

УДК 621.74.045

В. С. Дорошенко*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ФОРМОВКИ

Предложен метод оптимизации зернового состава сыпучих песчаных смесей, новизна которого состоит в размещении частиц связующего в порах каркаса из песка при уплотнении вибрацией этих смесей. Приведены примеры расчета зернового состава таких смесей, а также образцы отливок и форм, получаемых при их использовании.

Ключевые слова: гранулометрический состав, формовка, формовочная смесь, ледяные модели, кристаллогидраты, оптимизация.

Запропоновано метод оптимізації зернового складу сипучих піщаних сумішей, новизна якого полягає в розміщенні часток сполучного в порах каркаса з піску при ущільненні вібрацією цих сумішей. Наведено приклади розрахунку зернового складу таких сумішей, а також зразки виливків і форм, які отримують при їх використанні.

Ключові слова: гранулометричний склад, формування, формувальна суміш, крижані моделі, кристалогідрати, оптимізація.

There described method for optimization composition of the grain bulk sand mixtures, novelty consists in placing the binder particles into the pores of the frame sand compaction by vibration of these mixtures. It were given examples of the calculation of the grain structure of such mixtures, as well as molds and patterns of castings obtained by using them.

Keywords: grain composition, molding, molding sand, ice patterns, crystal hydrates, optimization.

Экологическая безопасность технологии фильтрационной формовки по разовым ледяным моделям достигается использованием льда и неорганических связующих. Ими предполагается заменить пенопластовые или воскообразные органические модельные материалы. Отработка процесса получения оболочковых форм по ледяным моделям проводилась с такими гидратационными вяжущими материалами, образующими в контакте с водой кристаллогидраты, как гипс, цемент или металлофосфаты. Процесс формовки на начальной стадии подобен из-

* Работа выполнена под рук. О. И. Шинского, экспериментальная часть выполнена Ю. Н. Ивановым

готовлению формы для литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в контейнере с сухим песком. Только модель при этом не пенопластовая, а ледяная, и вместо песка – сухая формовочная смесь (СФС), состоящая из сухого песка с указанными связующими в виде порошка.

При формовке в контейнере с моделью СФС виброуплотняют, затем модель расплавляют. Наиболее простой вариант – самопроизвольное таяние модели при выстаивании формы в помещении цеха (в течении второй и третьей смены). 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, присущее затвердевшей холоднотвердеющей смеси (ХТС). В ряде случаев во избежание «оседания» стенок формы под действием влаги модели применяли непродолжительное вакуумирование формы, но чаще использовали 1-, 2-, или 3-слойное порошковое (противопригарное) покрытие (в зависимости от массы ледяной модели), которое наносили в сочетании с водным аэрозолем, так как начало схватывания гидратационных компонентов покрытия опережало начало плавления ледяной модели.

Предложенный в статье способ оптимизации сухих сыпучих смесей, кроме литейных процессов, предлагается для применения в производстве строительных или композитных изделий из зернистых смесей, которые после уплотнения упрочняют различными методами, в частности, нагреванием (спеканием), пропариванием или с участием фильтрации жидкости со связующим.

Смеси типа СФС давно применяют в литейном производстве. Они имеют аналогию с сухими строительными смесями (ССС), а также со смесями для ювелирного и зубопротезного литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Последние смеси 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 литейных форм зернистые смеси перед уплотнением увлажняют или замешивают со связующим, которое смачивает, обволакивает (плакирует) зерна наполнителя. Вода, смачивающая зерна, например, кварцевого песка, сама является слабым связующим. Такое смачивание зерен наполнителя обеспечивает образование манжет, связывающих зерна, создавая смесь как 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 и часто замешивание смеси связано с деформацией и разрушением одних манжет между зернами и образованием новых для получения смеси в виде структурно связанного тела. Это требует значительных затрат на оборудование (при отсутствии отечественного серийного производства формовочного оборудования), оснастку и энергию для уплотнения смесей, либо затраты на перевод смесей в жидкоподвижное состояние, часто сопровождаемое последующей сушкой.

При перемешивании, уплотнении смеси и деформации смеси в стенке уплотненной формы изменение связности или структурной упорядоченности смеси достигается внешней сдвигающей нагрузкой F , которой отвечает соответствующее внутреннее предельное напряжение сдвига. Факторы, влияющие на предельное сопротивление сдвигу при уплотнении увлажненной смеси, представлены на рис. 1 [3]. При прессовании увлажненной смеси слои жидкости и жидкостная пленка снижают молекулярное сцепление частиц, их трение, механическое сцепление и повышают возможность «проворота» частиц.

