

УДК 621.742.4

Способ повышения прочности песчаной формы, изготовленной методом 3D-печати

Узлов Михаил Геннадьевич

uzlov.m@mail.ru

Коротченко Андрей Юрьевич

korotchenko@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены основные причины, обуславливающие повышенный расход связующего (фурановой смолы) при изготовлении форм методом 3D-печати по сравнению с формами из холодно-твердеющих смесей (широко используемая технология в литейном производстве). Приведен способ увеличения плотности упаковки гранул песка, заключающийся в оптимизации гранулометрического состава, целью которого является увеличение прочности формы, а также уменьшение расхода связующего.

Ключевые слова: 3D-печать, холодно-твердеющая смесь, связующее, прочность литейной формы, насыпная плотность, плотность упаковки, гранулометрический состав

Determination of gas content of mixtures in 3D printing and sand mold casting technologies

Uzlov Mikhail Gennadyevich

uzlov.m@mail.ru

Korotchenko Andrey Yuryevich

korotchenko@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper considers the main reasons for the increased consumption of binder (furan resin) in the manufacture of molds by 3D printing compared to molds made from cold-hardening mixtures (a widely used technology in foundry production). A method for increasing the packing density of sand granules is presented, which consists in optimizing the granulometric composition, the purpose of which is to increase the strength of the mold, as well as reduce binder consumption.

Keywords: 3D printing, cold-hardening mixture, binder, strength, bulk density, packing density, granulometric composition

Введение. Одной из технологий, применяемых в литейном производстве для изготовления отливок единичной и мелкой серии, является 3D-печать (аддитивный способ). В настоящее время для изготовления песчаных форм используются холодно-твердеющие смеси (ХТС), в состав которых входит: кварцевый песок, фурановая смола и катализатор. Повышенный расход смолы относится к одному из основных отличий технологии 3D-печати песчаных форм по сравнению с формами из ХТС, изготовленных ручным, а также машинными методами. Увеличенный расход смолы приводит к повышению газо-

творности формы (ГС), что служит причиной возникновения литейных дефектов, в частности, газовых раковин.

Материалы и методы. Целью работы является описание причин, обуславливающих повышенный расход связующего (фурановой смолы) при изготовлении форм методом 3D-печати по сравнению с ХТС процессом (классической технологией), а также описание способа повышения прочности песчаной формы и снижения количества применяемого связующего путем оптимизации гранулометрического состава.

В таблице представлены данные для классической технологии и 3D-печати: средний размер зерна [1, 2], прочность при разрыве [1, 2], ГС [1, 3], расход смолы [1, 4, 5].

Различия в технологиях ХТС процесса и 3D-печати

Параметр сравнения	ХТС процесс (классическая технология)	3D-печать
Средний размер зерна, мм	Не менее 0,19–0,23	0,14–0,18
Прочность при разрыве через 24 ч выдержки при 25 °С, МПа	1,2–1,5	0,95
Газотворность смеси через 24 ч (объем газа за вычетом расширения воздуха), см ³ /г	11–12	11,6–18,4
Расход смолы, %	0,8–1,2	1–5

Так, с ростом удельной поверхности песка растет число активных центров, а значит требуется больше связующего, чтобы его содержание на единицу поверхности оставалось постоянным [2]. Увеличение плотности смеси приводит к росту числа контактов, приходящихся на единицу объема N_v на 40–50 %, что в свою очередь приводит к увеличению прочности ХТС в 1,5–2 раза. Это достигается за счет «раздавливания» манжет и увеличения площади склейки [2]. В технологии 3D-печати используется песок с размером зерна меньшим, чем в ХТС процессе, измельчение зернового состава при неизменном содержании мас. ч. смолы снижает прочность. Тем самым, чтобы достичь требуемой прочности формы при изготовлении методом 3D-печати необходимо увеличить количество применяемого связующего, за счет чего растет газотворная способность смеси, которая может привести к таким дефектам как газовая и ситовидная пористость в отливке.

С целью увеличения прочности формы вместе со снижением расхода связующего при печати и, как следствие, уменьшением газотворности смеси требуется увеличение плотности без применения физических методов уплотнения, которые используются в ХТС процессе. Данная цель может быть достигнута путем оптимизации гранулометрического состава песка, то есть смешивания песков разных фракций. Тем самым зерна с меньшим размером

будут заполнять пустоты между крупными, что позволит увеличить плотность формы, а значит и ее прочность и уменьшить расход смолы. Чем меньше будет пустот, тем больше точек контакта между гранулами песка, а также большее количество манжет, связывающих зерна песка друг с другом.

Проблема достижения высокой насыпной плотности актуальна не только для аддитивной технологии 3D-печати литейных форм и стержней, но и для строительной отрасли, где ученые и специалисты работают в направлении оптимизации фракционных составов смеси заполнителей для самоуплотняющихся бетонов с целью получения максимальной плотности упаковки фракций [6, 7].

