Р. Чжан, Г. Лу (⊠), Ц. Ю

Национальный инжиниринговый исследовательский центр по комплексному использованию ресурсов Соляного озера (Salt Lake Resource), Университет науки и технологии Восточного Китая, г. Шанхай, Китай

УДК 666.762.3

ВЛИЯНИЕ И МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЯЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА ГРАНУЛ ИЗ ОКСИДА МАГНИЯ

Физические характеристики MgO-гранул, изготовленных с применением разного количества связующего из натриево-карбоксиметиловой целлюлозы (sodium carboxymethyl cellulose) или из поливинилового спирта, были изучены методом испытания на сжатие и на удар, определения пористости. Прочность гранул возрастает по мере снижения их пористости при добавлении большего количества связующего. Фазовый состав, микроструктуру и термостойкость MgO-гранул исследовали методом рентгеновской дифракции, с использованием растрового электронного микроскопа и методом термогравиметрического анализа. Механизм связывания MgO-гранул с использованием натриевокарбоксиметиловой целлюлозы изучали с помощью инфракрасной спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Ключевые слова: оксид магния, гранулирование, натриево-карбоксиметиловая целлюлоза, поливиниловый спирт, свойства, механизм.

Оксид магния высокой степени чистоты широко используется в сталеплавильной, цементной, стекловаренной и других отраслях промышленности благодаря его многочисленным положительным свойствам, таким как высокие термостойкость и коррозионная стойкость, повышенный показатель теплоизоляции. При изготовлении оксида магния порошок формуют в гранулы с последующим их спеканием при высокой температуре. Оксид магния производят из магнезита, бишофита и высокоминерализованного соляного раствора (рапы) [1].

Гранулирование — это технологический процесс, при котором сначала все сырьевые материалы смешивают, а затем смесь подают на брикетирующее устройство, дисковый гранулятор или в установку с кипящим слоем [2, 3], где происходит превращение сырья в гранулы. Технология гранулирования широко применяется в фармацевтической промышленности [4], производстве биоуглерода [5] и биотоплива [6], металлургии и др. Исследования процессов гранулирования в металлургии сосредоточены главным образом на саже доменных печей, руде магнитного железа и разных видах порошкообразных легирующих добавок [7, 8]. На прочность гранул при сжатии, при ударе, а также на их термостойкость влияют такие факторы, как давление, оказываемое при формовании, содержание влаги, тип связующе-

> ⊠ Г. Лу E-mail: gmlu@ecust.edu.cn

го, гранулометрический состав и метод сушки. Основным фактором из всех перечисленных является связующее. Квин и др. (Qin et al.) [9] изучили технологию холодного прессования смесей железной руды и угля и пришли к выводу, что при содержании связующего в количестве 4-6 % скорость формования гранул можно увеличить более чем на 85 %, а показатель прочности при ударе можно увеличить более чем в 3 раза при высоте падения 1 м. При формовании ферромарганцевого порошка в гранулы в качестве связующего используют промышленный шлак, смешанный с бентонитом, полиаллиламином (polvallvlamine) или смолами [10–12]. Синг (Singh) [13] сообщает о влиянии различных связующих на свойства ферромарганцевых гранул и делает вывод, что самой высокой прочностью обладают гранулы, сформованные с помощью фенольной смолы. В одном из исследований выявлено, что прочность периклаза значительно возрастает после гранулирования с 1-5 % лигносульфоната (CLS) и 1-5 % фенола [14]. Браулио (Braulio) [15] сделал вывод, что при использовании в качестве связующего оксида алюминия, способного к гидратации, увеличиваются механическая прочность, сопротивление ползучести, а также термостойкость шпинели, образующейся in situ в огнеупорных бетонах на фоне снижения пористости, и все это способствует предотвращению проникновения шлака. Му и др. (Mu et al.) [16] сообщают о добавке в качестве связующего сланцеватой глины при гранулировании летучей золы, предназначенной для спекания. Кокаль (Kockal) [17-19] исследовал физические свойства и прочность спеченных гранул, изготовленных из различного промышленного сопутствующего сырья. Влияние связующих на свойства спеченной летучей золы освещено также в работе [20].

