

УДК 621.74

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-5-14>

Научная статья

Research article



## Особенности изготовления отливок из алюминиевых сплавов по выжигаемым аддитивным FDM-моделям

М.С. Варфоломеев, И.А. Петров

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)  
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

✉ Максим Сергеевич Варфоломеев (varfolom2a@yandex.ru, varfolom2a@rambler.ru)

**Аннотация:** Приведены результаты исследований, направленные на совершенствование литейной технологии получения опытно-экспериментальных отливок из алюминиевых сплавов методом литья по выжигаемым моделям, изготовленным с применением 3D-печати. Для создания выжигаемых моделей использовали метод осаждения расплавленной нити (FDM – fused deposition modeling), а в качестве материала моделей был выбран биоразлагаемый материал – полилактид (PLA – polylactide). Установлено, что для уменьшения шероховатости выжигаемой PLA-модели необходимо проводить химическую постобработку ее поверхности дихлорметаном. В результате окунания модели в растворитель на 10 с она приобретает гладкую и глянцевую поверхность. Испытания механической прочности PLA-пластин на трехточечный статический изгиб показали, что данный показатель составляет в среднем ~ 45,1 МПа. Термомеханический анализ полилактида выявил, что в процессе нагрева керамической оболочки выше 150 °С полилактидная модель начинает интенсивно расширяться, оказывая существенное давление на керамическую оболочку. Для уменьшения напряжений в процессе удаления полилактидной модели из керамической формы необходимо максимально увеличить время нагрева в интервале температур 150–300 °С, а также целесообразно использовать пустотелые выжигаемые модели отливки со степенью заполнения ячеистой структуры не более 30 %. При этом напряжения в оболочке не будут превышать ее прочность. С помощью термогравиметрического анализа выявлены характерные температурные характеристики термодеструкции PLA-пластика. Установлено, что материал из полилактида полностью выгорает при нагреве до температуры 500 °С, не оставляя после себя остатков золы. Анализ результатов позволил определить технологические режимы выжигания полилактидных моделей из керамических форм. На принтере Picaso 3D Designer (Россия) были напечатаны PLA-модели, которые использовали для получения опытно-экспериментальных отливок из алюминиевых сплавов. Выявлено, что шероховатость поверхности ( $R_a$ ) отливки, полученной по выжигаемой модели, обработанной дихлорметаном, уменьшается на 81,75 % – с 13,7 до 2,5 мкм.

**Ключевые слова:** литье по выжигаемым моделям, полилактид, 3D-печать, метод осаждения расплавленной нити, алюминиевые сплавы, шероховатость поверхности.

**Для цитирования:** Варфоломеев М.С., Петров И.А. Особенности изготовления отливок из алюминиевых сплавов по выжигаемым аддитивным FDM-моделям. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(4):5–14. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-5-14>

## Consumable additive FDM models in the production of aluminum alloy castings

M.S. Varfolomeev, I.A. Petrov

Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia

✉ Maksim S. Varfolomeev (varfolom2a@yandex.ru, varfolom2a@rambler.ru)

**Abstract:** This article describes the results of a study aimed at improving production technology of experimental castings from aluminum alloys by investment casting using models produced by 3D printing. The consumable models were produced using fused deposition

modeling (FDM). Biodegradable polylactide (PLA) was used as a material for the models. In order to decrease the surface roughness of consumable PLA model, chemical post-treatment by dichloromethane needs to be performed. After immersion of the model into the solvent for 10s, its surface becomes smooth and glossy. Three-point static bending tests of PLA plates demonstrated a mechanical strength of average ~45.1 MPa. A thermomechanical analysis of polylactide demonstrated that in the course of heating of ceramic shell in excess of 150 °C, the polylactide model begins to expand intensively by exerting significant pressure on the ceramic shell. In order to decrease stress during the removal of polylactide model from ceramic mold, the heating time in the range of 150–300 °C needs to be heated to a maximum. The use of hollow consumable casting models with a cellular structure not higher than 30 % is also sensible. The stresses on the shell will not exceed its strength. Characteristic temperature properties of PLA plastic thermal destruction were detected using thermogravimetric analysis. Polylactide was established to completely burn out upon heating to 500 °C leaving no ash residue. Analysis of the results identified the burning modes of polylactide models from ceramic molds. Using a Picaso 3D Designer printer (Russia), the PLA models were printed used for production of experimental castings from aluminum alloys. It was revealed that the surface roughness ( $R_a$ ) of a casting produced using a consumable model treated by dichloromethane decreases by 81.75 %: from 13.7 to 2.5  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** investment casting, polylactide, 3D printing, fused deposition modeling (FDM), aluminum alloys, surface roughness.

**For citation:** Varfolomeev M.S., Petrov I.A. Consumable additive FDM models in the production of aluminum alloy castings. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(4):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-5-14>

## Введение

Литье по выплавляемым/выжигаемым моделям — это традиционная технология производства высокоточных изделий. С помощью этого метода литья можно получать детали сложнейшей формы с тонкими стенками и высокой чистотой поверхности. Качество литых изделий по выплавляемым/выжигаемым моделям заметно превосходит другие способы литья, поэтому этот метод применяется в различных областях.

Основная проблема при единичном и мелкосерийном производствах изделий — высокие затраты на изготовление оснастки. Для традиционного изготовления керамической формы необходимо использовать выплавляемую/выжигаемую модель, которую получают в пресс-формах. Этот производственный процесс изготовления пресс-формы очень сложен, а стоимость изготовления такой оснастки чрезвычайно высока. Решается данная проблема путем интеграции в литейное производство современных аддитивных методов 3D-печати [1; 2]. Это относительно новая производственная технология, которая стала интенсивно развиваться и применяться в различных областях, в том числе и в литейном производстве [3–5]. Прямое выращивание выжигаемых моделей не только рентабельно для мелкосерийного и опытного производств, но также способно создавать очень сложные геометрические формы, которые было бы чрезвычайно сложно или слишком дорого получать традиционным способом [6].

