

УДК 621.742.4

Различие газотворности смеси в технологиях 3D-печати и литья в песчаные формы

Узлов Михаил Геннадьевич

uzlov.m@mail.ru

Коротченко Андрей Юрьевич

korotchenko@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Выполнен анализ причин, обуславливающих 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). Осуществлено сравнение и установление отличий газотворности смеси для 3D-печати и ХТС процесса, выделены температурные этапы при термодеструкции и сопоставлены соответствующим химическим реакциям.

Ключевые слова: 3D-печать, газотворность, холодно-твердеющая смесь, связующее, прочность

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

Uzlov Mikhail Gennad'yevich

uzlov.m@mail.ru

Korotchenko Andrey Yur'yevich

korotchenko@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper analyzes the reasons for the increased consumption of binder (furane resin) during the production of molds using 3D printing compared to molds made from cold-hardening mixtures (a widely used technology in foundry production). The paper compares and establishes the differences in the gas production of the 3D printing and HTS mixtures, identifies the temperature stages of the mode composition, and compares them with the corresponding chemical reactions.

Keywords: 3D-printing, gas content, cold-hardening mixture, binder, strength

Введение. Технология 3D-печати песчаных форм, относящаяся к аддитивному производству, в основном применяется для изготовления отливок в единичном и мелкосерийном производстве. Для изготовления песчаных форм используются холодно-твердеющие смеси (ХТС), в состав которых входит: кварцевый песок, фурановая смола и катализатор. К особенности 3D-печати песчаных форм, по сравнению с формами из ХТС, изготовленных ручным или машинным способами, относится повышенный расход смолы, который влияет на газотворность песчаной формы (ГС) и может приводить к образованию дефектов экзогенного характера, например, таких как газовые дефекты.

Целью работы является анализ причин, обуславливающих повышенный расход связующего (фурановой смолы) при изготовлении форм методом 3D-печати по сравнению с ХТС процессом (классической технологией), а также сравнению и установлению отличий ГС смеси для 3D-печати и классического процесса, выделению температурных этапов при термодеструкции и сопоставлению соответствующим химическим реакциям.

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

Таблица 1

Различия в технологиях ХТС процесса и 3D-печати

Параметр	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

К причинам, приводящим к увеличенному расходу смолы, относится удельная поверхность песка. В табл. 2 приведены два значения удельной внешней поверхности песка для фракции 016 и 02 соответственно.

Таблица 2

Удельная внешняя поверхность песка группы 016 и 02

Материал	Внешняя $S_{уд} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{г}$
Песок группы 016	140
Песок группы 02	96

Адгезия реализуется на поверхности, которая на 3–5 % меньше общей. Сцепление между связующими и наполнителем формируется в адгезионно активных центрах поверхности при наличии смачивания за счет Ван-дер-Ваальсовых сил дисперсного или химического взаимодействия [2]. Чем больше удельная поверхность песка, тем больше активных центров, а значит требуется больше связующего, чтобы его содержание на единицу поверхности оставалось постоянным.

Также на расход связующего влияет число контактов, приходящихся на единицу объема N_v , которое зависит от размера и упаковки частиц. Увеличение плотности на 15–20 % приводит к росту N_v на 40–50 % и прочности ХТС в 1,5–2,0 раза. По мере уплотнения прочность растет быстрее, чем N_v ,

так как одновременно с более плотной упаковкой происходит деформация, «раздавливание» манжет и увеличивается площадь склейки [2]. Однако при 3D-печати не предусмотрено уплотнение формовочной смеси, что приводит к увеличению расхода связующего. В табл. 3 сведены данные [2] и затем проанализированы зависимости между важными факторами для смеси горячего отверждения с 2,5 масс. ч. фенол формальдегидной смолы для песков 1K02Б и 1K01Б.

Таблица 3

Зависимости между параметрами смеси горячего отверждения

№	Марка песка	Расход смолы масс. частей	Толщина пленки связующего δ , мкм	Средний диаметр частиц песка d_{cp} , мм	Удельная поверхность песка $S_{уд}$, $см^2/г$	Прочность при растяжении σ_p , МПа	Число контактов на единицу объема $N_v \cdot 10^{-5}$, $г/см^3$
1	1K02Б	2,5	2,3	0,19–0,23	88	~1,4	4,7
2	1K01Б	2,5	1,0	До 0,14	208	~0,7	37,8

Таким образом, при одинаковом содержании масс. частей смолы, измельчение зернового состава без изменения содержания связующего приводит к потере прочности и наоборот. Толщина пленки связующего уменьшается с уменьшением d_{cp} , в то время как количество контактов в единице объемакратно растет.

С увеличением количества связующего растет газотворная способность смеси, которая может привести к таким дефектам как газовая и ситовидная пористость в отливке. При высокотемпературном пиролизе фурановой смолы в анаэробных условиях, реакция которой изображена на рис. 1, продукты термического разложения включают такие летучие вещества как H_2O , CH_4 , CO_2 , CO , которые выделяются в интервале температур 250–450 °C [7].

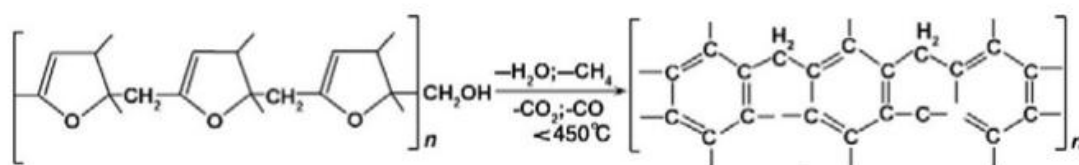


Рис. 1. Термический крекинг фурфуроловой смолы при температуре <450 °C
(– образование; + потребление)

В работе [5] выполнено термогравиметрическое исследование смеси для 3D-печати на промышленном принтере FHZL по фуран процессу, работающего по технологии струйной печати (Binderjetting), график исследования изображен на рис. 2. Выделено два пика, первый — область температур от 25 до 300 °C, в течение которого форма дополимеризуется. Смесь растворителя (фурфуролового спирта) и реакционной воды, образующейся в процессе по-

ликонденсации, испаряется при температуре 200 °С [7]. Вторым пик, диапазон температур которого лежит в интервале 250–550 °С, связан с термодеструкцией связующего [5], что характерно ростом убыли массы и согласуется с количеством типов образованных летучих веществ, представленных в реакции на рис. 1.

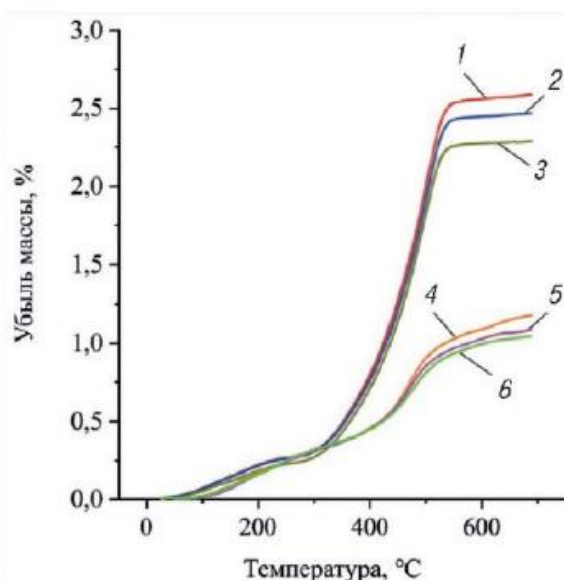


Рис. 2. Убыль массы при термогравиметрии образцов:

1–3 — метод 3D-печати (фуран-процесс); 1 — хранение в цехе 24 ч; 2 — 48 ч; 3 — 120 ч

При 550 °С процессы термодеструкции и испарения компонентов на фурановом связующем полностью завершаются, что согласуется с реакцией термического крекинга, изображенной на рис. 3, при температуре выше 450 °С с характерным уменьшением образования летучих компонентов [7]. После термической обработки при 1000 °С выход остаточного углерода составляет 60,5 % [8], реакция изображена на рис. 4.

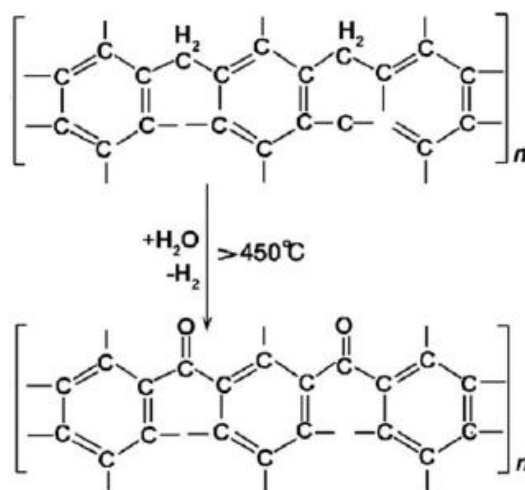


Рис. 3. Термический крекинг фуруриловой смолы при температуре >450 °С
(– образование; + потребление)

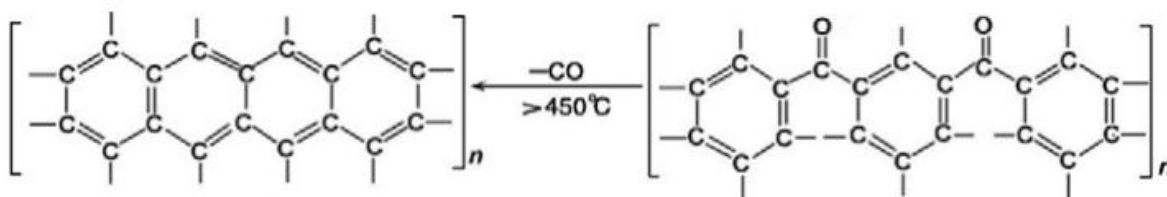


Рис. 4. Термический крекинг фурфуроловой смолы при температуре $>450\text{ }^{\circ}\text{C}$ последний этап (– образование; + потребление)

При литье в песчаные формы газовая и ситовидная пористость являются распространенными дефектами, которые могут привести к снижению прочности отливки. Выделение газа из песчаных форм и стержней является значительным фактором, влияющим на образование перечисленных дефектов. Изучение поведения выделения газа из формы и песчаных стержней имеет важное значение для решения этой проблемы. Таким образом, необходимо исследовать способность проникновения выделяющихся газов в расплав при термодеструкции песчаной формы, полученной методом 3D-печати.

Заключение. С ростом удельной поверхности песка увеличивается число активных центров, что способствует увеличению расхода смолы. Увеличение плотности приводит к росту числа контактов в единице объема и прочности, однако при 3D-печати уплотнение не применяется, что приводит к большему расходу фурановой смолы. Измельчение зернового состава без изменения содержания связующего приводит к потере прочности и наоборот. В дальнейшем будет проведено исследование с применением программного обеспечения Flow3D для оценки возможности проникновения газов при термодеструкции фуранового связующего в расплав.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. *Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия*. Москва, Машиностроение, 2006, 507 с.
- [2] Хилков Д.Э. 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 термодеструкции 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, бюл. № 33, 2019.
- [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 foundr. Thesis Doct. (Ph.D.), 2019, 216 p.
- [6] Жуковский С.С. *Прочность литейной формы*. Москва, Машиностроение, 1989, 288 с.
- [7] Wang X., Wu Q., Huang Y., Li N. Study on the Gas Release of 3D-Printed Furan Resin Sand Core during the Casting Process. *Material*, 2023, vol. 16 (11), pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma16114152>
- [8] Wang J., Jiang H., Jiang N. Study on the Pyrolysis of Phenol-Formaldehyde (PF) Resin and Modified PF Resin. *Thermochim. Acta*, 2009, no. 496, pp. 136–142.