

**Ключевые слова:**

восковка, выплавляемая мастер-модель, технология ЛВМ, аддитивная технология FFF, воскоподобный пластик для 3D-печати, рентабельность, регрессионная модель

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ FFF ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЛВМ

Валерия ДИКАРЕВА, Павел ПЕТРОВ, Елена ЖИХАРЕВА, Руслан МОЛЧАНОВ

Представлена расширенная оценка экономической целесообразности применения аддитивной технологии FFF для 3D-печати выплавляемых моделей из воскоподобного пластика. Предложена регрессионная модель расчета стоимости изготовления, учитывающая сложность детали и ее объем.

ВВЕДЕНИЕ

По результатам оценки экономической эффективности FFF-печати (Fused Filament Fabrication) при производстве восковых мастер-моделей на основе детали «Крышка картера» была получена регрессионная модель расчета стоимости изготовления данного изделия по технологии ЛВМ (литье по выплавляемым моделям), которая показывает рентабельность применения FFF-печати при программе выпуска не более 199 шт. [1]:

$$C_{1\text{шт.}} = 36732 \times \text{ПВ}^{-0,751}, \quad (1)$$

где $C_{1\text{шт.}}$ – стоимость изготовления 1 шт. без НДС, руб.; ПВ – программа выпуска, шт.

Целью данной работы стала проверка работоспособности полученной регрессионной модели (1), позволяющей оценить экономическую эффективность изготовления по технологии ЛВМ изделия в условиях штучного либо мелкосерийного производства с применением аддитивной технологии FFF/FDM (Fused Deposition Modelling), используемой для изготовления восковки из воскоподобного пластика.

Также актуальным является повышение точности модели с учетом более широкой статистической выборки на примере изготовления компонентов транспортных средств, а также компо-

нентов насосов и компрессоров. Для этого рассмотрены пять машиностроительных деталей со сложной геометрией, осесимметричной либо удлиненной формы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

- выбор номенклатуры деталей;
- выбор технологии для сравнения;
- выбор программы выпуска.

Рассмотрим детали изделия машиностроительного назначения – компоненты транспортных средств, насосов и компрессоров. Будем ориентироваться на детали с объемом не более 200 см^3 , изготавливаемые из алюминиевых сплавов по технологии ЛВМ. В качестве исходных данных для проведения маркетингового исследования и последующего расчета примем, что программа выпуска равна 5, 50 и 500 шт., что является характерным для индивидуального либо опытного производства. При сборе данных для выполнения расчета по формуле (1) рассматриваем следующие возможные технологии изготовления машиностроительных деталей:

- технология ЛВМ с применением двухместной или одноместной разъемной пресс-формы для изготовления восковок [1];

Таблица 1. Основные характеристики воскоподобного пластика WAX3D [2, 3]

Торговая марка	Плотность, г/см ³	Температура экструдера, °С	Температура стола, °С	Скорость печати, мм/с	Стоимость катушки весом 2 кг, руб.
WAX3D	0,98	90-150	110	До 130	5000

→ технология ЛВМ с применением мастер-модели, изготовленной из воскоподобного пластика WAX3D [2, 3] по технологии FFF.

Воскоподобный пластик WAX3D изготавливается с 2018 года компанией Filamentarno!, его характеристики приведены в табл. 1.

МАРКЕТИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для выполнения маркетингового исследования были выбраны изделия, представленные в табл. 2.

Маркетинговое исследование рынка литейного производства выполнено с учетом следующих условий: опрашивались только компании, работающие на рынке штучного и мелкосерийного производства изделий из алюминиевых сплавов в Московской, Тульской и Свердловской областях; имеющие полный цикл производства для реализации технологии ЛВМ с применением двухместной или одноместной разъемной пресс-формы для изготовления восковок.

Альтернативная технология – технология ЛВМ с применением мастер-модели, изготовленной из воскоподобного пластика WAX3D по технологии FFF. Принимается, что стоимость 3D-печатных восковок из пластика WAX3D определялась исходя из нормы 25 руб./см³ без учета НДС. Результаты исследования представлены на рис. 1–6.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На рис. 1 представлена средняя стоимость штучного изготовления выбранных деталей. При штучном производстве всех деталей технология ЛВМ в сочетании с технологией FFF, применяемой для изготовления восковки из воскоподобного пластика WAX3D, позволяет получить требуемое изделие с минимальной стоимостью. Не требуется перестройка традиционного цикла ЛВМ, а качество отливок не ухудшается. При использовании восковых мастер-моделей, изготовленных с применением двухместной или одноместной разъемной пресс-формы, стоимость изделия, получаемого по технологии ЛВМ, увеличивается на один-два порядка. Таким образом, качественно формула (1) подтверждается и в случае с изделиями различных габаритных размеров. При штучном изготовлении, например, макетного/опытного/экспериментального образцов в рамках научно-исследовательских работ с целью принятия решения о возможности постановки на производство

