



УДК 621.74.045

Поступила 19.02.2014

В. С. ДОРОШЕНКО*, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СУХИХ СЫПУЧИХ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Предложен метод оптимизации зернового состава сыпучих песчаных смесей путем размещения частиц связующего в поры каркаса из песка при уплотнении этих смесей. Приведен пример расчета зернового состава такой смеси.

A method for optimizing the composition of the grain loose sand mixtures by placing the binder particles into the pores of the frame sand compaction of these mixtures. An example of calculation of grain composition of such a mixture.

Экологическая технология фильтрационной формовки по разовым ледяным моделям вместо органических модельно-формовочных материалов включает в себя использование льда и неорганических связующих. Обработка процесса проводится с такими гидратационными вяжущими материалами, образующими в контакте с водой кристаллогидраты, как гипс, цемент или металлофосфаты. Процесс формовки на начальной стадии подобен изготовлению формы для литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в контейнере с сухим песком. Только модель при этом ледяная, а вместо песка – сухая формовочная смесь (СФС), состоящая из сухого песка с указанными связующими в виде порошка.

При формовке СФС в контейнере виброуплотняют, затем модель расплавляют. Контакт порошкового связующего с водой обеспечивают путем фильтрации в поры песчаного наполнителя талого материала модели (воды или водной композиции) как жидкой фазы, влияющей на формирование межфазных слоев кристаллогидратов одновременно как растворитель и химический компонент. Эта жидкая фаза участвует в структурообразовании наравне с другими составляющими твердеющей системы и в результате переводит СФС из сыпучего состояния в связанное, подобное для затвердевшей ХТС.

Предложенный способ оптимизации сухих сыпучих смесей, кроме литейных процессов, может применяться для производства строительных или композитных изделий из зернистых смесей, которые после уплотнения упрочняют различными ме-

тодами, в частности, нагреванием (спеканием), пропариванием или с участием фильтрации жидкости со связующим.

Рассмотрим предпосылки появления такого типа смесей в литейном производстве. СФС имеют некую аналогию с сухими строительными смесями (ССС), а также со смесями для ювелирного и зубопротезного литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Последние обычно состоят из зернистых материалов с добавками полуводного гипса, поставляются готовыми в мешках или изготавливаются в литейных цехах замешиванием в сухом виде [1] и используются после замешивания с водой до жидкоподвижного состояния для изготовления форм.

В традиционных процессах получения литейной формы зернистые смеси перед уплотнением увлажняются или замешиваются со связующим, которое смачивает, обволакивает (плакирует) зерна наполнителя. Вода, смачивающая зерна, например кварцевого песка, сама является слабым связующим. Без такого смачивания зерен наполнителя отсутствовало бы образование манжет, связывающих зерна, представляющее адгезионно-когезионный комплекс, исходя из общей концепции о прочности дисперсных систем [2]. При этом зерна наполнителя, покрытые связующим, соприкасаются между собой через прослойки пленок, а уплотнение смеси связано с деформацией и разрушением одних манжет между зернами и образованием новых. Это требует значительных затрат на оборудование, оснастку и энергию для уплотнения смесей либо затраты на перевод смесей в жидкоподвиж-

* Под руководством д-ра техн. наук, проф. О. И. Шинского.

ное состояние, часто сопровождаемое последующей сушкой.

Следующий менее затратный способ уплотнения смеси «заимствовали» у вакуумной формовки из песка без связующего (ВПФ, ЛГМ) и применили для СФС. Он состоит в виброуплотнении сухой сыпучей смеси в течение 60–90 с до максимально возможной плотности при стыковании зерен наполнителя своей поверхностью без пленок связующего. Тогда частицы связующего и других добавок целесообразно разместить (вытеснить) между зернами наполнителя, например, прибегая к известной аналогии, что песок для бетона должен состоять из зерен различного размера, чтобы его межзерновая пористость была минимальной. Чем меньше объем пустот в песке, тем меньше требуется цемента для получения плотного бетона [3].