Процесс изготовления выжигаемой модели с помощью 3D-печати позволяет снизить стоимость и время изготовления отливки и получать изделия сложной геометрии по сравнению с обычным

процессом литья по выплавляемым/выжигаемым моделям [7–9]. Эти преимущества нивелируются ступенчатостью поверхности модели, связанной с особенностью 3D-печати, которая отрицательно влияет на шероховатость поверхности и допуски на размеры отливок.

На сегодня самым доступным и распространенным методом 3D-печати является технология послойного наплавления разогретой полимерной нити (FDM — fused deposition modeling) [10]. Этот метод заключается в послойном нанесении расплавленного полимера с помощью экструдера. По сравнению с другими аддитивными процессами изготовления выжигаемых моделей, такими как стереолитография (SLA — stereolithography) и цифровая светодиодная проекция (DLP — direct light processing), 3D-печать методом FDM является одним из наиболее дешевых благодаря низкой цене на оборудование и расходные материалы, что обеспечивает его более широкую доступность [11].

Основными материалами, используемыми в 3D-печати FDM-методом, являются термопластики: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) [12,13], полилактид (PLA) [13,14], полиамид (PA) [15], полиэтилентерефталат-гликоль (PETG) [16], полиэфирэфиркетон (PEEK) [17], поликарбонат (PC) [18] и др.

В качестве альтернативы полимерам на нефтяной основе (ABS, PA, PETG, PEEK, PC) широкое применение во многих отраслях промышленности нашел биоразлагаемый биополимер — полилактид (PLA) на основе крахмала и полимолочной кислоты, который изготавливается из полностью возобновляемых природных материалов.

Полилактид представляет собой полностью биоразлагаемый термопластичный полиэфир — полимер молочной кислоты, полученной в процессе переработки кукурузы, крахмала, целлюлозы, сахарного тростника. Нетоксичность материала позволяет проводить процесс печати даже в плохо проветриваемых помещениях. Продукты термодеструкции полилактида считаются безвредными, а его горение происходит довольно медленно. Благодаря своей экологичности, биосовместимости, биоразлагаемости, возобновляемости, высокой жесткости и прочности на растяжение, а также легкости обработки использование PLA в мире растет. В этой связи ряд авторов рассматривают возможность его применения для изготовления выжигаемых моделей [19–22].

Основной целью работы было изучение технологических возможностей применения 3D-печати для быстрого производства выжигаемых моделей из полилактида с последующим изготовлением опытно-экспериментальных литых изделий из алюминиевых сплавов.

## Материалы и методика исследований

Для изготовления выжигаемых моделей использовали метод осаждения расплавленной нити (FDM), в качестве материала моделей выбран полилактид (PLA). Катушка нити PLA диаметром 1,75 мм была предоставлена коммерческим производителем нитей для 3D-печати «Bestfilament» (Россия). Опытные экспериментальные выжигаемые модели отливок и модели для механических испытаний изготавливали на принтере Picaso 3D Designer X (Россия) со степенью заполнения ячеистой структуры 30 %. Использовали сопло принтера диаметром 0,5 мм. Толщина наносимого слоя составляла 0,2 мм. Температуры печати и платформы во время процесса поддерживались на уровне 200 °C и 75 °C соответственно. Скорость печати — 20 мм/с. Для полировки поверхности PLA-моделей применяли дихлорметан. Модели отливок окунали на 5, 10 и 15 с непосредственно в растворитель.

Механические испытания на трехточечный изгиб PLA-образцов размерами 40×20×5 мм проводили на машине Instron 5982 (США). Скорость перемещения траверсы составляла 1 мм/мин, расстояние между опорами — 30 мм, количество испытанных образцов — 10 шт.

Керамические формы изготавливали по традиционной технологии литья по выплавляемым

моделям путем послойного нанесения на модельный блок керамической суспензии, состоящей из этилсиликатного связующего ЭТС-40 и наполнителя (пылевидного кварца), с последующей обсыпкой каждого слоя зернистым кварцем фракцией 0,2 мм. Всего было нанесено 5 слоев.

Прокалку керамических опытно-экспериментальных форм осуществляли в опорном наполнителе в электропечи сопротивления при  $t = 900$  °C в атмосфере воздуха (длительность нагрева 5 ч) и выдержкой при этой температуре в течение 2 ч. Заливку керамических форм осуществляли алюминиевым сплавом АК7ч, химический состав которого следующий, мас. %: Al — основа, Si — 7,21, Mg — 0,36, Fe — 0,147, Cu — 0,011, Mn — 0,0026, что соответствует ГОСТ 1583-93.

Плавку сплава АК7ч массой 800 г проводили в муфельной электрической печи сопротивления СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ. Предварительно осуществляли дегазацию расплава с помощью его продувки инертным газом (аргоном).

Расплав модифицировали стандартным флюсом состава 25%NaF + 62,5%NaCl + 12,5%KCl при температуре 740–750 °C. На поверхность расплава его засыпали ровным слоем в количестве 1,5 % от массы плавки. После выдержки в течение 10 мин при данной температуре флюс тщательно замешивали вглубь расплава. Спустя 15 мин после выстаивания расплава производили его заливку при  $t = 710\div 720$  °C в подогретые до 350 °C прокаленные керамические формы.