Связующие делятся на органические, неорганические и композитные. При добавке органических связующих в ходе процесса гранулирования можно получить большую интенсивность охлаждения, в результате чего гранулы будут быстрее распадаться при высоких температурах по сравнению с гранулами, изготовленными на основе неорганических связующих.

В настоящее время имеется недостаточно научных данных о процессе гранулирования MgO, а также о влиянии связующих на свойства MgOгранул. Нами был исследован процесс гранулирования MgO и получены MgO-гранулы на основе связующих из натриево-карбоксилметиловой целлюлозы (CMC-Na) и поливинилового спирта (PVA). Гранулирование проводили на брикетирующей установке. Физические свойства изготовленных образцов MgO-гранул изучали методами рентгеновской дифракции (XRD), растровой электронной микроскопии (SEM), термогравиметрического анализа (TGA) и с помощью испытаний на прочность. Механизм действия связующих исследовали методами инфракрасной спектроскопии (IR) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS).

МАТЕРИАЛЫ

Оксид магния был куплен у китайской компании «Циангмей Файн Хемикалз» (Qiangmei Fine Chemicals). Связующие СМС-Na и PVA были закуплены у китайской фирмы «Синофарм Хемикал Реагентс» (Sinopharm Chemical Reagents). Все химические вещества использовали в том виде, в каком они были получены, без какойлибо очистки. Химический состав порошка оксида магния, мас. %: MgO 99,45, Cl 0,412, SO₃ 0,0625, SiO₂ 0,0325, CaO 0,0170. Гранулометрический состав порошка оксида магния, %: <1 мкм 19, <5 мкм 63, <10 мкм 13, <30 мкм 5.

Видно, что порошок оксида магния состоит из частиц разного размера. Это свойство благоприятно для придания механической прочности огнеупорам, поскольку более мелкие частицы встраиваются в промежутки между более крупными, благодаря чему возникает плотная упаковка частиц.

ГРАНУЛИРОВАНИЕ ПОРОШКА ИЗ ОКСИДА МАГНИЯ

Порошок оксида магния в количестве 894-898 г был тщательно перемешан с 2-6 г порошка СМС-Na и в количестве 880-895 г с 5-20 г PVA. Затем к полученным смесям добавили по 100 г воды. Содержание СМС-Na составило 0,2-0,6 %, содержание PVA — 0,5-2,0 %. После тщательного перемешивания материалов смеси подавали в брикетирующее устройство для изготовления гранул. Получились гранулы размером Ø 30 ×15 мм. Гранулы были помещены в печь и высушены при 60 °C, продолжительность сушки 24 ч.

ХАРАКТЕРИСТИКА

Свойства порошка оксида магния и гранул из него изучали на разных приборах. Растровый электронный микроскоп (SEM, JSM-6360L) использовали для изучения морфологии гранул из MgO. Образцы гранул были размещены на углеродной ленте и покрыты до проведения замеров золотом. Графики рентгеновской дифракции получали при комнатной температуре с помощью дифрактометра, оснащенного аналитической программой PAN analytical X'Pert Pro (дифрактометр марки XRD, D/MAX 2550 VB/PC). Дифрактометр был оснащен также устройством с Си K_aизлучением (0.154 нм) в диапазоне $2\theta = 10 \div 80^{\circ}$. Термостойкость MgO-гранул оценивали методом термогравиметрического анализа (прибор марки О600 SDT). Для проведения испытания на термогравиметрию 10 мг MgO-гранул поместили в емкость и нагрели до 1000 °C со скоростью 10 °C/мин. Подача воздуха осуществлялась на уровне 10 мл/мин. Инфракрасный спектр образцов был получен с помощью инфракрасного спектрометра марки «Termo-Nicolet Nexus 6700». Инфракрасный спектр фиксировался в диапазоне 400-4000 см-1 с помошью спектрофотометра «Perkin Elmer». Рентгеновский фотоэлектронный спектрометр (XPS, ESCALAB 250Xi) использовали для элементного анализа образцов. Для фиксации спектров в качестве источника рентгеновских лучей было применено излучение Al K_{α} (h ν = 1486,6 эВ).

Прочность на сжатие сырых и высушенных гранул определяли на приборе марки HY-0230 при интенсивности нагрузки 10 мм/мин. Испытания на прочность при падении проводили так, как это описано Николасом и др. (Nicholas et al.) [21]. Сырые и высушенные гранулы по несколько раз роняли с высоты 0,5 м на стальную пластину толщиной 10 мм и определяли количество разрушившихся гранул. Результаты испытаний на прочность при сжатии и на удар при падении 10 гранул были усреднены.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, *а* представлена смесь порошка MgO с различными связующими. Одна порция порошка MgOбыла смешана с натриево-карбоксиметиловой целлюлозой и затем просеяна, другая порция смешана с поливиниловым спиртом и просеяна. На рис. 1, б представлены гранулы оксида магния размером Ø 30×15 мм. Рыхлая природа образца оксида магния видна на рис. 1, *в*. На изображении микроструктуры образца порошкообразной натриево-карбоксиметиловой целлюлозы видно, что кристаллы волокнистые, а размер зерен в дли-

46



Рис. 1. Смесь порошка MgO со связующим (*a*); MgO-гранулы размером Ø 30×15 мм (б); полученные с помощью растрового электронного микроскопа изображения микроструктур MgO-порошка (*в*); порошка СМС-Na (*г*); MgO-гранул, изготовленных на связующем СМС-Na (*д*, *e*); MgO-гранул, изготовленных с помощью связки PVA (*ж*, *з*)

ну 200 мкм (см. рис. 1, *г*). Микроструктуры MgOгранул, полученных на основе связующего СМС-Na, представлены на рис. 1, *д*, *е*. Частицы MgO плотно удерживаются с помощью связующего СМС-Na, причем форма кристаллов MgO сохраняется. Микроструктуры MgO-гранул, полученных на основе поливинилового спирта, показаны на рис. 1, *ж*, *з*. Видно, что частицы MgO плотно удерживаются с помощью связующего PVA. Частицы связующих действуют в качестве «мостиков», соединяющих частицы MgO, благодаря чему структура MgO-гранул достаточно прочная.

Кристаллическая структура MgO-материала осталась после гранулирования неизменной. Это видно по графикам рентгеновской дифракции образцов порошка и гранул MgO (рис. 2, *a*). Все 20 пиков совпадают со стандартными графиками. Кривые потерь массы, полученные в ходе термогравиметрического анализа, показали, что образец порошка MgO характеризуется только одной стадией потери массы (рис. 2, *б*). Почти непрерывная потеря массы при температурах до 350 °C, видная на термогравиметрической кривой образца порошка MgO, означает удаление из материала таких посторонних веществ, как хлор, сера и др. Потери массы образца из гранулированного MgO при температурах примерно до 350 °C означают удаление посторонних молекул из пор. Кроме того, это может означать испарение воды и разложение связующих (СМС-Na или PVA) до углерода. После достижения 350 °C потери массы незначительны, что свидетельствует о высокой термостойкости гранул.

Результаты испытаний на прочность MgOгранул, изготовленных на основе разного количества связующего СМС-Na, представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 3. Предел прочности при сжатии сырых гранул 19,7 H, прочность при падении 1,0 раза / 0,5 м, в то время как предел прочности при сжатии сухих гранул 62,09 H, прочность при падении 3,0 раза / 0,5 м. Прочность и сырых, и сухих MgO-гранул очень низка. По сравнению с прочностью гранул, изготовленных без связующего, прочность гранул на связующем из СМС-Na значительно выше.



Рис. 2. Графики рентгеновской дифракции (а) и результаты термогравиметрического анализа (б)



Рис. 3. Предел прочности при сжатии сырых (а) и сухих (б) МдО-гранул со связующим СМС-Na

Таблица 1. Прочность сырых MgO-гранул с разным содержанием СМС-Na

Содержание СМС-Na, %	Предел прочности при сжатии, Н	Прочность при падении, количество раз / 0,5 м
0	19,7	1,0
0,2	49,12	2,4
0,3	85,67	5,2
0,4	117,16	8,8
0,5	151,37	10,5
0,6	159,13	11,2

Натриево-карбоксиметиловая целлюлоза обладает хорошей растворимостью в воде. Она способна образовывать вязкий раствор между контактными точками сырых гранул и покрывать поверхность частиц. СМС-Na может также уменьшать диаметр капилляров сырых гранул и увеличивать капиллярные силы с хорошими дисперсионными характеристиками. В результате сырые гранулы приобретают высокую прочность. После сушки СМС-Na образует сплошные прочные соединяющие «мостики» между частицами, поэтому прочность сухих гранул выше, чем сырых. Прочность сырых и сухих гранул при сжатии и при падении возрастает по мере того, как содержание СМС-Na увеличивается с 0,2 до 0,6 %. Это происходит в результате увеличения вязкости раствора и упрочнения мостиков между частицами. Предел прочности при

Таблица 3. Прочность сырых MgO-гранул с различным содержанием PVA

Содержание PVA, %	Предел прочности при сжатии, Н	Прочность при падении, количество раз / 0,5 м
0	19,70	1,0
0,5	37,52	2,1
0,75	62,31	4,2
1,0	100,50	5,2
1,25	116,67	7,4
1,5	121,38	8,5
2,0	125,32	9,4

Таблица 2. Прочность сухих MgO-гранул с разным содержанием СМС-Na

Содержание СМС-Na, %	Предел прочности при сжатии, Н	Прочность при падении, количество раз / 0,5 м
0	62,09	3,0
0,2	108,6	7,6
0,3	167,8	10,0
0,4	199,77	12,5
0,5	248,52	16,3
0,6	267,89	17,0

сжатии сырых гранул 169,13 Н, при падении 12,2 раза / 0,5 м. Предел прочности при сжатии сухих гранул 307,89 Н при падении 17,3 раза / 0,5 м.

Результаты определения предела прочности при сжатии MgO-гранул, изготовленных на основе различного количества связующего PVA, представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 4. Как и связующее CMC-Na, PVA увеличивает прочность гранул. Вероятно, PVA оказывает такое же связующее влияние на частицы, как CMC-Na. Прочность при сжатии и при падении и сырых, и сухих гранул возрастает по мере того, как количество связующего PVA увеличивается с 0,5 до 2,0 %. Это, вероятно, также объясняется увеличением вязкости раствора и упрочнением «мостиков» между частицами. Сривастава (Srivastava) [22] сделал вывод, что пористость является ключевым фактором, влияющим на прочность гранул.

Габлица 4. Прочность сухих MgO-гранул с различ-
ным содержанием PVA

Содержание PVA, %	Предел прочности при сжатии, Н	Прочность при падении, количество раз / 0,5 м
0	62,09	3,0
0,5	87,52	6,5
0,75	132,13	9,2
1,0	160,50	9,9
1,25	176,76	11,4
1,5	183,58	12,3
2,0	195,17	14,7

48



Рис. 4. Предел прочности при сжатии сырых (a) и сухих (б) MgO-гранул со связующим PVA

Для того чтобы исследовать зависимость прочности MgO-гранул от пористости, нами протестирована пористость гранул с разным содержанием связующего (рис. 5, *a*, *б*). Самый высокий показатель пористости равен 32,29 %. Пористость снижается по мере увеличения содержания связующего, что противоположно тенденции, наблюдаемой для прочности гранул. При содержании СМС-Na 0,6 % пористость равна 8,5 %; при добавке 2 % PVA пористость снижается до 8,9 %. При использовании СМС-Na или PVA улучшается молекулярная связь между частицами, а поры внутри материала заполняются связующим. Та-



Рис. 5. Пористость MgO-гранул с различным содержанием связующих: *а* — CMC-Na; *б* — PVA

ким образом, частицы оказываются плотно упакованными. В результате пористость снижается. Можно сделать вывод, что изменение пористости влияет на прочность гранул. По мере снижения пористости между частицами увеличиваются капиллярные силы, и прочность при сжатии возрастает. Увеличение соприкосновения частиц друг с другом улучшает пластичность MgOгранул, что, в свою очередь, увеличивает прочность гранул при падении.

Для лучшего понимания механизма действия связующего СМС-Na в MgO-гранулах был проанализирован инфракрасный спектр индивидуальных и комбинированных образцов. Инфракрасные спектры порошка МдО, связующего СМС-Na и MgO-гранул, изготовленных на основе СМС-Na, представлены на рис. 6. По инфракрасному спектру на рис. 6, а видно, что основные пики поглощения СМС-Na наблюдаются при 3448,2, 1622,4 и 1422,5 см⁻¹, что соответствует, согласно литературным данным, вибрации симметричного растяжения гидроксила (-ОН), вибрации антисимметричного растяжения карбоксила (-СООН) и симметричному растяжению карбоксила. Гранулы MgO демонстрируют сильные пики поглощения при 3421,9, 1637,2 и 1423,7 см⁻¹ при использовании в каче-