Моделирование уменьшения пористости формовочных смесей на системах, состоящих из шаров двух разных диаметров, в одной из простейших моделей дало известную зависимость, что малый шар с диаметром $d = (2^{0,5} - 1) D \approx 0,41D$, где D – диаметр второго большего шара [4]. Уменьшение пористости достигается при вполне определенном соотношении размеров зерен малого и большого размеров.

Аналогичные работы по приготовлению бетонов с учетом гранулометрического состава наполнителей показывают, что часто экономичнее использовать имеющийся поблизости материал, даже если это требует применения более жирных смесей, чем возить издалека наполнитель лучшего зернового состава. Подчеркивается, что не существует идеального гранулометрического состава и что можно приготовить качественный бетон на наполнителях с широким диапазоном такого состава [5]. При изменении гранулометрического состава наполнителя следует оперативно изменять состав смеси для поддержания стабильно высокого ее качества. Для этого необходим несложный способ расчета по результатам ситового анализа. Известны также сухие смеси для футеровок печей с минимальной пористостью [6]. Их материалы специально рассеиваются и затем смешиваются в определенной пропорции, но эти смеси дорогостоящие и для разовых литейных форм не применяются.

Постоянная зависимость прочности формовочной смеси от изменения соотношения крупных и мелких фракций кварцевого песка подтверждена экспериментально; если во влажном состоянии влияние мелкой фракции слабо влияет на прочность, то в сухом состоянии наблюдается повышение прочности смеси в 1,2–1,5 раза при содержа-

нии мелкой фракции в пределах 35–55% от количества крупной [7]. Прочность традиционных смесей с пленками связующего во многом зависит от количества и качества связующего и часто от метода и степени уплотнения. Указанный интервал содержания мелкой фракции весьма велик, а рассчитанные в упомянутой работе уравнения регрессии характеризуются многофакторностью и зависят от конкретного уплотняющего формовочного оборудования, что затрудняет перенос их использования для сухих сыпучих смесей, уплотняемых вибрацией.

Как показали наши исследования, изготовления форм по разовым ледяным моделям наиболее выгодно методом фильтрационной формовки, при которой СФС содержит наполнитель – кварцевый песок и технологические добавки, включая порошкообразный гипс и/или цемент, ускорители их твердения и др. [8]. Этой смесью засыпают в контейнере ледяную модель и смесь виброуплотняют аналогично формовке при ЛГМ. При таянии модели и капиллярно-адгезионной фильтрации в эту смесь продуктов таяния ледяной модели указанные порошкообразные связующие увлажняются, твердеют и связывают формовочную смесь. Наименее трудоемкий вариант формовки включает в себя процесс выстаивания при температуре производственного помещения порядка 20 °С, при которой самопроизвольно происходят три операции: таяние модели, освобождение полости фильтрацией жидкости в стенки формы и твердение песчаной формы. Этот процесс ускоряет экзотермическая реакция образования кристаллогидратов.

Обзор литературы показывает, что методики гранулометрической оптимизации строительных материалов известны практически лишь для оптимизации наполнителей, а ССС производят в виде порошка или сухой массы, которая обретает технологические свойства при замешивании в нее воды. Это вселяет уверенность в том, что смеси, приготовленные без учета оптимизации зернового состава, безусловно, уступают по показателям качества и экономичности смесям с «идеальным» гранулометрическим составом наполнителей, который характеризуется наименьшей межзерновой пустотностью при минимальной поверхности частиц наполнителя [9]. Поскольку нельзя получить смесь одновременно с минимальным объемом межзерновых пустот и наименьшей удельной поверхностью зерен (минимизация может быть выполнена только по одному параметру), то оптимальный состав подбирается из условия, чтобы объем пустот в смеси и суммарная поверхность зерен обеспечивали требуемую подвижность растворной (бетонной) смеси при минимальном расходе вяжущего.