Опытно-экспериментальные отливки из сплава АК7ч подвергали термообработке согласно ГОСТ 1583-93 по режиму T5 (закалка в воде при температуре  $535\pm 5$  °C в течение 4 ч, затем старение в течение 3 ч при  $415\pm 5$  °C).

Термогравиметрический (TGA) и дифференциальный термический (SDTA) анализы проводили на приборе TGA/SDTA 851 («Mettler Toledo», Швейцария) со скоростью нагрева 10 °C/мин до 1100 °C в атмосфере воздуха.

Термомеханический анализ (ТМА) пластика выполняли с использованием анализатора TMA/SDTA 840 («Mettler Toledo») в интервале  $t = 20\div 350$  °C.

Шероховатость ( $R_a$ ) поверхности отливок на участке размером 50×50 мкм анализировали с помощью оптического профилометра MicroXAM-100 («KLA-Tencor Corp.», США). Для оценки шероховатости поверхности изделий были отобраны по 2 отливки (с обработкой дихлорметаном и без нее), на каждом образце исследовали по 3 области — в

каждой по 4 измерения. Статистический анализ полученных результатов осуществляли с применением компьютерной программы Statistica 10.

### Результаты и их обсуждение

Основными направлениями работы были изучение возможности использования PLA-пластика в качестве материала для изготовления опытно-экспериментальных моделей в литье по выжигаемым моделям, а также определение температурных характеристик модельного материала.

Методами TGA и SDTA были исследованы термохимические превращения полилактида до 1100 °С, результаты которых представлены на рис. 1. Согласно кривой TGA при  $t = 30\div 300$  °С каких-либо изменений не зафиксировано и масса образца практически не изменилась (потеря составила всего 1,09 %).

Термогравиметрические исследования показали, что основная потеря массы вещества происходит при повышении температуры до 390 °С и составляет 96,98 %, при этом на кривой SDTA наблюдается экзотермический эффект. При  $t = 300\div 390$  °С происходит активная термодеструкция полимера (масса образца падает с 98,91 до 3,02 %). Полное выжигание полилактида происходит при  $t \sim 500$  °С, при этом он полностью вы-

горает, не оставляя после себя остатков золы. Дальнейший его нагрев до 1100 °С практически не вызывает никаких изменений. Масса образца уходит в минус. Связано это прежде всего с удалением остаточной влаги из пористого керамического тигля в результате нагрева до 1100 °С.

По результатам термогравиметрического исследования можно сделать вывод, что образцы из PLA-пластика при нагреве выше 500 °С обладают нулевой зольностью. Стоит отметить, что зольность (твердый остаток) выжигаемой модели при прокатке керамических форм — это очень важный параметр, который должен быть минимальным или полностью отсутствовать. Повышенная зольность приводит к образованию остатков золы после прокаливания в теле оболочки, снижающих качество получаемых в них литых изделий.

Изучение термодеструкции модельного материала позволило определить температурные и временные параметры процесса удаления (выжигания) полилактида из керамической формы: температура выжигания — более 500 °С, длительность — не менее 1 ч.

Стоит отметить, что основной причиной разрушения керамической формы при выжигании полимерной модели является различие коэффициентов расширения керамики и полилактида. Для установления термомеханических характе-