Рис. 6. Инфракрасные спектры СМС-Na (*a*), MgO (б), MgO-гранул с СМС-Na (в)

стве связующего CMC-Na, в то время как сам оксид магния не имеет никаких пиков при этих длинах волн. Такое сравнение означает, что химически активные группы связующего CMC-Na поглощаются на поверхности оксида магния, в результате чего в MgO-гранулах обнаруживаются и карбоксильные, и гидроксильные группы. Таким образом, хемосорбцию между CMC-Na и



Рис. 7. Инфракрасные спектры PVA (*a*), MgO (*б*), MgO-гранул с PVA (*в*)



Рис. 8. Спектр, полученный при рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии Mg (*a*), О (б) в порошкообразном MgO и MgO-гранулах, изготовленных с помощью связующего СМС-Na

MgO можно обнаружить путем анализа их инфракрасных спектров.

Для исследования взаимодействия PVA с MgO также анализировали инфракрасные спектры образцов. Инфракрасные спектры MgOматериала, связующего PVA и MgO-гранул со связующим PVA представлены на рис. 7. Как видно на спектре рис. 7, а, основной пик инфракрасного поглощения РVA соответствует 3436 см-1, что можно объяснить вибрацией симметричного растяжения гидроксила (-OH). Гранулы МаО демонстрируют большой пик поглощения на 3423,0 см⁻¹ при использовании в качестве связующего PVA, в то время как у самого оксида магния пика при этой длине волны нет. Это сравнение между инфракрасными пиками гранул только из MqO и гранул MqO со связуюшим PVA показывает, что химически активные группы PVA поглощаются на поверхности оксида магния подобно связующему СМС-Na. Таким образом, MqO-гранулы со связующим PVA также содержат карбоксильные и гидроксильные группы после хемосорбции.

Для дальнейшего исследования механизма действия связующего СМС-Na проанализировали спектры, полученные методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) Мд и О в сухом материале MgO и MgO-гранулах, изготовленных на основе СМС-Na. Результаты после дифференциации и имитирования пиков, а также коррекции заряда представлены на рис. 8. На рис. 8, а показано, что энергия связи Мд без СМС-Na составляет 1304,2 эВ, в то время как энергия связи Mg со связующим СМС-Na возрастает до 1304,65 эВ. Энергия связи у О без связующего СМС-Na 530,35 эВ, в то время как энергия связи О со связующим CMC-Na увеличивается до 531,15 эВ (см. рис. 8, б). Таким образом, наблюдаются химические сдвиги 0,45 и 0,8 эВ в энергии связи Мд и О соответственно. Химические сдвиги у Мо и у О больше 0,2 эВ и находятся выше допустимой предельной погрешности. Энергии связи Мд и О увеличиваются после гранулирования со связующим CMC-Na.

Химический сдвиг в энергии связи объясняется изменением пика атомного спектра в результате изменения окружения атома. Это главным образом происходит из-за изменения потенциальной энергии, получаемой при переносе валентных электронов, и из-за различной электроотрицательности элементов. Электроотрицательность С выше, чем у Mg. Таким образом, С способен снижать плотность электронов вокруг Mg с помощью О, а также соответствующим образом снижать эффект экранирования и увеличивать энергию связи Mg и О. Можно утверждать, что MgO и CMC-Na не являются просто физической смесью. Между ними существует химическая связь, которая меняет энер-

50

гии связи Mg и О. СМС-Na — это углеродная цепная молекула, которая содержит большое количество карбоксильных (-СООН) и гидроксильных (-ОН) групп. Как показали предыдушие результаты, между MgO и CMC-Na происходит хемосорбция, которая увеличивает энергии связи Ма и О. Можно сделать вывод, что полярные карбоксильные (-СООН) и гидроксильные (-ОН) функциональные группы в СМС-Na производят на MgO-гранулы действие хемосорбции. Кроме того, гидрофильная природа гидроксильной группы может улучшить гидрофильную природу MgO. Частицы MgO соединены с полимерной органической цепочкой СМС-Na таким образом, что прочность MgOгранул может быть улучшена с помощью связующего СМС-Na.