Отсутствие в настоящее время математических моделей для несложного расчета оптимальных зерновых составов СФС по данным стандартного зернового анализа в цеховой лаборатории увеличивает трудоемкость производства и затрудняет достижение стабильного качества этих смесей. СФС, уплотняемые в сыпучем состоянии, а затем упрочняемые пропиткой жидкости, спеканием, пропариванием, пока редко применяются в литейном производстве. В этих смесях к зерновому составу относится не только песок, но и сухие технологические добавки. Наша идея состояла в том, чтобы в поры каркаса из песка «загнать» эти добавки.

Для наполнителя – сухого песка формовочного с массовой долей влаги не более 0,5 % по ГОСТ 2138–91 использовали результаты моделирования, приведенные в работе [4], относящейся к классике по теории и технологии формовки. Отсутствие другого взаимодействия между частицами, кроме внутреннего трения, в материале СФС позволяет виброуплотнением создать прочный каркас из зерен наполнителя при контакте их своей поверхностью, а сухие технологические добавки разместить в пустотах этого прочного каркаса по концепции из [3]. Вибровоздействие на формовочный материал снижает трение между зёрнами и переводит их в состояние «псевдожидкости» с уплотнением до максимально возможной плотности. Как первый шаг оптимизации для наполнителя со средним размером зерна D_{cp} применили технологические добавки со средним размером их зерен, который не превышает $D_{тд} = 0,41D_{cp}$. Определение размеров зерен наполнителя и технологических добавок проводили по ГОСТ 29234.3–91.

Следующий этап оптимизации основан на наиболее простом и удобном для кварцевых песков уравнении Фуллера [9], согласно которому оптимальная гранулометрия наполнителя представляет собой параболу, приведенную в работе [4]. По уравнению Фуллера $X_i = 100(D_i / D_{макс})^{0,5}$, где, кроме ранее указанных обозначений, X_i – содержание фракции с размером зерен меньше D_i , % [10]. Подставив $D_i = D_{тд} = 0,41D_{cp}$ в это уравнение, получим требуемое содержание фракции такого размера в формовочной смеси, что соответствует размеру $D_{тд}$. Если вычесть из него массу (%) M уже имеющихся зерен в формовочном песке с размером меньше $D_{тд}$, определенную гранулометрическим анализом этого песка, то получим интервал X , который можно заполнить технологическими добавками $X = 100(0,41D_{cp} / D_{макс})^{0,5} - M$. Таким образом, получили метод оптимизации и оперативного расчета оптимального зернового состава СФС [11] с уточнением, что M – фактическое содержание,

мас.%, фракций в наполнителе с размерами меньше $0,41D_{cp}$ или меньше сторон ячейки сита ближайшего большего размера от $0,41D_{cp}$ при испытаниях по ГОСТ 29234.0.

Для примера применения метода оптимизации состава и оперативного метода расчета оптимального зернового состава СФС использовали данные гранулометрического состава конкретного формовочного песка по ГОСТ 2138–91, приведенные в таблице для определения среднего размера зерна по ГОСТ 29234.3–91, и провели расчет.

Рассев формовочного песка

Размер сторон ячейки сита в свету, мм	Остаток на сите, г	Остаток на сите, %	Частица размером, меньше сторон ячейки сита, %
2,50	0	0	100
1,60	0	0	100
1,00	0,1	0,2	99,8
0,63	0,4	0,8	99,0
0,40	1,8	3,7	95,3
0,315	4,6	9,5	85,8
0,20	18,75	38,5	47,3
0,16	8,9	18,3	29,0
0,10	11,6	23,8	5,2
0,063	2,35	4,8	0,4
0,05	0,15	0,3	0,1
Тазик	0,05	0,1	0
Всего	50,00	100	

Поскольку величина зерна характеризуется номером сита, на котором остается данное зерно после прохождения его сквозь предшествующее сито, то $D_{макс} = 1,00$ мм. При расчете по ГОСТ 29234.3–91 $D_{cp} = 0,206$ мм. Тогда, согласно предложенному методу, средний размер зерен технологических добавок не должен превышать $D_{тд} = 0,41D_{cp} = 0,084$ мм.