Таблица 2. Детали для маркетингового исследования

<p>Деталь «Шатун» материал – алюминиевый сплав марки АК4-1 либо АД35 (ГОСТ 4784-2019) или их литейный аналог (ГОСТ 1583-93; габаритные размеры детали (длина × ширина × высота) – 201,0 × 81,0 × 26,0 мм; объем детали по 3D-модели – 149,0863 см³</p>	
<p>Деталь «Кронштейн» материал – алюминиевый сплав марки АК12пч (ГОСТ 1583-93); габаритные размеры детали (длина × ширина × высота) – 86,0 × 62,5 × 98,4 мм; объем детали по 3D-модели – 81,459 см³</p>	
<p>«Кронштейн малый» материал – алюминиевый сплав марки АК9ч(АЛ4) (ГОСТ 1583-93; габаритные размеры детали (длина × ширина × высота) – 30,0 × 34,5 × 14,0 мм; объем детали по 3D-модели – 4,254 см³</p>	
<p>Деталь «Крышка задняя» материал – алюминиевый сплав марки АК12пч (ГОСТ 1583-93); габаритные размеры детали (длина × ширина × высота) – 83,3 × 51,1 × 57,0 мм; объем детали по 3D-модели – 48,514 см³</p>	
<p>Деталь «Поршень» материал – алюминиевый сплав марки АК12(АЛ2) (ГОСТ 1583-93; габаритные размеры 3D-модели детали (длина × ширина × высота) – 82,0 × 82,0 × 60,0 мм; объем детали по 3D-модели – 133,0137 см³</p>	

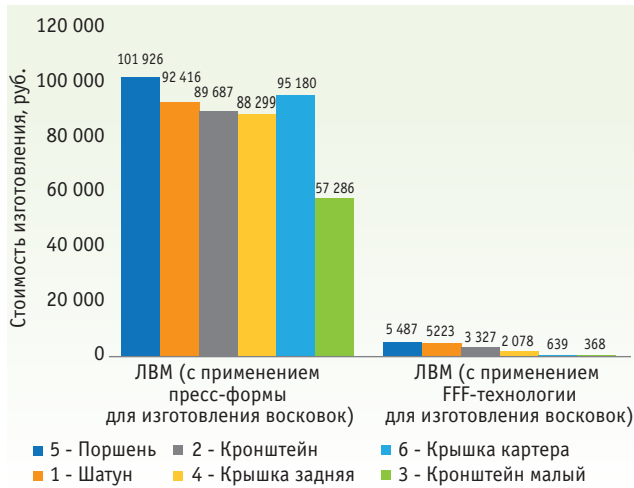


Рис. 1. Средняя стоимость штучного изготовления различных деталей без НДС, руб.

и использования по назначению, интеграция технологии FFF-печати в традиционный цикл ЛВМ производства оказывается наиболее экономически эффективным решением.

При увеличении партии изделий до 50 шт. обнаруживается изменение выявленной ранее тенденции (рис. 2). Для деталей 1, 2 и 5 экономически выгоднее их изготовление с применением восковок, полученных в пресс-форме, нежели чем изготовление с применением FFF-печати. Исследуемые детали расположены на графике в порядке уменьшения их массы и объема.

При рассмотрении зависимости стоимости производства изделий с применением восковки, изготовленной на FFF-принтере, от массы изделия (рис. 3) было обнаружено, что стоимость печати

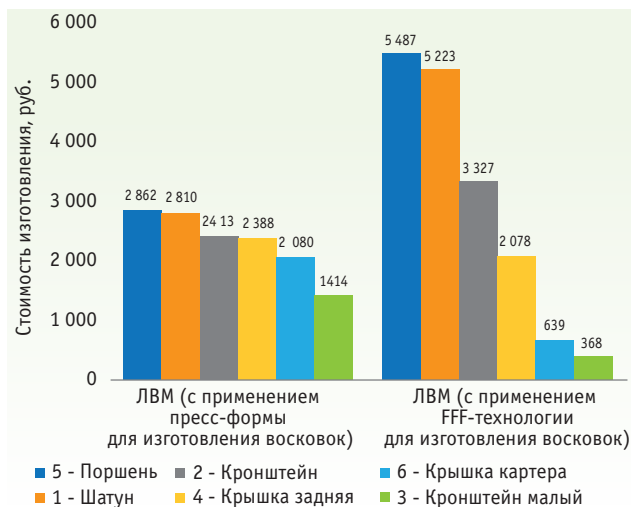


Рис. 2. Средняя стоимость изготовления 1 шт. различных деталей при партии 50 шт. без НДС, руб.

