,8	0,13–0,15	0,36–0,42	0,7–0,8
Модуль активности (Ma)	0,2–0,3	0,17–0,6	0,2–0,6	52–77	30–22	0,2–0,6

Таблица 4

Сроки схватывания шлакопортландцементных образцов при температуре 22 °С

Состав смеси, %		Содержание воды, %	Сроки схватывания, мин	
Шлак доменный	Цемент (ПЦТ 1-100)		начало	конец
100	0	29	3600	3840
90	10	29	410	480
80	20	29	410	460
70	30	30	400	460
50	50	30	360	430
30	70	46	325	410
10	90	40	300	395
0	100	40	300	395

Для оценки возможности использования шлаков производства ООО «Мечел-Материалы» нами были проведены исследования по изучению свойств смеси при различных соотношениях портландцемент : шлак при водоцементном отношении 0,55 и определение нижней границы температурного диапазона ее применимости без введения других катализаторов процесса твердения.

Для проведения исследований были приготовлены пробы тампонажного материала с компонентными составами, приведенными в таблице 5, там же представлены и реологические параметры изучаемых тампонажных растворов.

Таблица 5

Свойства шлакоцементных растворов различного состава при В/Ц = 0,55

Состав, % (шлак : ПЦТ-1-100)	Плотность, кг/м ³	Растекаемость, мм	Водоотделение, %
100:0	1850	200	1,6
20:80	1840	210	1,68
40:60	1840	225	2,77
50:50	1830	230	3,09
60:40	1825	230	3,98
80:20	1820	235	3,55
0:100	1810	250	4,04

Результаты экспериментов показали, что плотность раствора практически не меняется в зависимости от состава композиций, подвижность остается в допустимых пределах, седиментационная устойчивость раствора удовлетворительно стабильна.

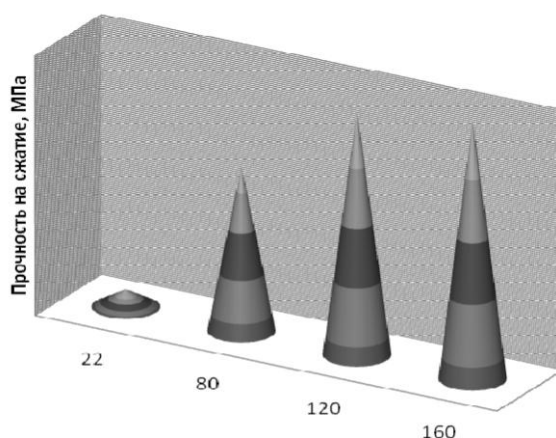
Результаты исследований прочностных показателей формирующегося шлакоцементного камня при различных температурах окружающей среды представлены на рисунке.

Установлено, что при температуре твердения 80–120 °С прочность на сжатие образцов в суточном возрасте состава (60 % тампонажного портландцемента и 40 % доменного шлака) составляет 10,1–15,2 МПа, на изгиб 3,8–5,1 МПа, что выше требований ГОСТ 1581-96 на тампонажный портландцемент даже для цементов типа I-G и I-N. По прочности камень, сформированный при температуре менее 60 °С, в особенности при температуре 22 °С, при любом сочетании ингредиентов не удовлетворяет требованиям ГОСТ 1581-96.

Прочность цементного камня со шлаком увеличивается с ростом температуры. При повышении температуры возрастает активность шлака и формируется достаточно прочный цементный камень, что дает возможность замещения части цемента шлаком. Необходимо помнить, что оптимальное содержание мелких фракций в шлаке увеличивается с уменьшением отношения цемент/шлак, так как

они являются микрозаполнителем, способствующим улучшению структуры твердеющего камня и снижению его пористости.

Таким образом, применение составов шлак/портландцемент в соотношении 60/40, 50/50 и 40/60 является перспективным для цементирования скважин с повышенными температурами, так как не уступают по своим показателям «чистому» портландцементу, а в отношении прочности даже превышают требования ГОСТа.