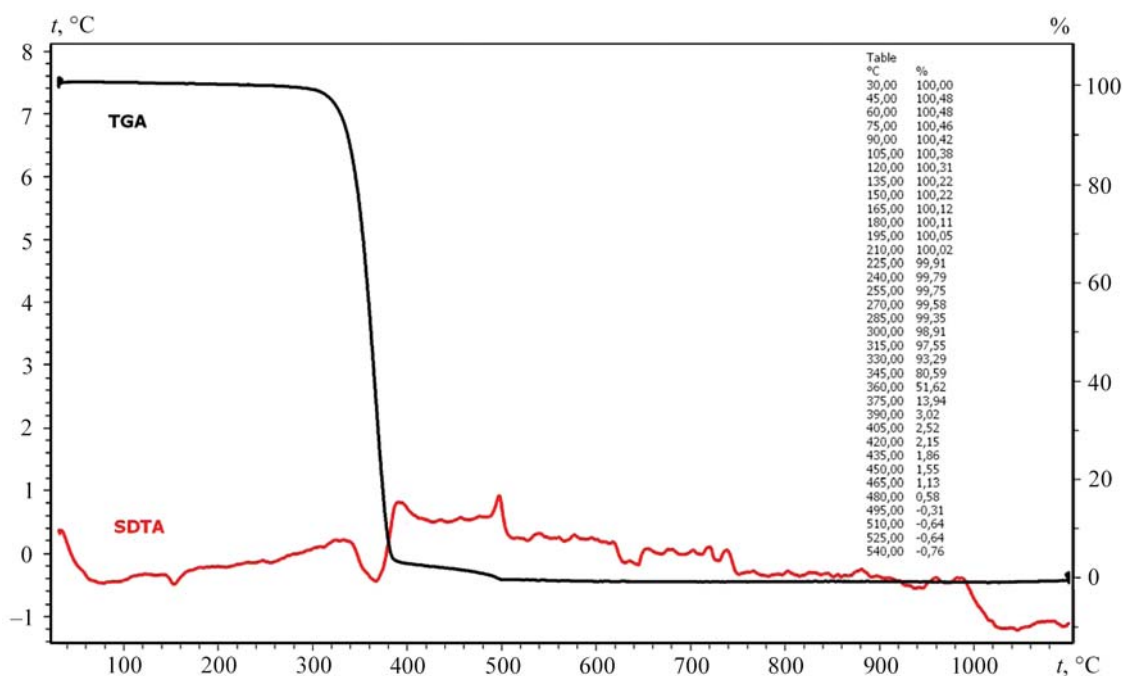


Рис. 1. Кривые TGA (черная) и SDTA (красная) полилактида

Fig. 1. TGA (black) and SDTA (red) curves of polylactide

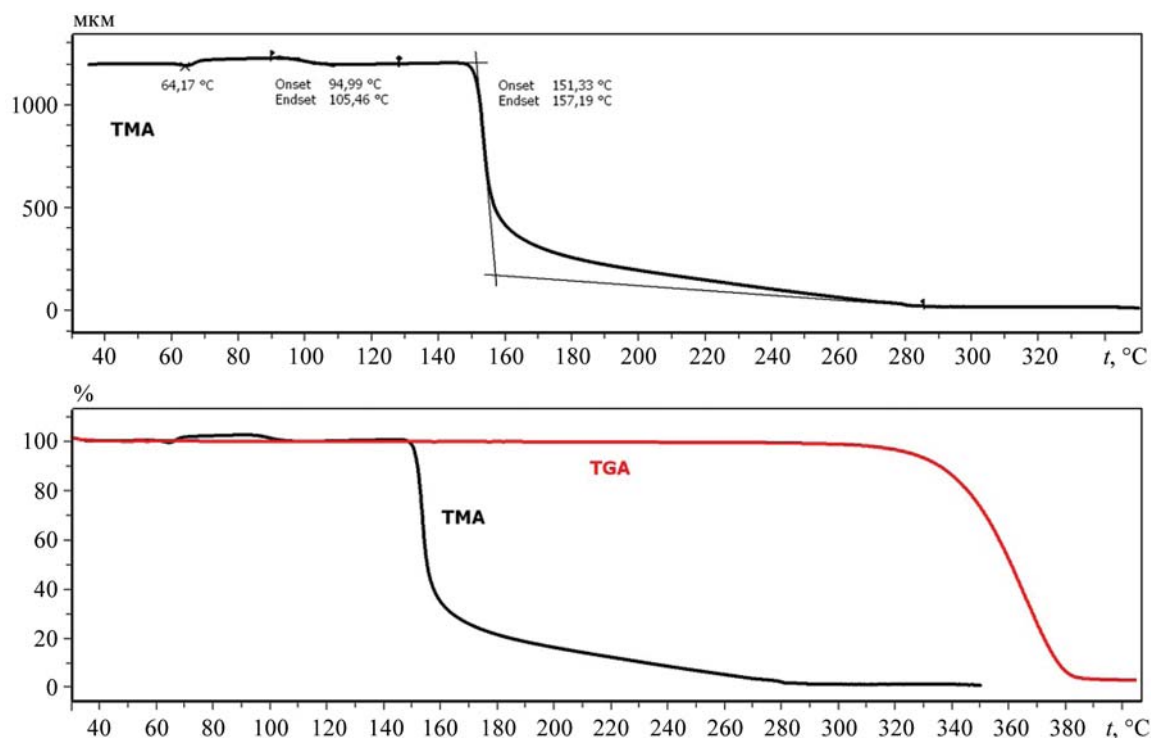


Рис. 2. Кривые TMA и TGA полилактида

Fig. 2. TMA and TGA curves of polylactide

ристик пластика был проведен TMA полилактида в интервале температур 20–350 °C (рис. 2). Как видно из представленных данных, в диапазоне  $t = 20\div 150$  °C каких-либо существенных изменений не зафиксировано. Активное расширение полилактида начинается при температуре выше 150 °C, что свидетельствует о начале плавления PLA-пластика.

В процессе нагрева керамической оболочки выше 150 °C полилактидная модель начинает интенсивно расширяться, оказывая существенное давление на керамическую оболочку. Поэтому для уменьшения напряжений в процессе удаления полилактидной модели из керамической формы необходимо максимально увеличить интервал времени нагрева в диапазоне  $t = 150\div 300$  °C, а также целесообразно использовать пустотелые выжигаемые модели отливки со степенью заполнения ячеистой структуры не более 30 %. При этом напряжения в оболочке не будут превышать ее прочность.

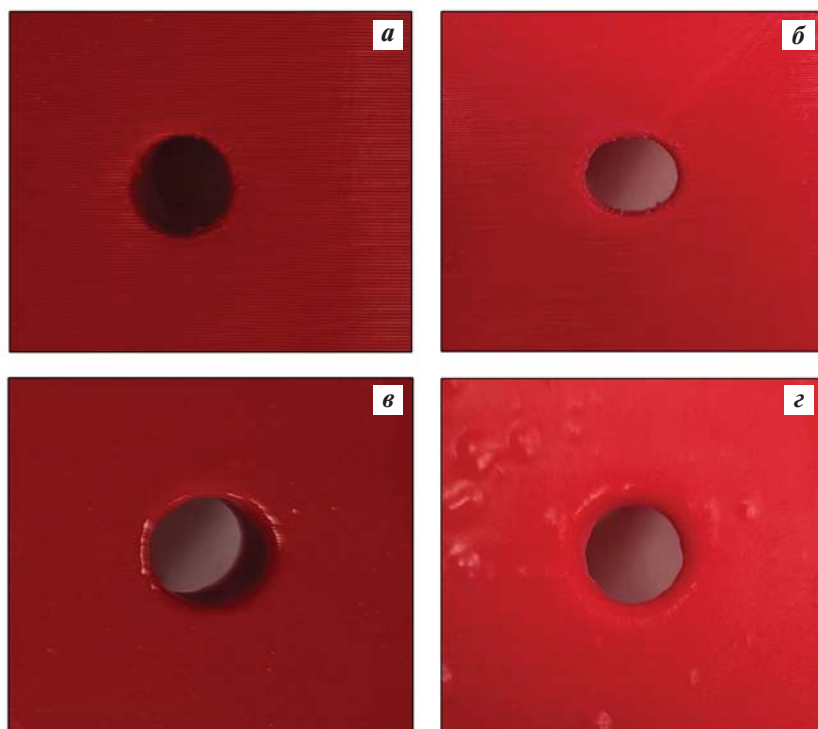
Применение технологии послойного наплавления полимерной нити для изготовления точных выжигаемых моделей ограничено ввиду высокой шероховатости поверхности и неточных размеров. Это связано с особенностями технологии их изготовления. При 3D-печати изделия в вертикальном

направлении на его поверхности образуется гофрированная структура (так называемый эффект лестницы) [23; 24].