Менее затратный способ уплотнения смеси без разрушения манжет связующего «заимствовали» у вакуумной формовки из песка без связующего (ВПФ, ЛГМ) и применили как важное преимущество для СФС. Он состоит в уплотнении сухой сыпучей смеси на вибростоле в течение 60-90 с до максимально возможной плотности при стыковании зерен наполнителя своей поверхностью без пленок связующего. Тогда схему (рис. 1) можно рассматривать без группы факторов, связанных с влажностью смеси и показанных в нижней части рис. 1. И тогда частицы связующего и других порошковых добавок СФС целесообразно разместить (вытеснить) между зернами наполнителя, 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 [4].

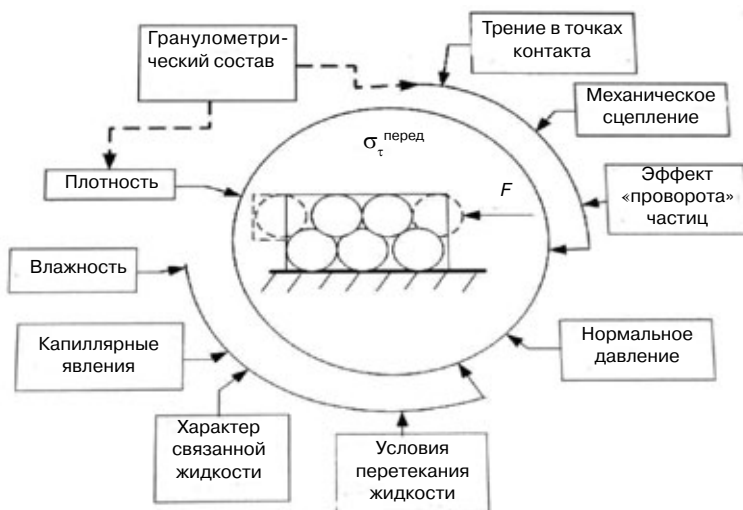


Рис. 1. Факторы, влияющие на предельное сопротивление сдвигу при уплотнении смеси [3]

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 $d = (2^{0.5} - 1) D \approx 0,41 D$, где D – диаметр второго большего шара [5]. Уменьшение пористости достигается при вполне определенном соотношении размеров зерен, малого и большого размеров.

Аналогичные работы по приготовлению бетонов с улучшением гранулометрического состава наполнителей указывают, 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 [6]. При изменении гранулометрического состава наполнителя следует оперативно изменять состав смеси для поддержания стабильно высокого ее качества, что и привело к разработке предложенного несложного способа расчета такого состава по результатам ситового анализа. Известны также сухие смеси для футеровок печей с минимальной пористостью [7]. Их материалы специально рассеивают и затем смешивают 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 мелкая фракция слабо влияет на прочность, то в сухом – наблюдается повышение прочности смеси в 1,2-1,5 раза при содер-

жании мелкой фракции в пределах 35-55 % от количества крупной [8]. Прочность традиционных смесей с пленками связующего во многом зависит от количества и качества связующего и часто зависит 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. [9]. 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 процесс выстаивания при температуре помещения литейного цеха порядка 20 °С, при которой самопроизвольно происходят три операции: таяние модели, освобождение полости фильтрацией жидкости в стенки формы и твердение песчаной формы [10]. Таяние модели 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 добавлении в нее воды. Такой обзор также 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 [11]. Поскольку нельзя получить смесь одновременно с минимальным объемом межзерновых пустот и наименьшей удельной поверхностью зерен (минимизация может быть выполнена только по одному параметру) [11], 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 на сегодня 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. Поскольку в этих смесях к зерновому составу относится не только песок, но и сухие технологические добавки, то новизна нашего решения 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 по книге [5], 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, следуя концепции из монографии [4]: чем меньше объем пустот в песке, тем меньше требуется цемента.

Вибровоздействие на формовочный материал снижает трение между зернами 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 $D_{\text{тд}}$, который не превышает $D_{\text{тд}} = 0,41D_{\text{ср}}$. Определение размеров зерен на-полнителя и технологических добавок проводили по ГОСТ 29234.3-91.

Следующий этап оптимизации основан на использовании наиболее простого и удобного для кварцевых песков уравнения Фуллера [11], согласно которому оптимальная гранулометрия заполнителя представляет собой параболу, показанную в работе [5]. По уравнению Ю. Фуллера $X_i = 100(D_i / D_{\text{макс}})^{0,5}$, где, кроме ранее указанных обозначений, X_i – содержание фракции с размером зерен меньше D_i %, а $D_{\text{макс}}$ – максимальный размер зерен [12]. Подставив $D_i = D_{\text{тд}} = 0,41 D_{\text{ср}}$ в это уравнение, получили требуемое содержание фракции такого размера в формовочной смеси, что соответствует размеру $D_{\text{тд}}$.

