

4. Франчук В.П., Кириченко Е.А., Зиборов А.П. Исследования напряженно-деформированного состояния транспортного трубопровода гидроподъема // Геотехническая механика. Межвед. сборник научных трудов. ИГТМ НАН Украины, 1999. — Вып. 13. — С. 57–65.

5. *The Proceedings of The Fourth (2001) ISOPE OCEAN MINING SYMPOSIUM*, Szczecin, Poland, 2001. — 189 с.

Подано склад устаткування для підводного видобування, транспортування і збагачення поліметалічних конкрецій. Наведені результати попередніх випробувань деяких видів устаткування. Окреслені проблеми та задачі, що потребують вирішення при створенні гірничо-металургійного комплексу.

Composition of equipment for submarine booty, transportation and concentration of polymetallic nodules is submitted. The results of preliminary tests of some types of equipment are given. Problems and tasks demanding solution when creating a marine mining-and-metallurgical complex are projected.

УДК 621.785:552.124

Ю.А. Нефедов<sup>1</sup>, Л.И. Анелок<sup>1</sup>, С.Н. Килессо<sup>1</sup>, Е.В. Крюков<sup>1</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ОКЕАНИЧЕСКИХ КОНКРЕЦИЙ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПЕРЕДЕЛУ

*Исследованы и экспериментально опробованы процессы подготовки железомарганцевых конкреций (ЖМК) к плавке агломерацией, брикетированием, окомкованием и восстановительным обжигом.*

*Установлена низкая спекаемость аглошихт из ЖМК при агломерации их по известным технологическим схемам. Для окускования мелких фракций ЖМК (5–0 мм) целесообразно применять брикетирование при давлении 0,25–0,5 т/см<sup>2</sup>, а для пылеватых фракций (<250 мкм) — окомкование увлажненных шихт (28–32% H<sub>2</sub>O) с последующим обжигом брикетов и окатышей при 850–900 °С. Показана принципиальная возможность получения металлизированного огарка в процессе восстановительного обжига конкреций при 850–900 °С.*

В настоящей статье приведены результаты экспериментального опробования подготовки железомарганцевых конкреций (ЖМК) к плавке агломерацией, брикетированием, окомкованием и восстановительным обжигом.

Исследования проводили на усредненной пробе ЖМК, содержащей (в %): 25,6 Mn, 4,50 Fe; 1,30 Cu; 1,54 Ni; 0,21 Co; 0,17Pb; 0,12 Zn; 7,39 CaO; 2,43 MgO; 10,65 SiO<sub>2</sub>; 4,66 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,50 TiO<sub>2</sub>; 2,57 Na<sub>2</sub>O; 1,14 K<sub>2</sub>O; 0,24 C; 0,14 P; 0,003 S; 4,6 H<sub>2</sub>O; 20,1 П.П.П.

© Ю.А. Нефедов<sup>1</sup>, Л.И. Анелок<sup>1</sup>, С.Н. Килессо<sup>1</sup>, Е.В. Крюков<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

Опыты по агломерации ЖМК осуществляли на лабораторной установке с диаметром чаши 45 мм и высотой 250 мм в условиях, близких к режиму агломерации марганцевых концентратов. Шихта для получения нефлюсованного агломерата содержала 70% ЖМК (10–0 мм), 20% возврата (20–10 мм) и 10% коксика (3–0 мм). Для улучшения газопроницаемости шихты мелкие фракции исходных ЖМК (3–0 мм) перед загрузкой в аглочашу предварительно увлажняли и окомковывали. Высота слоя шихты составляла 220 мм, разрежение перед эксгаустером  $\approx 10$  кПа.

Экспериментальное опробование агломерации увлажненных шихт указанного состава и с 50- и 100% -ным избытком коксика не дало положительных результатов. После прохождения зоны горения по всей высоте слоя шихты обожженный материал во всех случаях практически не содержал спекшихся конгломератов, что свидетельствует о том, что тепла, получаемого от горения коксика даже при значительном его избытке, недостаточно для спекания аглошихт из ЖМК.

Нестандартное поведение океанических конкреций при агломерации объясняется, по нашему мнению, особенностями формирования и условий залегания ЖМК, накладывающими определенный отпечаток на их физико-химические и теплофизические свойства. Большое содержание адсорбированной и конституционной влаги, а также значительное количество глин в пустой породе конкреций, удерживающих воду до высоких температур, обуславливают высокую, по сравнению с марганцевыми концентратами, теплоемкость ЖМК в интервале 100–800 °С, что является, по нашему мнению, причиной плохой спекаемости аглошихт из конкреций при агломерации их по известным технологическим схемам.

Брикетирование измельченных (5–0 мм) конкреций проводили на лабораторном брикетировочном прессе МС1000 при давлении 0,25; 0,5; 1, 2, 3 и 4 т/см<sup>2</sup>, а окатывание пылеватых фракций ЖМК (<250 мкм) — на тарельчатом окомкователе с диаметром чаши 40 см, скоростью вращения 15 об/мин и углом наклона 40°. Увлажненный перед окомкованием материал содержал 24, 28 и 30% влаги.

Окускованные ЖМК подвергали упрочняющей сушке при 160 °С и обжигу при 400 и 900 °С в атмосферных условиях. Продолжительность выдержки брикетов и окатышей при указанных температурах определяли из расчета достижения равновесия реакций дегидратации основных составляющих конкреций и диссоциации продуктов обезвоживания, что составило соответственно 150, 40 и 15 мин. [2, 3]. Значения механической прочности воздушносухих, упрочненных и обожженных брикетов и окатышей приведены в таблице.

Как следует из приведенных данных, в процессе брикетирования ЖМК уже при давлении 0,25–0,5 т/см<sup>2</sup> брикеты обладают прочностью, соответствующей требованиям, предъявляемым к сырью для металлургического передела. Дальнейшее увеличение давления при прессовании нецелесообразно из-за чрезмерного уплотнения материала, что может отрицательно сказаться на показателях восстановительной плавки конкреций.

Механическая прочность воздушносухих окатышей из ЖМК несколько ниже прочности окатышей из флотационных марганцевых концентратов [1] и достигает максимального значения при содержании влаги в шихте не менее 28–30%. Только в этом случае, при прочих равных условиях, обеспечивается необходимое число и прочность контактов между частицами конкреций, обуславливающих, в конечном счете, прочность окатыша в целом. Для получения качественных окатышей ( $d = 6 - 12$  мм) необходимо большое содержание влаги в шихте, что объясняется значительной гигроскопичностью ЖМК.

Таблица. Механическая прочность окускованных ЖМК

Режим окускования	Прочность на сжатие брикетов, кг/брикет и окатышей, кг/окатыш*			
	сухих		обожженных	
	воздушносухих, 20 °С	160 °С	400 °С	900 °С
Брикетиrowание, $S$ брикетов = $1\text{см}^2$ , $P$ , т/см <sup>2</sup> :				
0,25	36,0	68,0	20,0	90,0
0,5	45,0	80,0	25	110,0
1	80,0	175,0	40,0	230,0
2	200,0	260,0	100,0	560,0
3	300,0	н.о.	н.о.	н.о.
4	380,0	н.о.	н.о.	н.о.
Окатывание, $d$ окатышей = 10 – 12 мм, влажность шихты, %:				
24	3,5	4,0	2,5	62,5;
28	5,0	6,0	3,0	125,0
30	6,0	7,5	6,8	435,0

\* Прочность окускованных ЖМК на сжатие определяли на установке ИМ-4Р.

В измельченных и увлажненных конкрециях, особенно в зонах переувлажнения, содержится значительное количество комкующих фракций (< 40 мкм), что способствует получению достаточно плотных окатышей, а наличие в составе ЖМК монтмориллонита  $Al_{1,67}Mg_{0,33}[(OH)_2Si_4O_{10}] \cdot Na_{0,33}(H_2O)_4$ , являющегося основной составляющей бентонита, — упрочнению их в процессе “окатывание — сушка”. Именно наличием в конкрециях природного бентонита объясняется упрочнение брикетированных и окомкованных ЖМК после сушки при 160 °С [7], причем на брикетах, характеризующихся более плотным контактом частиц ЖМК, упрочняющий эффект сказывается сильнее. Результатом обжига окускованных конкреций при 400 °С является значительное разупрочнение брикетов и окатышей, а после термической обработки при 900 °С прочность на сжатие обожженной продукции резко возрастает (см. табл.).



В процессе укрепляющей сушки воздушносухих брикетов и окатышей из ЖМК при 160 °С активно удаляется адсорбированная влага с потерей массы до 10,5–12,0%. При этом бентонитовые мостики, склеивающие частицы ЖМК, затвердевают [7], в результате чего при практически нулевой усадке (0,7%) происходит упрочнение окускованной продукции, особенно брикетов.

Воздушносухие окатыши обладают высокой пластичностью, в значительной степени сохраняющейся и после сушки при 160 °С. Это свидетельствует об исключительно мелкодисперсной структуре океанических конкреций и значительной толщине сольватной оболочки вокруг зерен ЖМК, которые во внутренних слоях окатышей полностью не разрушаются даже после укрепляющей сушки. Пластичность брикетированных ЖМК проявляется значительно слабее.

При повышении температуры термической обработки брикетированных и окомкованных ЖМК до 400 °С наблюдается активное удаление кристаллизационной влаги из абсолютного большинства минеральных фаз конкреций, в том числе бентонита [7], сопровождающееся разрушением связей в тонкой структуре соединений, потерей массы до 21–23% и незначительной усадкой брикетов и окатышей (2,0–2,2%). Результатом этого является разупрочнение окускованных ЖМК.

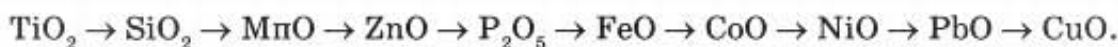
В интервале 400–900 °С, наряду с дегидратацией глин, развиваются реакции термической диссоциации марганцевых, железосодержащих и других составляющих ЖМК с повышением потери массы до 24% и образованием твердых растворов на основе  $Mn_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ . При температурах, близких к 900 °С, на границах раздела фаз протекают твердофазовые реакции образования тефроита ( $Mn_2SiO_4$ ) и фаялита ( $Fe_2SiO_4$ ) [1], а в микрообъемах брикетов и окатышей происходит размягчение конкреций с выделением небольшого количества щелочесодержащего силикатного расплава [6], что приводит к уменьшению пористости, увеличению усадки до 22% и значительному повышению прочности окускованных ЖМК.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований процессов окускования океанических конкреций свидетельствуют о низкой спекаемости аглошихт из ЖМК при агломерации их по известным технологическим схемам. Возможность повышения степени спекаемости аглошихт из конкреций может быть установлена после доработки технологического режима и аппаратурного оформления процесса, а также в результате разработки комбинированных схем.

Для окускования мелких фракций железомарганцевых конкреций (5–0 мм) можно рекомендовать брикетирование при давлении 0,25–0,5 т/см<sup>2</sup>, а для пылевидных фракций (< 250 мкм) целесообразно окомкование с последующим обжигом брикетов и окатышей при температуре 850–900 °С.

Наряду с окускованием, перспективным методом подготовки ЖМК к плавке является, на наш взгляд, предварительный восстановительный обжиг при температуре 800–900 °С. В этом случае одним технологическим приемом достигаются необходимая степень дегидратации ЖМК, сопровождающаяся переходом ведущих элементов в оксидную форму и предварительное восстановление цветных металлов.

Анализ температурной зависимости  $\text{Po}^{(C/CO)}$   $\text{Po}^{(MeO/Me)}$  по методике, приведенной в работе [5], показал, что сродство углерода к кислороду с ростом температуры растет, а термодинамическая прочность соединений уменьшается по следующей схеме:



Уменьшение химического сродства элементов к кислороду в соответствии с приведенной схемой предопределяет последовательность восстановления оксидов, входящих в состав конкреций. Поведение оксидов элементов в процессе восстановительного обжига определяется также температурами начала их восстановления.