Таким образом, для улучшения качества поверхности необходимы некоторые операции последующей постобработки [25–27]. В настоящее время для достижения гладкой поверхности изделий используют два основных подхода: химическое или механическое сглаживание [28–30]. Последний способ является малоэффективным при получении моделей со сложной геометрической поверхностью и развитой структурой. Химический метод сглаживания поверхности легколетучими растворителями является более эффективным.

В настоящей работе для уменьшения шероховатости поверхности выжигаемых моделей из PLA (рис. 3, а) использовали растворитель дихлорметан ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) [31]. Согласно проведенным исследованиям выдержка модели в дихлорметане в течение 10 с приводит к сглаживанию ее поверхности (рис. 3, в). При меньшей продолжительности выдержки в растворителе эффект лестницы частично сохраняется (рис. 3, б), а при большей — происходит вздутие поверхности модели (рис. 3, г).

Таким образом, благодаря такой простой, быстрой и экономичной химической обработке мо-

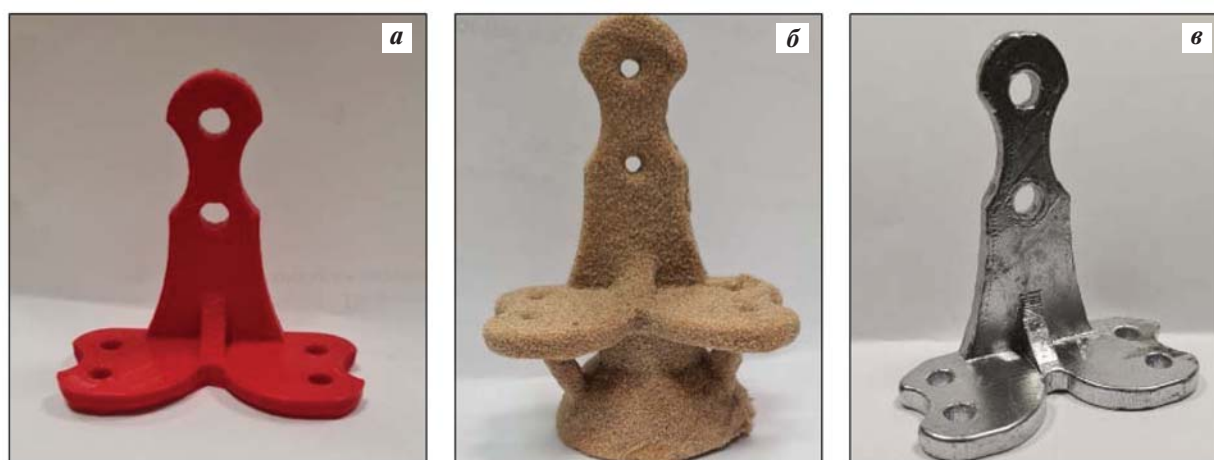


**Рис. 3.** Внешний вид поверхности выжигаемой PLA-модели

*a* – после 3D-печати; *б–г* – после обработки дихлорметаном в течение 5 с (*б*), 10 с (*в*) и 15 с (*г*)

**Fig. 3.** External view of surface of consumable PLA model

*a* – after 3D printing; *б–г* – after processing by dichloromethane for 5 s (*б*), 10 s (*в*) and 15 s (*г*)



**Рис. 4.** Опытная PLA-модель (*a*), она же с нанесенным слоем керамики (*б*) и готовая алюминиевая отливка (*в*)

**Fig. 4.** Experimental PLA model (*a*), applied ceramic layer (*б*), and final aluminum casting (*в*)

дель приобретает гладкую и глянцевую поверхность, что позволяет снизить затраты на рабочую силу и режущий инструмент.

Исследования механической прочности PLA-пластин на трехточечный статический изгиб показали, что данный показатель составляет в среднем ~45,1 МПа. Для литейных выжигаемых моделей это

является довольно высоким результатом. Соответственно, в процессе эксплуатации (к примеру, на участке нанесения суспензии или при транспортировке модельных блоков) вероятность их случайной поломки или образования вмятин довольно низкая.