Авторы работы [8] ставили перед собой задачу определения оптимального фракционного состава смеси заполнителей, обеспечивающих достижение максимальной насыпной плотности и высоких физико-технических свойств бетона. При проектировании состава самоуплотняющихся бетонов (СУБ) важной является задача получения оптимального гранулометрического состава смеси с целью обеспечения наиболее плотной упаковки зерен [9]. Задача решается двумя способами:

1. С помощью получения «идеальной» кривой отсева заполнителей. Где заполнитель — это зерновой сыпучий материал, который вместе с водой и цементом формирует бетонную смесь

2. Смешивание трех и более видов крупного и мелкого заполнителей [8].

В качестве примера «идеальных» кривых рассматриваются кривые просеивания, предложенные Фуллером (1907) или Андреасеном (1930), уравнение которых имеет вид:

$$\frac{G_{\text{пр}}}{100} = \frac{X^n}{D_{\text{max}}^n},$$

где $G_{\text{пр}}$ — проход, % через сито размером X , мм; D_{max}^n — наибольшая крупность зерна в смеси; n — коэффициент распределения по Фуллеру 0,5 по Андреасену — 0,37.

Также применяются кривые просеивания, предложенные Функом и Дингером, уравнение которых имеет следующий вид:

$$\frac{G_{\text{пр}}}{100} = \frac{X^n - D_{\text{min}}^n}{D_{\text{max}}^n - D_{\text{min}}^n},$$

где D_{min}^n — наименьшая крупность зерна в смеси, мм [8].

В работе [8] для оптимизации гранулометрического состава смеси заполнителей принят способ смешивания трех и более видов крупного и мелкого заполнителей. Оптимизация состава выполнена путем симплекс-решетчатого плана и вероятностно-статистической обработки полученных данных [8].

Рассмотрим процесс оптимизации гранулометрического состава смеси, описанный в работе [8] подробнее. В качестве первого этапа был определен оптимальный гранулометрический состав двухкомпонентной системы состоящей из щебня фракции 5-10 мм и обогащенного песка фракции 0,16–5 мм.

Далее была построена зависимость плотности упаковки смеси от доли песка в смеси заполнителей (r) на рис. 1.

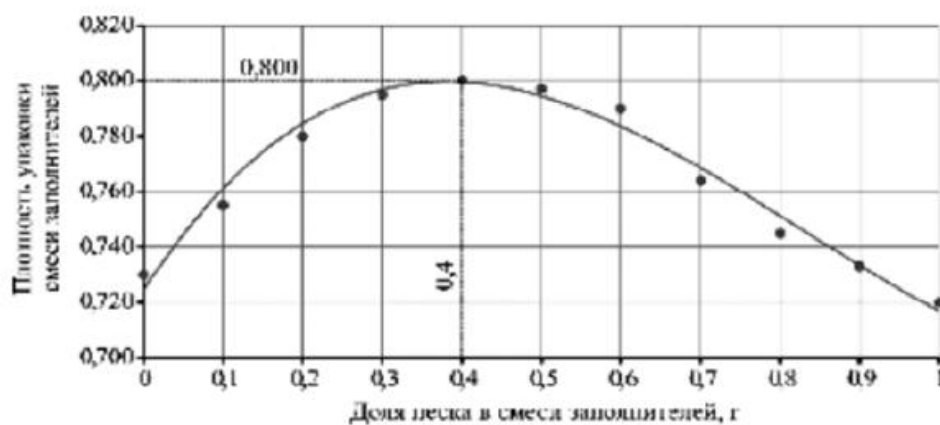


Рис. 1. Зависимость плотности упаковки двухкомпонентной системы от доли обогащенного песка фракции 0,16–5 мм в смеси [8]

Таким образом, согласно рис. 1 наибольшая плотность упаковки частиц (0,80) достигается при содержании обогащенного песка $r = 0,4$. Для увеличения плотности смеси необходимо введение мелкого песка фракции 0,16–0,63 мм. Оптимизация состава смеси заполнителей выполнена методом симплекс-решетчатого плана. Треугольник, изображенный на рис. 2, представляет собой область изучения оптимизации содержания трех заполнителей.

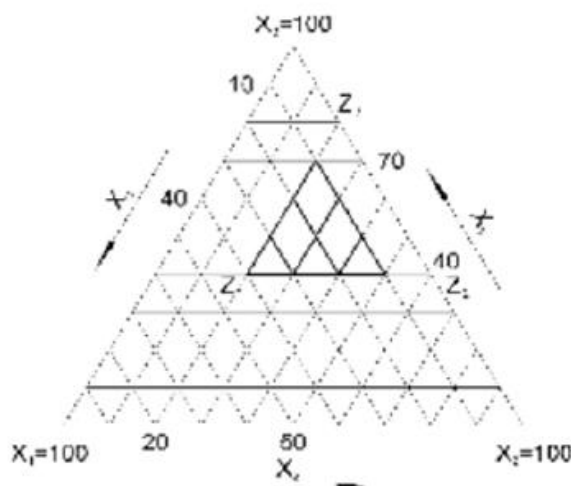


Рис. 2. Уточненная зона поиска оптимального значения соотношения компонент смеси [8]

Стороны треугольника на рис. 2 отображают состав частиц, сумма которых равна единице:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1,$$

где X_1 — песок фракции 0,16–0,63 мм; X_2 — песок фракции 0,16–5 мм; X_3 — щебень фракции 5–10 мм.