Аналитическое определение  $T_{\text{нв}}$  элементов из оксидов выполнено при  $\Delta G_T^0 = 0$  и  $P_{\text{CO}} = 1$  атм. Равенство величин  $\Delta G_{\text{MeO/Me}}^0$  и  $\Delta G_{\text{C/CO}}^0$  дает возможность рассчитать температуру начала восстановления. Результаты выполненных расчетов приведены ниже:

Оксиды	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	ZnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	CoO	NiO	PbO	CuO
$T_{\text{н.в.}}, \text{K}$	2020	1949	1675	1304	1093	980	862	790	469	324

В реальных условиях при восстановительном обжиге конкреций, например, в трубчатой вращающейся печи на первых стадиях обжига параллельно протекает значительный объем эндотермических процессов, связанных с дегидратацией и структурной перестройкой составляющих ЖМК, в связи с чем температуры начала восстановления окислов ведущих компонентов конкреций сдвинуты, по сравнению с расчетными, в сторону более высоких температур.

Экспериментальное опробование восстановительного обжига конкреций (100% — 10 мм) с оптимальным количеством восстановителя (6% коксика) при температуре 400, 600 и 900 °С (продолжительность обработки 1 час) показали, что первые мелкодисперсные корольки металла с очень высоким содержанием меди (до 90%) образуются при 400 °С. С повышением температуры обжига степень восстановления Cu, Ni и Co увеличивается, и после термической обработки при 900 °С в обжигаемом продукте присутствует значительное количество корольков металла, содержащих 5,0–25% Cu, 6,0–30,0% Ni, 1,0–4,0% Co, а также включения практически чистых меди и никеля.

Учитывая, что продолжительность пребывания материалов в промышленной вращающейся печи значительно превышает 1 час и, тем самым, создаются благоприятные кинетические условия для достаточно полного протекания большого объема твердофазных процессов восстановления, в реальных условиях при восстановительном обжиге ЖМК следует ожидать достаточно высокую степень металлизации огарка и при температуре несколько ниже 900 °С, например, в интервале 800–850 °С. Эффект “разупрочнения” конкреций при температуре 300–500 °С и значительное содержание щелочей в ЖМК необходимо учитывать при доработке температурного режима обжига, чтобы исключить чрезмерное переизмельчение обожженного продукта и образование настывей в горячих зонах печи.

## Выводы

Высокая теплоёмкость конкреций в интервале температур 100–800 °С является причиной плохой спекаемости шихт из ЖМК при агломерации их по известным технологическим схемам. Возможность получения качественного агломерата при спекании конкреций на аглоленте может быть установлена при доработке технологического режима в сочетании с разработкой комбинированных схем.

Для окускования мелких фракций ЖМК (5–0 мм) целесообразно применять брикетирование при давлении 0,25–0,5 т/см<sup>2</sup>, а для пылеватых фракций (< 250 мкм) — окомкование с последующим обжигом брикетов и окатышей при 850–900 °С.

Перспективным методом подготовки океанических конкреций к плавке является предварительный восстановительный обжиг. Показана принципиальная возможность получения металлизированного огарка после термической обработки ЖМК при 900 °С.

Целесообразность использования того или иного метода подготовки ЖМК к плавке может быть окончательно обоснована после отработки условий добычи и кондиционирования гранулометрического состава поступающих на металлургический передел конкреций.