По результатам проведенных исследований на принтере Picaso 3D Designer X («Picaso 3D», Рос-



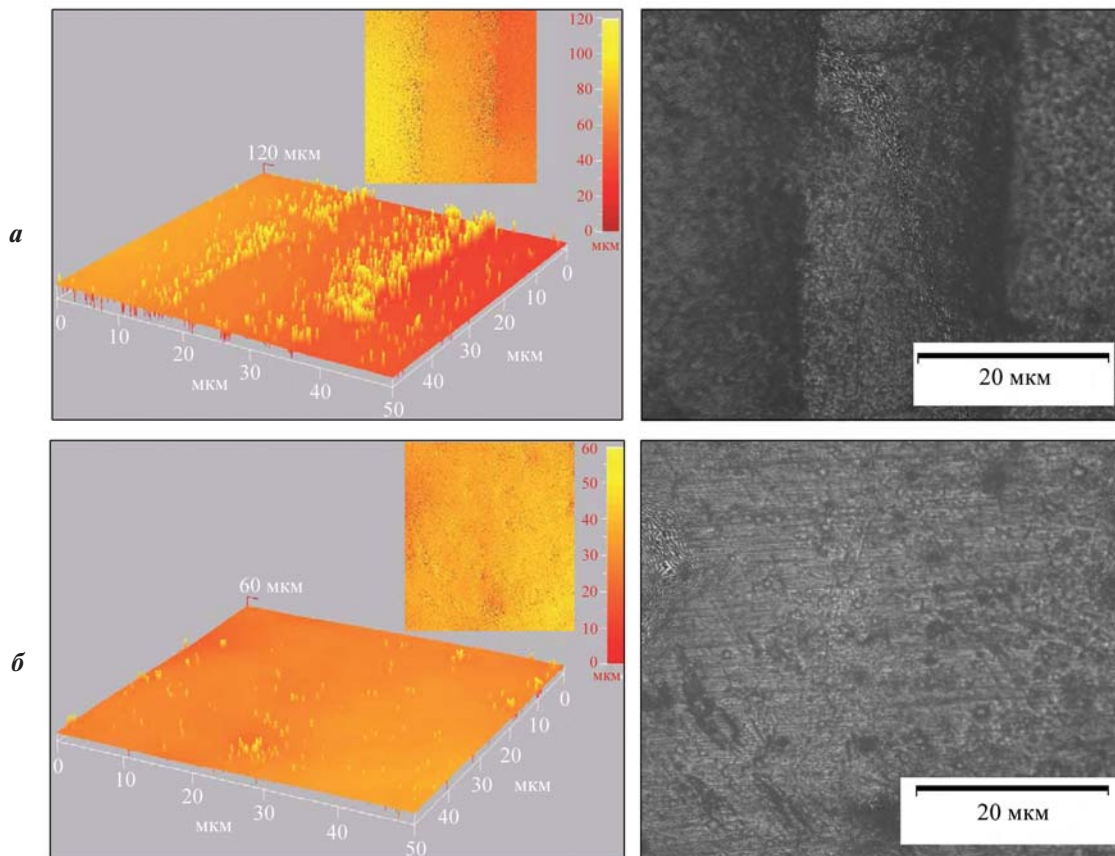
**Рис. 5.** Внешний вид отливки, полученной по выжигаемой необработанной модели (а) и после ее выдержки в дихлорметане (б)

**Fig. 5.** External view of casting produced using non-processed model (a) and after its holding in dichloromethane (b)

сия) были изготовлены опытно-экспериментальные модели из PLA-полимера (рис. 4, а). Для формирования керамической оболочки использовали кварцевую керамику на гидролизованном этилсиликатном связующем (рис. 4, б). На примере изготовления отливки типа «кронштейн» из сплава АК7ч показана возможность получения годных алюминиевых литых изделий (рис. 4, в).

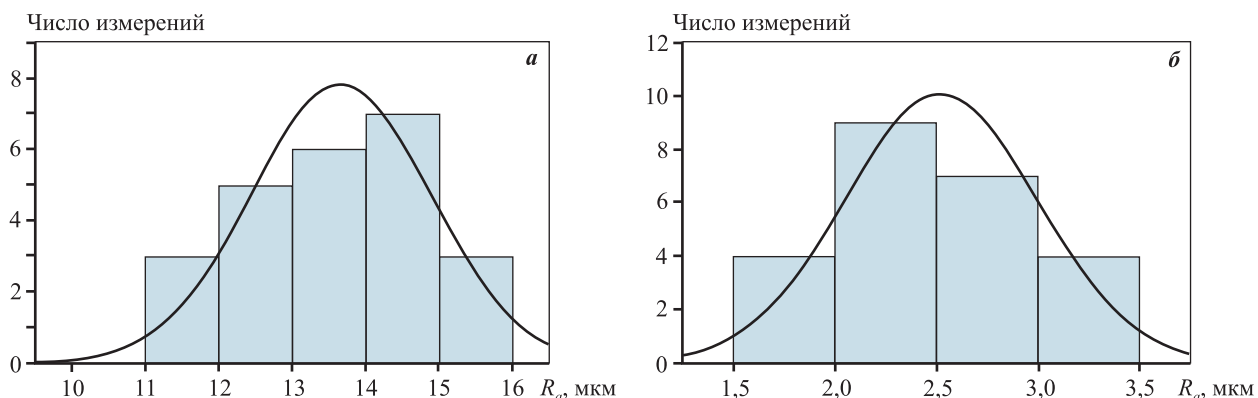
Сравнительный анализ поверхности опытных отливок показал, что благодаря химической обработке выжигаемой модели дихлорметаном литое изделие приобретает гладкую поверхность (рис. 5).

Для оценки качества поверхности отливок с помощью лазерного оптического профилометра измеряли их шероховатость и сравнивали между собой. На рис. 6 представлены микрофотографии, а также 2D- и 3D-рельеф поверхности отливок. Изображения отливок выполнены в одинаковом масштабе. Замеры их шероховатости ( $R_a$ ) осуществлялись в нескольких местах, указанных на рис. 5.