Поскольку ячейки сита с размером 0,084 мм по ГОСТ 29234.3–91 не указаны, то ужесточили условия и в качестве M приняли массу частиц, прошедших сквозь ячейку ближайшего большего размера 0,10. Тогда, по данным таблицы, $M = 5,2$ % и расчет допустимого содержания технологических добавок выглядит так: $X = 100(D_{тд} / D_{макс})^{0,5} - M = 100(0,084 / 1)^{0,5} - 5,2 = 29,0 - 5,2 = 23,8$ %. Таким образом, смесь, согласно расчету, должна состоять из формовочного песка, рассев которого приведен в таблице, и технологических добавок со средним диаметром менее 0,084 мм в количестве менее 23,8 %.

Примером такой сыпучей смеси для уплотнения в сухом состоянии и последующего упрочнения при пропитке водной композицией тающей ледяной модели служила смесь на основе песка сле-

дующего состава: формовочный песок –77%; гипсовое вяжущее –15% тонкого помола с максимальным остатком на сите с ячейками размером в свету 0,2 мм не более 2%; цемент – 8% с удельной поверхностью 0,7–0,9 м²/г. Эти технологические добавки имели $D_{ср}$ менее 0,084 мм. При получении форм из этой смеси по ледяным моделям применяли лед из чистой воды или вводили в него 1–2 % жидкого стекла для ускорения твердения смеси и ее водостойкости.

Кроме «свежего» формовочного песка, применяли вторичный сухой песок, высыпанный из формы при извлечении отливки и охлажденный до температуры помещения цеха, и/или вторичный песок, прошедший тепловую регенерацию. Формование и рассев с такими песками и их смесями проводили аналогично использованию чистого песка.

Предложенные сухие сыпучие смеси с оптимизацией по зерновому составу, уплотняемые в сыпучем состоянии и упрочняемые пропиткой жидкости, спеканием, пропариванием, вакуумированием или другими способами, кроме литейных процессов, также пригодны для производства строительных или огнеупорных изделий, футеровки изложниц и ковшей. Рассмотренный оперативный метод рекомендуется занести в компьютерные программы для расчета состава СФС и мониторинга его изменения в системе контроля качества литейного процесса. Этот метод упростит технологическую подготовку процесса приготовления смесей, позволит оперативно корректировать составы смесей при изменении рецептуры и поставляемых материалов, а приведенный пример расчета облегчит его применение лаборантами формовочных отделений.

Литература

1. Р е п я х С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006.
2. Ж у к о в с к и й С. С., Р о м а ш к и н В. Н. О «шаровой» модели формовочной смеси // Литейное производство. 1986. № 3. С. 12–13.
3. Б а ж е н о в Ю. М., К о м а р А. Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1984.
4. Б е р г П. П. Формовочные материалы. М.: Машгиз, 1963.
5. Н е в и л л ь А. М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972.
6. Ш у м и х и н В. С., Л у з а н П. П., Ж е л ь н и с М. В. Синтетический чугун. Киев: Наукова думка, 1971.
7. Ш е й к о О. И., К л и м е н к о В. А., И г н а т ь е в а Я. В. Влияние гранулометрического состава кварцевого песка на прочность формовочной смеси // Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». 19–21.11.2012. Киев, ФТИМС НАН Украины. С. 314–316.
8. Пат. UA 83891: МПК В22С 9/04, В22С 7/00. Способ изготовления литейных форм по легкоплавким моделям / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. Опубл. 26.08.08. Бюл. № 16.
9. З о з у л я П. В. Штукатурные материалы: традиции и современность // Докл. конф. Baltimix-2006, <http://rudocs.exdat.com/docs/index-215924.html> (дата обращения: 15.02.2014).
10. Влияние зернового состава заполнителя на уплотнение низкоцементного бетона / В. В. Песчанская, Ю. А. Онасенко, Ю. С. Пройдак, И. В. Голуб // Зб. наук. пр. ВАГ «УкрНДІВогнетривів ім. А. С. Бережного». 2010. Вип. 110. С. 220–226.
11. Пат. UA 83018: МПК В22С 9/02. Сухая формовочная смесь, уплотняемая в сыпучем состоянии / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. Опубл. 27.08.2013. Бюл. 16.