На основе выявленного оптимального содержания крупного и мелкого заполнителей двухкомпонентной смеси был принят следующий упрощенный диапазон для состава заполнителей: $X_1 = 10...40\%$, $X_2 = 20...50\%$, $X_3 = 40...70\%$. Составив уравнения регрессии и выполнив анализ диаграммы рис. 3 был сделан выбор области оптимального соотношения крупного и мелких заполнителей и их содержание: щебень фракции 5–10 мм — 48 %; обогащенный песок фракции 0,16–5 мм — 36 %; мелкий песок фракции 0,16–0,63 мм — 16 %.

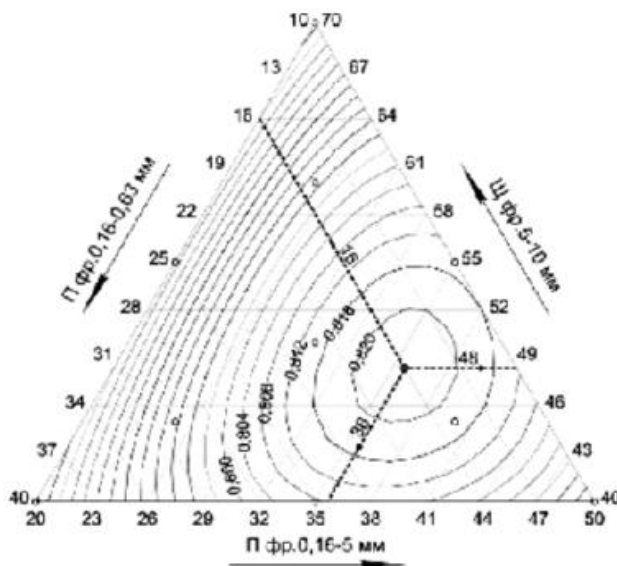


Рис. 3. Диаграмма для определения оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей по плотности упаковки заполнителей [8]

Результаты. Таким образом, проблема оптимизации гранулометрического состава песка, то есть смешивания песков разных фракций с целью достижения высокой насыпной плотности актуальна не только в литейном производстве, но и в строительной отрасли. Авторы [8] выполнили оптимизацию состава смеси заполнителей путем симплекс-решетчатого плана и вероятностно-статистической обработки полученных данных и тем самым достигли оптимального соотношения крупных и мелких фракций.

Обсуждение полученных результатов. Способы, применяемые в строительной отрасли, имеют место к изучению и рассмотрению, а также возможной адаптации и уточнению с целью использования в технологии 3D-печати песчаных форм и стержней. Увеличение насыпной плотности путем оптимизации гранулометрического состава песка приведет к увеличению прочности формы, уменьшению количества применяемого связующего и снижению газовыделения из форм и стержней, что в свою очередь уменьшит вероятность образования таких литейных дефектов как, газовая и ситовидная пористость.

Заключение. Увеличение плотности связано с ростом числа контактов гранул песка в единице объема, однако при 3D-печати уплотнение не применяется, что приводит к большему расходу фурановой смолы.

Рассмотрен способ, используемый в строительной отрасли, с целью оптимизации гранулометрического состава заполнителей бетона. Требуется подробнее изучить применимость способов уплотнения сыпучих материалов в строительной отрасли без физических методов уплотнения к технологии 3D-печати. Ожидаемый результат: увеличение плотности упаковки путем смешивания фракций песка разного размера, увеличение прочности формы и уменьшение количества фуранового связующего, применяемого при печати формы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. *Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия. Справочник*. Москва, Машиностроение, 2006, 507 с.
- [2] Хилков Д.Э. и др. Исследование прочности и газопроницаемости литейных форм и стержней из холоднотвердеющих смесей, методом послойного выращивания. *Заготовительное производства в машиностроении*, 2023, т. 21, № 6, с. 243–246.
- [3] Баженов В.Е., Плисецкая И.В., Санников А.В. и др. Исследование газотворности при термомодеструкции холодно-твердеющих формовочных смесей. *Литейное производство*, 2021, № 4, с. 5–11.
- [4] Неткачев А.Г., Бычковский Д.Н., Коротков А.Л. *Способ изготовления литейных форм сложной геометрии из песчано-полимерных систем*. Патент № 2707372 С1 РФ, 2019, бюл. № 33.
- [5] Mitra S. Experimental and numerical characterization of functional properties of sand molds produced by additive manufacturing (3D printing by jet binding) in a fast foundry. *ENSAM*, 2019, pp. 1–216.
- [6] Морозов Н.М., Хозин В.Г., Красиникова Н.М. Структурные особенности высокопрочных песчаных бетонов. *БСТ: Бюллетень строительной техники*, 2017, № 2 (990), с. 46–48.
- [7] Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити». *Строительные материалы*, 2006, № 10, с. 13–18.
- [8] Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона. *Известия КазГАСУ*, 2019, № 4 (50), с. 327–335.
- [9] Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. *Advanced Concrete Technology*, 2003, № 1, pp. 5–15.

A6

**Технологии
обработки давлением**