	22	80	120	160
■ 0/100	1,57	6,857	14,523	15,632
■ 40/60	0,886	10,187	15,211	16,012
■ 50/50	1,054	11,659	15,321	15,827
■ 60/40	0,784	10,87	14,925	15,99
■ 100/0	0,36	4,6	4,95	5,9

Рисунок. Диаграмма зависимости прочности цементного камня на сжатие, сформированного из смеси различного соотношения шлак : цемент при В/Ц – 0,55 от температуры твердения

Использование при приготовлении тампонажного раствора из шлако-портландцемента позволит сократить расход клинкерного цемента без уменьшения прочностных показателей, а замещение в растворе цемента доменным шлаком в процентном отношении от 40 до 60 % обеспечивает водонепроницаемость, низкую деформацию цементного камня, а также способствует сульфатостойкости, повышению долговечности в условиях действия агрессивных сред, в том числе при высоких температурах.

В табл. 6 приведен расчет снижения себестоимости цементного раствора при использовании доменного шлака.

Таблица 6

Снижение себестоимости тампонажного раствора при использовании доменного шлака

Составляющие раствора	Базовый состав, %	Новый состав, %	Ориентировочная стоимость одной тонны, руб
ПЦТ 1-100	100	60	3 900
Шлак	0	40	1 750
Стоимость, руб/т	3 900 руб/т	3 040 руб/т	Экономия 860 руб/т

Выводы

- Доменные гранулированные шлаки ООО «Мечел-Материалы» пригодны для производства материала, применяемого для цементирования скважин в интервалах повышенных температур.
- Необходимо проведение детальных исследований с изучением фазового состава продукта твердения, изучение возможности активации смеси: введением различных добавок (щелочных, пластифицирующих и т. д.), гидравлических, механических и тепловых методов воздействия.
- При положительных результатах экспериментальных исследований имеется целесообразность разработки проекта на производство готового продукта с рассмотрением предложения об использовании в других отраслях промышленности: в изготовлении бетонов и изделий из него; гидротехническом; сельскохозяйственном и дорожном строительстве; в строительстве промышленных, общественных и жилых зданий, сооружений; изготовлении искусственного конгломерата сухих строительных смесей.

Список литературы

1. Дворкин Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности: учебно-справочное пособие / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 368 с.
2. Булатов А. И. Тампонажные материалы: учеб. пособие для вузов / А. И. Булатов, В. С. Данюшевский. – М.: Недра, 1987. – 280 с.
3. Химия промысловых и тампонажных жидкостей: учебник по спец. «Бурение нефт. и газовых скважин» / Р. Г. Ахмадеев, В. С. Данюшевский. – М.: Недра 1981. – 152 с.
4. Овчинников В. П., Аксенова Н. А., Овчинников П. В. Физико-химические процессы твердения, работа в скважине и коррозия цементного камня: учебн. пособие для вузов. – Тюмень: Изд-во «Нефтегазовый университет», 2011. – 331 с.
5. Аксенова Н. А., Рожкова О. В., Федоровская В. А. К вопросу крепления высокотемпературных скважин // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыты, инновации): материалы 9-й научно-технической конференции. Т. 1. – ТюмГНГУ, 2014 – С. 44-49.
6. Овчинников В. П., Аксенова Н. А., Рожкова О. В., Федоровская В. А. Использование доменных шлаков для повышения качества крепления высокотемпературных скважин // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам III научно-практической конференции 30 сентября 2014.; в 5 ч. – Белгород: ИП Петрова М. Г., 2014. – Часть I. – С. 127-132.

Сведения об авторах

Овчинников Василий Петрович, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Аксенова Наталья Александровна, к. т. н., доцент кафедры «Нефтегазовое дело», филиал Тюменского государственного нефтегазового университета, г. Нижневартовск, тел. 89222666643, e-mail: na-acs@yandex.ru

Рожкова Оксана Владимировна, ассистент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Харитоновна Татьяна Александровна, к. т. н., доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Федоровская Виктория Аркадьевна, ассистент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Information about the authors

Ovchinnikov V. P., Doctor of Engineering, professor, chief scientific worker, Tyumen State University, phone: 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Aksyonova N. A., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Oil and Gas Business», Tyumen State Oil and Gas University Affiliate in Nizhnevartovsk, phone: 89222666643, e-mail: na-acs@yandex.ru

Rozhkova O. V., assistant of the chair «Drilling of oil and gas wells», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Kharitonova T. A., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Drilling of oil and gas wells», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Fedorovskaya V. A., assistant of the chair «Drilling of oil and gas wells», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru