

УДК 621.74

Применение новых огнеупорных наполнителей для 3D-печати литейных форм по технологии Inkjet

Рижский Андрей Андреевич^{(*)1}

andrew89.r.a@gmail.com

SPIN-код: 8026-7510

Баженов Вячеслав Евгеньевич¹

v.e.bazhenov@misis.ru

SPIN-код: 8961-4851

Базлова Татьяна Алексеевна¹

tbazlova@mail.ru

SPIN-код: 4403-6708

Анищенко Алексей Сергеевич²

a.anishchenko@icloud.com

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия² ООО Полимет, Тольятти, Россия

Аннотация. Изучено влияние применения различных огнеупорных материалов: кварцевого песка, хромита, пропант и алюмосиликатных полых микросфер (АСПМ) — при 3D-печати литейных форм по фуран-процессу на скорость охлаждения, формирование микроструктуры и механические свойства отливок из сплава АК7ч. Напечатаны литейные формы с применением исследуемых материалов с последующей заливкой сплавом АК7ч. Проведены механические испытания и металлографический анализ вырезанных из отливок образцов. Установлено, что формы на основе корунда и хромита обеспечивают интенсивный отвод тепла, способствуя формированию мелкозернистой структуры и повышению прочности сплава. В свою очередь, форма на основе АСПМ обладает выраженными теплоизоляционными свойствами.

Ключевые слова: технология Inkjet, 3D-печать литейных форм, огнеупорные наполнители, механические свойства, микроструктура, АК7ч

Implementation of new refractory sands for additive manufacturing of casting molds by Inkjet technology

Rizhsky Andrey Andreevich^{1(*)}

andrew89.r.a@gmail.com

SPIN-code: 2526-3083

Bazhenov Viacheslav Evgenievich¹

v.e.bazhenov@misis.ru

SPIN-code: 8961-4851

Bazlova Tatyana Alekseevna¹

tbazlova@mail.ru

SPIN-code: 4403-6708

Anishchenko Aleksey Sergeevich²

a.anishchenko@icloud.com

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia² LLC Polimet, Togliatti, Russia

Abstract. The study investigates the influence of various refractory materials — quartz sand, chromite, proppant, and aluminosilicate microspheres (ASM) — on the cooling rate, microstructure formation, and mechanical properties of A356 aluminum alloy castings

produced using 3D-printed molds via the furan process. Casting molds were printed using the selected refractory sands and subsequently filled with molten A356. Mechanical testing and metallographic analysis were performed on samples cut from the castings. It was established that molds printed with proppant and chromite provided enhanced heat extraction, promoting the formation of a fine-grained microstructure and improving the alloy's strength characteristics. In contrast, molds based on ASM demonstrated pronounced thermal insulation properties.

Keywords: inkjet technology, 3D-printed molds, refractory sands, mechanical properties, microstructure, A356

Введение. 3D-печать по технологии Binder Jetting получает все более широкое распространение в литейном производстве, так как позволяет получать готовые к заливке литейные формы практически любой конфигурации и сложности в сжатые сроки, благодаря исключению такого производственного этапа как проектирование и изготовление технологической оснастки [1]. Для 3D-печати литейных форм традиционно используется кварцевый песок, однако гибкость процесса печати позволяет потенциально использовать и другие огнеупорные наполнители с иными теплофизическими свойствами, применение которых позволит расширить разнообразие заливаемых в напечатанные литейные формы сплавов. Также появляется возможность создания комбинированных литейных форм, где отдельные элементы за счет разных теплофизических свойств позволяют создавать условия направленной кристаллизации в отливках.

Применение корунда в качестве огнеупорного наполнителя открывает возможность изготовления форм, предназначенных для заливки никелевых сплавов. Хромитовый песок благодаря высокой теплопроводности может использоваться в форме для создания условий с направленным и интенсивным отводом тепла [2]. Особый интерес для аддитивного производства литейных форм могут представлять ценосферы (или АСПМ — алюмосиликатные полые микросферы), отличающиеся низкой плотностью, хорошими теплоизоляционными свойствами и высокой температурой плавления (до 1600 °C). Эти микросферы имеют тонкостенную структуру (толщина оболочки 3,0–4,5 мкм) и заполнены воздухом или инертным газом [3].

Целью работы является исследование возможности применения хромитового песка, синтетического корундового песка (пропант) и алюмосиликатных полых микросфер (АСПМ) для получения форм методом 3D-печати по InkJet технологии и выявление преимуществ их использования в сравнении с традиционно применяемым в этой сфере материалом — кварцевым песком.

Материалы и методы. В качестве наполнителей были выбраны порошки пропанта CARBOACCUCAST марки ID50-K (70 % Al_2O_3 , 17 % SiO_2 ; CARBO Ceramic Inc., США), размер фракции 0,2 мм, алюмосиликатные полые микросферы марки ПМЛП-0,045 (76,5 % Al_2O_3 , 23,4 % SiO_2 ; ООО «Технокерамика», Россия), размер фракции 0,1 мм, хромита (FeCr_2O_4 , размер основной фракции 0,4 мм [4]) и кварца марки 1КО₂01 (Сибелко).

Литейные формы изготавливались методом 3D-печати с помощью песчано-полимерного принтера SP500 производства ООО «Аддитивные технологии» (Россия). В качестве связующего использовалась фурановая смола марки DF 900 с катализатором DFG 30A 900 (производитель Suzhou Xingye Materials Technology Co., Ltd, КНР).

Для оценки условий теплоотвода была разработана форма с толщиной стенок 40 мм для получения цилиндрических слитков диаметром 50 мм и высотой 160 мм. В качестве шихты при плавке использовался готовый сплав АК7ч. Плавка велась в графито-шамотном тигле в высокочастотной индукционной печи. Заливка проводилась при температуре 720 °С. Изменение температуры металла во времени фиксировалось многоканальным измерителем температуры BTM-4208SD (LUTRON, Тайвань) с помощью установленной в полость формы ХА-термопары.

В результате заливки напечатанных форм на основе пропанта, хромита, кварца и ценосфер были получены 4 цилиндрических слитка. После вырезки образцов для металлографического анализа слитки были термообработаны по режиму Т6: 540 °С в течение 9 часов с закалкой в воде с последующим старением при температуре 155 °С в течение 4 часов и охлаждением на воздухе. Из каждой отливки были выточены по 4 образца для механических испытаний на растяжение по ГОСТ 1487–94 (тип III, № 7) [5]. Измерение механических свойств проводилось с помощью универсальной испытательной машины Instron 5569. Также от донной части каждого слитка отпиливался темплет толщиной 15 мм для измерения твердости по Бринеллю (HB2,5/62,5 по ГОСТ 9012–59) [6] на универсальном твердомере NEMESIS. При исследовании микроструктуры с помощью оптической металлографии изучались размеры дендритной ячейки и включений кремния методом секущих с последующим сопоставлением со скоростью охлаждения. Для выявления микроструктуры использовался 1%-ный раствор фтороводородной кислоты в воде.

Обсуждение полученных результатов. На рис. 1, а изображены кривые изменения температуры во времени для сплава АК7ч, залитого в напечатанные формы из разных материалов. Как видно из графиков, формы на основе хромита и корунда отводят тепло от расплава интенсивнее, чем кварцевая форма, а алюмосиликатная форма обладает гораздо лучшими теплоизолирующими и теплоаккумулирующими свойствами.

Сплав АК7ч, полученный при литье в формы на основе пропанта, хромита и кварца, обладает пределом прочности 160, 150 и 128 МПа, соответственно. Для сплава, залитого в алюмосиликатную форму данный показатель составил 36 МПа. Твердость сплава по Бринеллю составила 55–60 ед., не показав существенных различий для разных форм (рис. 1, б).

Самые высокие скорости охлаждения расплава в интервале кристаллизации показали формы на основе корунда (0,33 К/с) и хромита (0,29 К/с). Размер дендритной ячейки в сплавах, залитых в корундовые и хромитовые формы составил 57–58 мкм, для форм на основе кварца этот показатель составил 73 мкм при скорости охлаждения 0,2 К/с. Скорость охлаждения расплава

в форме на основе АСПМ составила 0,07 К/с, размер дендритной ячейки оказался наибольшим — в среднем 102 мкм (рис. 2).

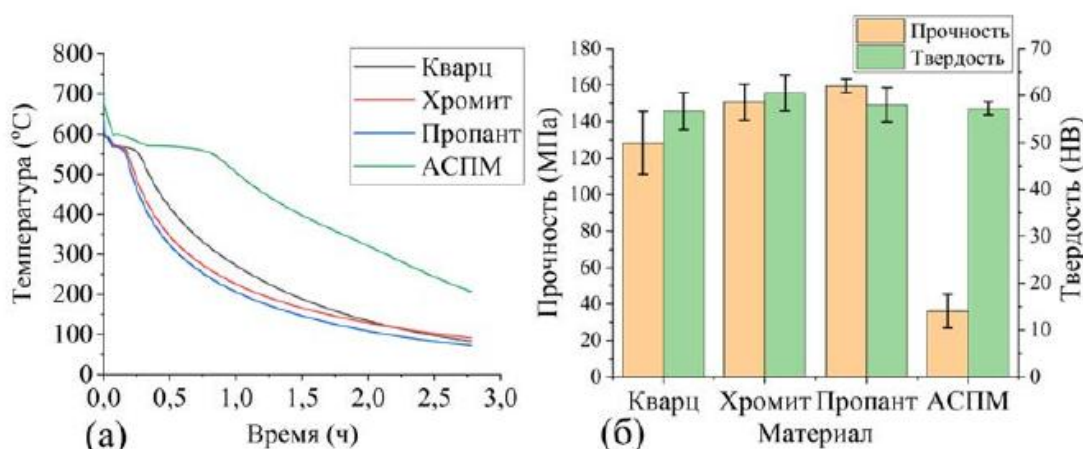


Рис. 1. а — кривые охлаждения сплава АК7ч в напечатанных формах; б — предел прочности на разрыв образцов из сплава АК7ч и твердость по Бринеллю при литье в напечатанные формы

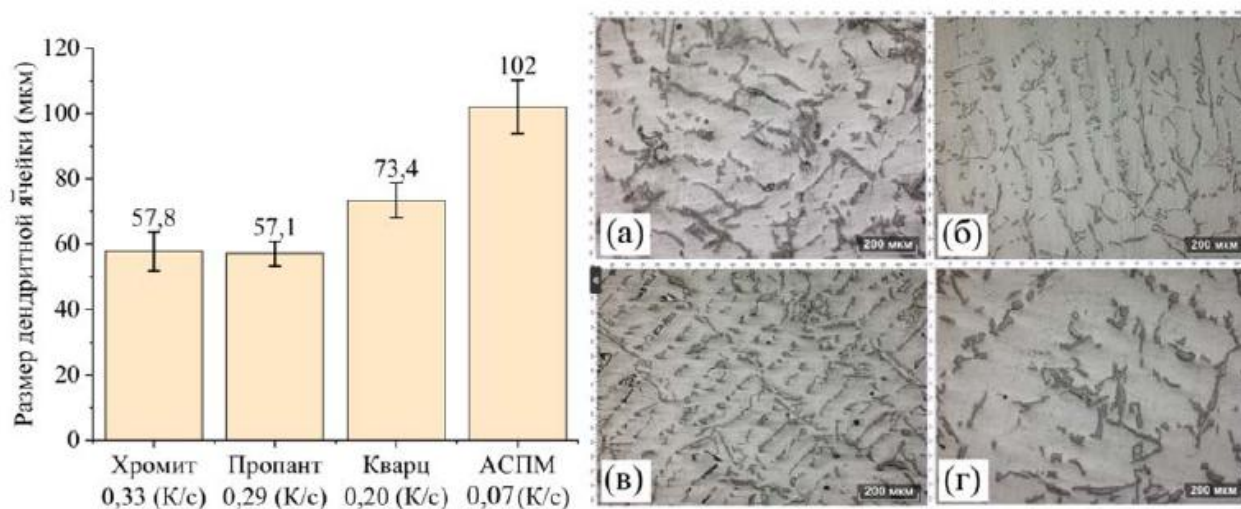


Рис. 2. Сопоставление скоростей охлаждения в интервале кристаллизации с размером дендритной ячейки и дисперсностью микроструктуры сплава АК7ч, полученного литьем в формы, напечатанные на основе (а) кварца, (б) пропанта, (в) хромита, (г) АСПМ

На рис. 3 представлено распределение размеров включений кремния в микроструктуре сплава АК7ч при литье в формы из разных огнеупорных материалов. При литье в пропантовые, хромитовые и кварцевые формы преобладающий размер частиц составляет 40–80 мкм. В микроструктуре сплава, полученного заливкой в форму, напечатанную из АСПМ, размеры частиц варьируются от 70 до 200 мкм.

Обсуждение полученных результатов. Самые высокие скорости охлаждения расплава в интервале кристаллизации показали формы на основе корунда и хромита. Следствием высоких скоростей охлаждения является получение более мелкодисперсной микроструктуры (см. рис. 2) и, как следствие, достигнуто повышение прочности сплава. На рис. 3 видно, что более мелкие

размеры частиц кремния в микроструктуре сплава АК7ч и ярко выраженные преобладающие диапазоны размеров достигаются при заливке в формы с наиболее высокими скоростями охлаждения (на основе хромита и пропанта). Для отливки, полученной в форме на основе АСПМ подобной картины не наблюдается — размеры частиц больше и нет явных преобладающих размеров.

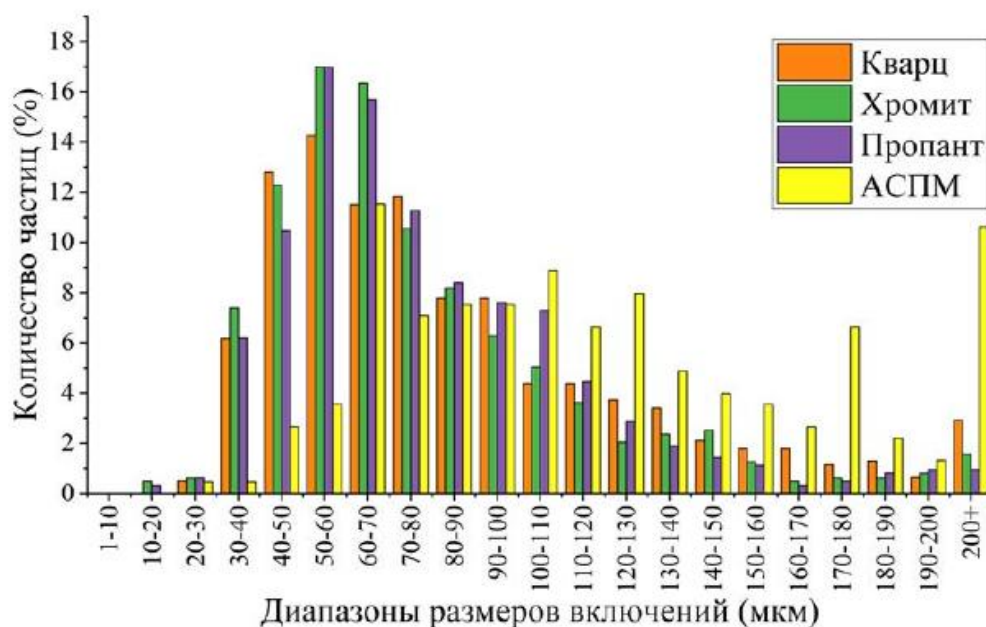


Рис. 3. Размеры включений кремния в микроструктуре сплава АК7ч при литье в формы на основе разных огнеупорных материалов

Закключение. Напечатанные на основе корунда и хромита литейные формы, обладают лучшей теплопроводностью, по сравнению кварцевыми. Алумосиликатные микросферы продемонстрировали хорошие теплоизолирующие свойства. Применение корунда и хромита при печати форм позволяет получить более высокие скорости охлаждения, что приводит к образованию более мелкодисперсной структуры в отливках, что способствует улучшению механических свойств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Upadhyay M., Sivarupan T., Mansori M.E. 3D printing for rapid sand casting — A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 29, pp. 211–220.
- [2] ООО Чжэнчжоуская компания абразивных материалов «Хайсюй». URL: <http://ru.hxabrasive.com/> (дата обращения 10.09.2021).
- [3] ООО «ЭнергоЗолотоРесурс». URL: http://зшм.рф/?page_id=391 (дата обращения 11.09.2021).
- [4] Рижский А.А., Баженов В.Е., Абдулазизов М.Б., Анищенко А.С. Исследование новых наполнительных материалов для 3D-печати литейных форм по inkjet технологии. *Литейное производство*, 2024, т. 3, с. 17–19.
- [5] ГОСТ 1497–2023. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Москва, Российский институт стандартизации, 2023, 54 с.
- [6] ГОСТ 9012–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю*. Москва, Стандартинформ, 2007, 40 с.