**Рис. 6.** Микрофотографии 2D- (справа) и 3D-изображения (слева) поверхности отливок, полученных по выжигаемым PLA-моделям, без обработки (а) и после выдержки в дихлорметане (б)

**Fig. 6.** Micro images 2D (on the right) and 3D (on the left), of surface of castings produced using consumable PLA models, without processing (a) and after holding in dichloromethane (b)



**Рис. 7.** Гистограммы распределения значений шероховатости ( $R_a$ ) поверхности отливки, полученной по необработанной модели (а) и после ее обработки дихлорметаном (б)

**Fig. 7.** Distribution histograms of surface roughness ( $R_a$ ) of casting produced using non-processed model (а) and after its processing by dichloromethane (б)

Как показано на рис. 6, шероховатость образцов значительно снизилась за счет использования химической постобработки выжигаемых моделей парами дихлорметана. На изображениях поверхности отливок, полученных по выжигаемым PLA-моделям и обработанным дихлорметаном, линии поверхности между соседними слоями отсутствуют (см. рис. 6, б). Наблюдается заметное уменьшение шероховатости и исключается эффект лестницы.

Значения шероховатости поверхности отливок, полученных по моделям до и после химической обработки, приведены рис. 7. Проверка нормальности распределения количественных показателей Колмогорова—Смирнова и Шапиро—Уилка показала адекватные результаты. Средние значения  $R_a$  уменьшаются с 13,7 до 2,5 мкм. У отливки, полученной по обработанной дихлорметаном выжигаемой модели, величина  $R_a$  составляет от 1,8 до 3,5 мкм, т.е. качество поверхности значительно улучшилось — шероховатость уменьшилась на 81,75 %.

## Заключение

Настоящая исследовательская работа посвящена изучению технологических параметров применения 3D-печати для быстрого производства выжигаемых моделей из PLA-пластика с последующим изготовлением опытно-экспериментальных литых изделий из алюминиевых сплавов. Исследованы механические свойства и зольность выжигаемых образцов из полилактида, проведены термомеханический и термогравиметрический

анализы полимера, по результатам которых сделаны следующие основные выводы.

1. Прочность на статический изгиб напечатанных на 3D-принтере выжигаемых PLA-моделей составила ~45,1 МПа.

2. С помощью термогравиметрического анализа выявлены температурные характеристики термодеструкции PLA-полимера. Установлено, что материал из полилактида полностью выгорает при нагреве до температуры 500 °С, не оставляя после себя остатков золы.

3. В процессе нагрева керамической оболочки выше 150 °С полилактидная модель начинает интенсивно расширяться. С целью уменьшения напряжений в процессе ее выжигания необходимо максимально увеличить время нагрева в интервале температур 150—300 °С, а также целесообразно использовать пустотелые выжигаемые модели со степенью заполнения ячеистой структуры не более 30 %. При этом напряжения в оболочке не будут превышать ее прочность.

4. Для уменьшения шероховатости поверхности выжигаемых PLA-моделей необходимо использовать химическую постобработку. Лучшим растворителем для сглаживания слоев поверхности моделей является дихлорметан. В результате окунания модели в растворитель на 10 с модель приобретает гладкую и глянцевую поверхность.

5. Полученные результаты исследований технологических параметров были использованы и опробованы в лабораторных условиях, что позволило получить годные опытно-экспериментальные отливки типа «кронштейн» из алюминиевых



сплавов. Обнаружено, что у отливок, изготовленных с использованием выжигаемых моделей, обработанных дихлорметаном, достигается уменьшение шероховатости  $R_a$  с 13,7 до 2,5 мкм и исключается эффект лестницы.

## Список литературы/References

- Rosochowski A., Matuszak A. Rapid tooling: The state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;106(1-3):191–198. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00613-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00613-0)
- Harun W. S. W., Safian S., Idris M. H. Evaluation of ABS patterns produced from FDM for investment casting process. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2009;64(3):319–328. <https://doi.org/10.2495/MC090301>
- Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., Violante M. 3D Printing technique applied to rapid casting. *Rapid Prototyping Journal*. 2007;13(3):148–155. <https://doi.org/10.1108/13552540710750898>
- Choe C.M., Yang W.C., Kim U.H., Ri B.G., Om M.S. Manufacture of centrifugal compressor impeller using FDM and investment casting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;118:173–181. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07894-7>
- Gao M., Li L., Wang Q., Ma Z., Li X., Liu Z. Integration of additive manufacturing in casting: Advances, challenges, and prospects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2022;9:305–322. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00323-w>
- Kumar P., Ahuja I.P.S., Singh R. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting. A review. *International Journal of Materials Engineering Innovation*. 2012;3(3–4):204–227. <https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2012.049254>
- Kumar P., Singh R., Ahuja I.P.S. Investigations for mechanical properties of hybrid investment casting: A case study. *Materials Science Forum*. 2015;808:89–95. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.808.89>
- Kumar P, Singh R, Ahuja I.P.S. A framework for developing a hybrid investment casting process. *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2013;2(2):49–55. <https://doi.org/10.51983/arme-2013.2.2.2346>
- Badanova N., Perveen A., Talamona D. Concise review on pattern making process in rapid investment casting: Technology, materials & numerical modelling aspect. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022;8:966–978. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1959113>
- Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(1):176–201. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>
- Bakar N.S.A., Alkahari M.R., Boejang H. Analysis on fused deposition modelling performance. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2010;11(12):972–977. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1001365>
- Raney K., Lani E., Kalla D.K. Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4:7956–7961. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.132>
- Milde J., Hrušecký R., Zaujec R., Morovic L., Görög A. Research of ABS and PLA materials in the process of fused deposition modeling method. In: *28<sup>th</sup> DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Vienna, Austria, 2017. Vol. 28. P. 812–820. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.114>
- Hanon M.M., Marczis R., Zsidai L. Influence of the 3D printing process settings on tensile strength of PLA and HT-PLA. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2020; 65(1): 38–46. <https://doi.org/10.3311/PPme.13683>
- Knoop F., Schoeppner V. Mechanical and thermal properties of FDM parts manufactured with Polyamide 12. In: *26<sup>th</sup> Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin, 2015. P. 935–948.
- Szykiedans K., Credo W., Osiński D. Selected mechanical properties of PETG 3-D prints. *Procedia Engineering*. 2017;177:455–461. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.245>
- Xiaoyong S., Liangcheng C., Honglin M., Peng G., Zhanwei B., Cheng L. Experimental analysis of high temperature PEEK materials on 3D printing test. In: *9<sup>th</sup> International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)* (14–15 Jan. 2017). Changsha, China, 2017. P. 13–16. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2017.0012>
- Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J.M., Garcia-Granada A.A., Llumà J., Borros S., Reyes G. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts. *Materials & Design*. 2015;83:670–677. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- Nguyen T.T., Tran V.T., Pham T.H.N., Nguyen V.-T., Thanh N.C., Thi H.M.N., Duy N.V.A., Thanh D.N., Nguyen V.T.T. Influences of material selection, infill ratio, and layer height in the 3D printing cavity process on the surface roughness of printed patterns and casted products in investment casting. *Micromachines*. 2023;14:395. <https://doi.org/10.3390/mi14020395>
- Gallien F., Gass V., Mortensen A. Investment casting of periodic aluminum cellular structures using slurry-cast table salt moulds. *Materials & Design*. 2022;215:110488. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110488>
- Ukey K., Hiremath S., Majumder H. Investigation of investment casting pattern using fused deposition modeling. *Engineering Science & Technology*. 2021;2:201–207. <https://doi.org/10.37256/est.222021904>
- Никитин К.В., Тукабайов Б.Н., Дьячков В.Н., Никитин В.И., Деев В.Б., Баринов А.Ю. Совершенствование процесса литья в керамические формы за счет применения аддитивных технологий при изготов-