Нами проанализированы также спектры Мо и О, полученные при рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) сухого материала MqO и MqO-гранул, изготовленных с помощью связующего PVA. Результаты, полученные после дифференциации и имитации пиков и коррекции заряда, представлены на рис. 9. Энергия, связывающая Мо с помощью связующего PVA, возрастает до 1304,58 эВ, а энергия, связывающая О с помощью PVA, возрастает до 531,25 эВ (рис. 9, б). Энергии связи Мд и О демонстрируют химический сдвиг в размере 0,38 и 0,9 эВ соответственно. Химические сдвиги Ма и О выше погрешности 0,2 эВ, что подтверждает увеличение энергий связи Ма и О после гранулирования с помошью PVA. Связующее PVA оказывает такое же воздействие на частицы MgO, как и CMC-Na, в результате чего MgO-гранулы становятся прочнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Частицы MgO плотно прилегают друг к другу благодаря связующим СМС-Na или PVA, причем форма кристаллов MgO, как показывают исследования на растровом электронном микроскопе, остается в MgO-гранулах неизменной. Графиками, полученными с помощью рентгеновского дифрактометра, также подтверждается, что структура кристаллов в MgO-материале в процессе гранулирования не меняется. Результаты термогравиметрического анализа показали, что MgO сохраняет термостойкость после гранулирования.

Свойства MgO-гранул можно улучшить путем добавки связующего СМС-Nа или PVA. Было обнаружено, что прочность гранул возрастает, а пористость снижается по мере увеличения содержания связующих. Следовательно, изменение прочности зависит от пористости гранул.

На основе результатов инфракрасного исследования (IR) и исследования с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) была подтверждена хемосорбция карбок-



Рис. 9. Спектр, полученный при рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии Mg (*a*), О (б) в порошкообразном MgO и MgO-гранулах, изготовленных с помощью связующего PVA

сильных (-СООН) и гидроксильных (-ОН) групп СМС-Na и гидроксильной (-OH) группы PVA на поверхности MgO. Частицы MgO соединяются с помощью полимерных органических цепочек в связующих. Благодаря этому возрастает прочность MgO-гранул.

Библиографический список

1. **Huang, Qiong-zhu**. Thermal decomposition mechanisms of $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ and $MgCl_2 \cdot H_2O / Qiong-zhu$ Huang, Gui-min Lu, Jian-guo Yu [et al.] // J. Anal. Appl. Pyrol. — 2011. — Vol. 91, \mathbb{N} 1. — P. 159–164.

2. *El-Hussiny, N. A.* A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process / *N. A. El-Hussiny, M. E. H. Shalabi* // Powder. Technolog. — 2011. — Vol. 205, № 1. — P. 217–223.

3. **Beker**, **Ü**. **G**. Briquetting of Afşin-Elbistan lignite of Turkey using different waste materials / Ü. G. Beker // Fuel. Process. Technol. — 1997. — Vol. 51, № 1. — P. 137–144.

4. *Yang, M.* Effects of polyvinylpyrrolidone both as a binder and pore-former on the release of sparingly

water-soluble topiramate from ethylcellulose coated pellets / *M. Yang, S. Xie, Q. Li* [et al.] // Int. J. Pharmaceut. — 2014. — Vol. 465, № 1. — P. 187–196.

5. Syarif, N. Performance of Biocarbon Based Electrodes for Electrochemical Capacitor / N. Syarif // Energy. Procedia. $-2014. - N_{\rm e} 52. - P. 18-25.$

6. Toh, P. Y. Magnetophoretic separation of microalgae: the role of nanoparticles and polymer binder in harvesting biofuel / P. Y. Toh, B. W. Ng, C. H. Chong [et al.] // RSC Advances. -2014. - Vol. 4, N8. - P. 4114-4121.

7. *Sivrikaya, O.* Pelletization of magnetite ore with colemanite added organic binders / *O. Sivrikaya, A. I. Arol* // Powder. Technolog. — 2011. — Vol. 210, № 1. — P. 23–28.

8. **Ren, J.** A more efficient way to shape metal-organic framework (MOF) powder materials for hydrogen storage applications / *J. Ren, N. M. Musyoka, H. W. Langmi* [et al.] // Int. J. Hydrogen. Energ. — 2015. — Vol. 40, № 13. — P. 4617–4622.