1. *Базилевич С.В., Вегман Е.Ф.* Агломерация. — М.: Металлургия, 1967. — 368 с.
2. *Гасик М.И.* Марганец. — М.: Металлургия, 1992. — 608 с.
3. *Ермолов В.М., Миракова М.Г., Шушлебин Б.А.* Исследование свойств железомарганцевых конкреций / Известия ВУЗов. Черная металлургия. — 1984. — № 9. — С. 22–26.
4. *Казачков Е.А.* Расчеты по теории металлургических процессов. — М: Металлургия, 1988. — 360 с.
5. *Кучер А.Г., Рогачев И.П., Ровенский И.И. и др.* Выплавка углеродистого ферромарганца с применением окатышей, полученных из смеси флотационного и гидрометаллургического марганцевых концентратов // Сб. "Металлургия и коксохимия". — Киев: Техніка, 1969. — Вып. 16. — С. 41–46.
6. *Кучер А.Г., Ильченко К.Д.* Исследование теплофизических свойств марганцевых минералов, шихтовых материалов и шихт для выплавки марганцевых ферросплавов / Изв. ВУЗов. Черная металлургия. — 1984. — № 10. — С. 39–44.
7. *Маерчак Ш.* Производство окатышей. — М.: Металлургия, 1986. — 520 с.

Досліджені та експериментально випробувані процеси підготовки залізомарганцевих конкрецій (ЗМК) до плавки агломерацією, брикетуванням, огрудкуванням і відновним випалюванням.

Встановлено низький рівень спікання аглошихт з ЗМК при агломерації їх за відомими технологічними схемами. Для огрудкування дрібних фракцій ЗМК (5–0 мм) доцільно застосовувати брикетування при тиску 0,25–0,5 т/см<sup>2</sup>, а для пилоподібних фракцій (< 250 мкм) — огрудкування зволожених шихт (28–32% Н<sub>2</sub>О) з подальшим випалюванням брикетів і окатишів при 850–900 °С. Показано принципову можливість одержання металізованого огарку в процесі відновлюваного випалювання конкрецій при 850–900 °С.

Processes of preparing iron-manganese nodules (IMN) for smelting have been studied and experimentally tested by their sintering, briquetting, pelletizing and reduction roasting.



It has been found that the IMN — sinter mixes are featured by low roasting properties when they are sintered according to conventional technological patterns. For fine iron-manganese nodules fractions of 5–0 mm it is advisable to use briquetting at a pressure of 0.25–0.5 t/cm<sup>2</sup>, while for powder-like fractions (< 250 μm) it is appropriate to use pelletizing of humidified mixes (28–32% H<sub>2</sub>O) with subsequent roasting of briquettes and pellets under 850–900 °C. The conceptual possibility of producing metallized sinter product by reduction roasting of concretions under 850–900 °C has been demonstrated.

УДК 621.695:622.276

Е.А. Кириченко<sup>1</sup>, В.П. Франчук<sup>1</sup>, В.В. Евтеев<sup>1</sup>, В.Г. Шворак<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА ЭРЛИФТНОГО ГИДРОПОДЪЕМА ПРИ МОРСКОМ ВОЛНЕНИИ

*Сформулирована начально-граничная задача, в рамках которой выполнены расчеты по определению собственных частот и параметров напряженно-деформированного состояния транспортного трубопровода глубоководного эрлифтного гидроподъема при вертикальных колебаниях, вызванных морскими волнениями.*

*Приведенные результаты исследования служат исходными данными при обосновании параметров глубоководных гидроподъемов, обеспечивающих работоспособность и энергосбережение установок в составе горно-морских добычных комплексов.*

Специфика добычи минерального сырья с больших глубин требует разработки научно обоснованного метода расчета параметров глубоководного гидроподъема, учитывающего новую область применения эрлифтов. Целью данной статьи является определение параметров вертикальных колебаний эрлифтного трубопровода и расчет его напряженно-деформированного состояния под действием волновых нагрузок.

Разнообразие методов расчета эрлифтов можно объяснить применением этих установок в различных областях народного хозяйства. В основном расчетные методики носят прикладной характер, базируются на использовании эмпирических коэффициентов и поэтому применимы лишь для ограниченных условий.

Так, предложенный В.Г. Гейером и Н.Г. Логвиновым [3] расчетный метод основывается на использовании безразмерных расходных характе-

© Е.А. Кириченко<sup>1</sup>, В.П. Франчук<sup>1</sup>, В.В. Евтеев<sup>1</sup>, В.Г. Шворак<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Национальный горный университет, Днепропетровск.