Если вычесть из него массу (%) M уже имеющихся зерен в формовочном песке с размером меньше $D_{\text{тд}}$, определенную гранулометрическим анализом этого песка, то получим интервал X , который можно заполнить технологическими добавками $X = 100 (0,41D_{\text{ср}} / D_{\text{макс}})^{0,5} - M$. Таким образом, получен метод оптимизации и оперативного расчета оптимального зернового состава СФС [13] с уточнением, что M – фактическое содержание (%мас.) фракций в наполнителе с размерами меньше $0,41 D_{\text{ср}}$ или с размерами меньше сторон ячейки сита ближайшего большего размера от $0,41 D_{\text{ср}}$ при испытаниях по ГОСТ 29234.3-91.

В качестве примера применения метода оптимизации состава и оперативного метода расчета оптимального зернового состава СФС использовали данные гранулометрического состава конкретного формовочного песка по ГОСТ 2138-91, помещенные ниже в таблицу для определения среднего размера зерна по ГОСТ 29234.3-91, и провели расчет.

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

Рассев формовочного песка K02

Размер сторон ячейки сита в свету, мм	Остаток на сите, г	Остаток на сите, %	Частиц 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	–

Проблемы технологии формы

глядит так: $X = 100 (D_{\text{ид}} / D_{\text{макс}})^{0,5} - M = 100 (0,084 / 1)^{0,5} - 5,2 = 29,0 - 5,2 = 23,8 \%$. Таким образом, в смесь, согласно расчета, должна состоять из формовочного песка, рассев которого показан 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 последующим упрочнения при пропитке водной композицией тающей ледяной модели служила смесь на основе рассмотренного песка такого состава (по массе): 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 $D_{\text{ср}}$ 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. Кроме того, в одном из вариантов СФС в составе технологических добавок размером $D_{\text{ид}}$ использовали в количестве до 0,5 % молотые отходы пенополистирола или его молотые отходы, прошедшие тепловую обработку. Последний вид имеет компактный объем, удобный для хранения. Эта добавка при нагреве выше температуры ее стеклования (~100 °С), например, во время операции сушки формы, и при последующем охлаждении смеси, обладает связующими свойствами, повышает газопроницаемость при высоких температурах (выше ~450 °С), например, оболочковых форм, нагреваемых до такой температуры, а также улучшает выбиваемость песчано-жидкостекляных смесей.

На рис. 2 показаны фрагменты отработки процесса формовки с использованием описанных СФС на примере получения отливки «звездочка конвейера». На рис. 2, а, б показаны внешний вид и распиленные половинки оболочковых форм толщиной 6-8 мм рядом с блоками ледяных моделей; на рис. 2, в – залитая металлом форма;