9. **Qin, J.** Study on Cold-Pressing Technology for Mixture of Iron Ore and Coal / J. Qin, G. G. Liu, F. H. Long // Applied Mechanics and Materials. -2012. - \mathbb{N} 117. - P. 882–886.

10. **Ramamurthy, K.** Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate / K. Ramamurthy, K. I. Harikrishnan // Cement and Concrete Composites. — 2006. — Vol. 28, Ne 1. — P. 33–38.

11. *Klinthong, W.* Polyallylamine and NaOH as a novel binder to pelletize amine-functionalized mesoporous silicas for CO₂ capture / *W. Klinthong, C. H. Huang, C. S. Tan //* Micropor. Mesopor. Mat. — 2014. — № 197. — P. 278–287.

12. *Kawatra, S. K.* Laboratory studies for improving green Ball strength in bentonite-bonded magnetite concentrate pellets / *S. K. Kawatra, S. J. Ripke* // Int. J. Miner. Process. — 2003. — Vol. 72, № 1–4. — P. 429–441.

13. Singh, V. Development of Agglomeration Process to Utilize the Ferromanganese Fines in Steel Making Process / V. Singh, V. Tathavadker // ISIJ. Int. -2011-Vol. 51, \mathbb{N} 1. -P. 59–62.

14. **Osipov, V. A.** Composition and Fabrication of Magnesia Briquettes from Refractory Scrap for

Repairing the Lining of Oxygen Converters / V.A. Osipov, V. N. Kungurtsev, E. V. Stepanova [et al.] // Refract. Ind. Ceram+. — 2005. — Vol. 46, № 2. — P. 87, 88.

15. **Braulio**, **M.** A. L. Selection of binders for in situ spinel refractory castables / M. A. L. Braulio, L. R. M. Bittencourt, V. C. Pandolfelli // J. Eur. Ceram. Soc. — 2009. — Vol. 29, № 13. — P. 2727–2735.

16. **Mu, S.** Effect of shale addition on properties of sintered coal fly ash / S. Mu, B. Ma, G. De Schutter [et al.] // Constr. Build. Mater. — 2011. — Vol. 25, \mathbb{N} 2. — P. 617–622.

17. Kockal, N. U. Optimization of properties of fly ash aggregates for high-strength lightweight concrete production / N. U. Kockal, T. Ozturan // Materials and Design. -2011. - Vol. 32, Ne 6. -P. 3586-3593.

18. **González-Corrochano, B.** Effect of thermal treatment on the retention of chemical elements in the structure of lightweight aggregates manufactured from contaminated mine soil and fly ash / B. González-Corrochano, J. Alonso-Azcarate, M. Rodas // Constr. Build. Mater. -2012. -N 35. -P. 497–507.

19. **Quina, M. J.** Recycling of air pollution control residues from municipal solid waste incineration into lightweight aggregates / M. J. Quina, J. M. Bordado, R. M. Quinta-Ferreira // Waste. Manage. -2014. -Vol. 34, $N \ge 2$. -P. 430–438.

20. *Manikandan, R.* Swelling characteristic of bentonite on pelletization and properties of fly ash aggregates / *R. Manikandan, K. Ramamurthy* // J. Mater.Civil. Eng. — 2009. — Vol. 21, № 10. — P. 578–586.

21. *Kawatra, S. K.* Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization / *S. K. Kawatra, S. J. Ripke* // Int. J. Miner. Process. — 2002. — Vol. 65, № 3. — P. 141–149.

22. **Srivastava**, **U.** Study of organic and inorganic binders on strength of iron oxide pellets / *U. Srivastava*, *S. K. Kawatra*, *T. C. Eisele* // Metall. Mater. Trans. B. — 2013. — Vol. 44, № 4. — P. 1000–1009.

Получено 07.09.15 © Р. Чжан, Г. Лу, Ц. Ю, 2016 г. © Пер. **С. Н. Клявлина** (комбинат «Магнезит»), 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



07a09June2016 São Paulo Expo | São Paulo - SP - Brasil

Ehbibition: 11 a.m às 8 p.m | Congress: 9 a.m to 6 p.m

EXPO ALUMINÍO 2016 — международная выставка по алюминию

г. Сан-Паулу, Бразилия

www.expoaluminio.com.br