- лении модельных комплектов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021;27(5):58–66.  
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-5-58-66>
- Nikitin K.V., Tukabayov B.N., D'yachkov V.N., Nikitin V.I., Deev V.B., Barinov A.Y. Improving the casting process in ceramic forms using additive technologies in manufacturing model kits. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(6):675–681.  
<https://doi.org/10.3103/S106782122106016X>
23. Alsoufi M.S., Abdulrhman E.E. How surface roughness performance of printed parts manufactured by desktop FDM 3D printer with PLA+ Is influenced by measuring direction. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2017;5(5):211–23.  
<https://doi.org/10.12691/ajme-5-5-4>
24. Caputo M., Rashwan O., Waryoba D., McDade K. Surface texture and thermo-mechanical properties of material extruded and ironed polylactic acid. *Additive Manufacturing*. 2022;59:103084.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103084>
25. Kumar P., Ahuja I.S., Singh, R. Effect of process parameters on surface roughness of hybrid investment casting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2016;1:45–53.  
<https://doi.org/10.1007/s40964-016-0004-9>
26. Taşcıoğlu E., Kitay Ö., Keskin A.Ö., Kaynak Y. Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022;44(139).  
<https://doi.org/10.1007/s40430-022-03429-7>
27. Garg P.K., Singh R., Ahuja I., Multi-objective optimization of dimensional accuracy, surface roughness and hardness of hybrid investment cast components. *Rapid Prototyping Journal*. 2017;23(5):845–857.  
<https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2015-0149>
28. Panda S.S., Chabra R., Kapil S., Patel V. Chemical vapour treatment for enhancing the surface finish of PLA object produced by fused deposition method using the Taguchi optimization method. *SN Applied Sciences*. 2020; 2(916):1–13. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2740-1>
29. Tiwary V.K., Arunkumar P., Deshpande A.S., Rangaswamy N. Surface enhancement of FDM patterns to be used in rapid investment casting for making medical implants. *Rapid Prototyping Journal*. 2019;25(5):904–914.  
<https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0176>
30. Hashmi A.W., Mali H.S., Meena A. A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2022;29(3):504–557.  
<https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0133>
31. Jin Y., Wan Y., Liu Z. Surface polish of PLA parts in FDM using dichloromethane vapour. In: *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2016)* (MATEC Web of Conferences). 2016. Vol. 95. P. 05001.  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/20179505001>

## Информация об авторах

**Максим Сергеевич Варфоломеев** – к.т.н., доцент кафедры 1101, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ)).

<http://orcid.org/0000-0003-2164-6428>

E-mail: varfolom2a@yandex.ru, varfolom2a@rambler.ru

**Игорь Алексеевич Петров** – к.т.н., доцент кафедры 1101, МАИ (НИУ).

<http://orcid.org/0000-0001-6393-1900>

E-mail: petrovia2@mai.ru

## Information about the authors

**Maksim S. Varfolomeev** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department 1101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)).

<http://orcid.org/0000-0003-2164-6428>

E-mail: varfolom2a@yandex.ru, varfolom2a@rambler.ru

**Igor' A. Petrov** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department 1101, MAI (NRU).

<http://orcid.org/0000-0001-6393-1900>

E-mail: petrovia2@mai.ru

## Вклад авторов

**М.С. Варфоломеев** – определение цели работы, проведение экспериментов, написание текста статьи.

**И.А. Петров** – испытания образцов на прочность, измерение шероховатости поверхности, участие в обсуждении результатов.

## Contribution of the authors

**M.S. Varfolomeev** – determined the research objectives, conducted experiments, wrote the manuscript.

**I.A. Petrov** – tested the samples for strength, measured the surface roughness, participated in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 21.03.2023, доработана 23.05.2023, подписана в печать 25.05.2023

The article was submitted 21.03.2023, revised 23.05.2023, accepted for publication 25.05.2023