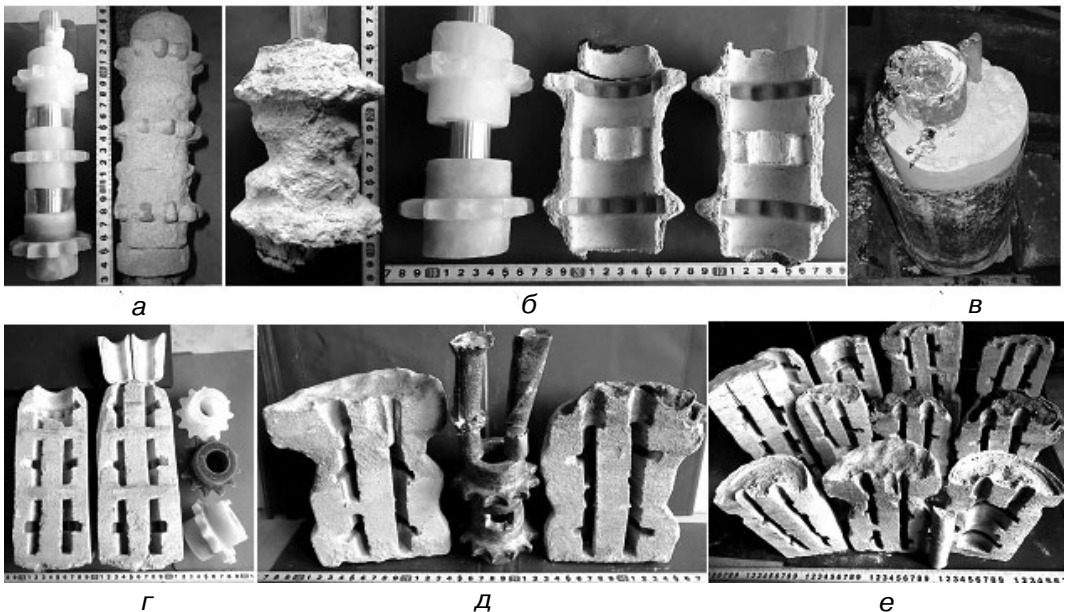


Рис. 2. Примеры ледяных моделей, оболочковых форм из СФС и отливок: а – блок из трех моделей и 3-местная форма; б – 2-местная форма, блок из двух моделей и распиленная форма; в – залитая форма; г – распиленная 3-местная форма и отдельные модели разной окраски; д – распиленная 2-местная форма и отливка по такой форме; е – распиленные 2- и 3-местные формы в процессе отработки формовки

на рис. 2, г-е – распиленные оболочки толщиной 20-25 мм и отливка блока из двух звездочек.

Предложенные сухие сыпучие смеси с оптимизацией по зерновому составу, уплотняемые в сыпучем состоянии и упрочняемые пропиткой жидкости, спеканием, пропариванием, вакуумированием или т. п. способами, кроме литейных процессов, также пригодны для производства строительных, огнеупорных изделий или изделий порошковой металлургии, футеровки изложниц и ковшей. Предложенная оптимизация будет оказывать упрочняющее действие также для СФС, используемых в процессе формовки в жидкоподвижном (наливном) состоянии, или в строительных смесях, уплотняемых увлажнением.

Рассмотренный оперативный метод гранулометрической оптимизации рекомендуется ввести в компьютерные программы для расчета составов СФС и мониторинга их изменения в системе контроля качества литейного процесса. Этот метод упростит технологическую подготовку процесса приготовления смесей, позволит оперативно корректировать составы смесей при изменении поставляемых материалов, а приведенный пример расчета облегчит его применение лаборантами формовочных или смесеприготовительных участков.



Список литературы

1. *Репях С. И.* Технологические основы литья по выплавляемым моделям. - Днепропетровск: Лира. – 2006. – 1056 с.
2. *Жуковский С. С., Ромашкин В. Н.* О «шаровой» модели формовочной смеси // Литейн. про-во. – 1986. – № 3. – С. 12-13.
3. *Кокорин В. Н., Филимонов В. И., Булыжев Е. М.* Научные основы интенсификации уплотнения металлических порошков. – Ульяновск: УлГТУ. – 2010. – 217 с.
4. *Баженов Ю. М., Комар А. Г.* Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 672 с.
5. *Берг П. П.* Формовочные материалы. – М.: Машгиз, 1963. – 408 с.
6. *Невилль А. М.* Свойства бетона. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.
7. *Шумихин В. С., Лузан П. П., Жельнис М. В.* Синтетический чугун – К.: Наук. думка, 1971. – 160 с.
8. *Шейко О. И., Клименко В. А., Игнатьева Я. В.* Влияние гранулометрического состава кварцевого песка на прочность формовочной смеси // Материалы II Междунар. научно-практич. конф. «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». 19-21.11.2012. Киев, ФТИМС НАН Украины. – С. 314-316.
9. Пат. UA 83891, МПК В22С 9/04, В22С 7/00. Способ изготовления литейных форм по легкоплавким моделям / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко – Оpubл. 26.08.08. Бюл. №16.
10. *Дорошенко В. С.* О системе мониторинга процесса литья по ледяным моделям // Литейн. про-во. – 2014. – № 5. – С. 11-16.
11. *Зозуля П. В.* Штукатурные материалы: традиции и современность // Доклады конференции Baltimix-2006, <http://rudocs.exdat.com/docs/index-215924.html> (дата обращения 25.11.2014).
12. Влияние зернового состава заполнителя на уплотнение низкоцементного бетона / В. В. Песчанская, Ю. А. Онащенко, Ю. С. Пройдак, И. В. Голуб // Зб. наук. пр. ВАТ "УкрНДІВогнетривів ім. А. С. Бережного". – 2010. – Вип. 110. – С. 220-226.
13. Пат. UA 83018, МПК В22С 9/02. Сухая формовочная смесь, уплотняемая в сыпучем состоянии / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. – Оpubл. 27.08.2013, Бюл. 16.

Поступила 01.12.2014