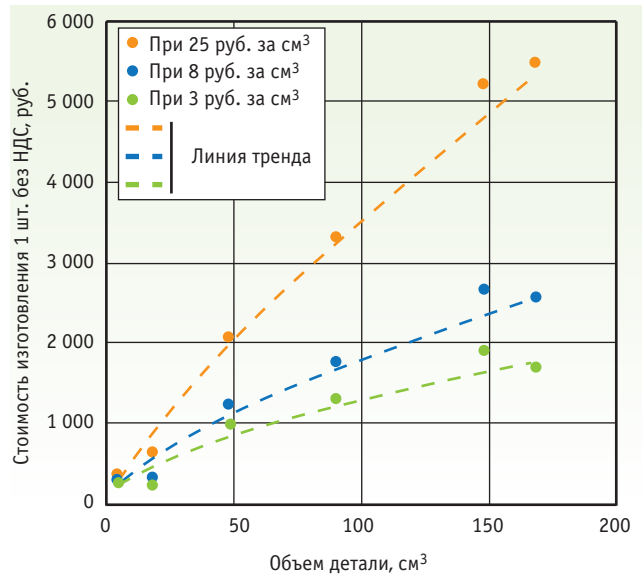


Рис. 3. Зависимость стоимости изготовления деталей (ЛВМ + 3D-восковки) от массы детали

стремительно возрастает с ростом массы. Учитывая, что стоимость 1 см³ при печати восковки принята равной 25 руб., можно спрогнозировать уменьшение стоимости изделия с учетом уменьшения стоимости 3D-печати. Например, снижение стоимости 1 см³ при печати восковки до 8 руб. позволяет повысить эффективность технологии ЛВМ с применением восковки, изготовленной на FFF-принтере. Таким образом, можно обеспечить экономическую эффективность данного варианта технологии ЛВМ и при больших партиях изготовления изделий различной массы.

В нашем случае, если стоимость на печать воскоподобным филаментом за 1 см³ будет составлять

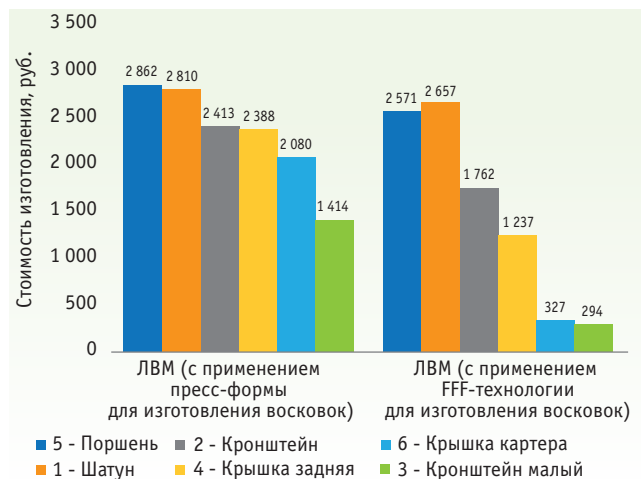


Рис. 4. Средняя стоимость изготовления 1 шт. при партии 50 шт. без НДС, руб. при стоимости печати 8 руб. за 1 см³

8 руб., экономическая эффективность изготовления восковок для деталей «Поршень», «Шатун» и «Кронштейн» является обоснованной при программе выпуска до 50 шт. На рис. 4 показана средняя стоимость изготовления 1 шт. при партии 50 шт. по технологии литья по выплавляемым моделям с применением FFF-печатных восковых мастер-моделей при стоимости печати 8 руб. за 1 см³.

При программе выпуска 500 шт. и снижении стоимости на FDM-печать восковок до 8 руб. за 1 см³ (рис. 5) сохраняется экономическая эффективность производства деталей «Крышка картера» объемом 20,381 см³, рассмотренная в работе [1], и «Кронштейн малый» объемом 4,254 см³ с применением печатных мастер-моделей из WAX3D.

Прогнозируя популяризацию FFF-технологии печати из WAX3D, что сопровождается продолжением снижения стоимости расходного материала за 1 см³ (см. рис. 3, зеленая штриховая линия), экономическая эффективность производства машиностроительных деталей для данного исследования, очевидно, будет увеличиваться. На рис. 6 показан прогноз по стоимости рассматриваемых деталей, изготовленных с применением восковок при стоимости печати 3 руб. за 1 см³.

Отметим, что прогнозируемое развитие возможно в случае появления на рынке аддитивных технологий серийно выпускаемого оборудования, стабильно работающего с рассматриваемым в данном исследовании и обеспечивающим требования производства материалом.

При моделировании стоимости изделия, изготавливаемого по технологии ЛВМ с применением FDM-печатных восковок, использована регрессионная модель, которая апробирована на примере расчета стоимости изготовления детали «Крышка картера» [1]. В общем виде модель может быть записана в виде:

$$C_{1 \text{ шт.}} = A \times \text{ПВ}^b, \quad (2)$$

где $C_{1 \text{ шт.}}$ – стоимость изготовления 1 шт. без НДС, руб.; ПВ – программа выпуска, шт.; A и b – неизвестные коэффициенты.

Для каждого из рассматриваемых в данной статье изделий построена своя регрессионная модель, определены неизвестные коэффициенты, значения которых представлены в табл. 3. Коэффициенты в модели учитывают сложность детали и ее объем.

Представленные на рис. 7 условные обозначения А1–А6 определяют точку пересечения двух графиков «Регрессионная модель» и «3D-печать (FDM) восковки» для каждой из пяти рассматриваемых деталей и детали «Крышка картера» [1]. Стоимость одной 3D-печатной восковки остается постоянной и не зависит от программы выпуска (линия

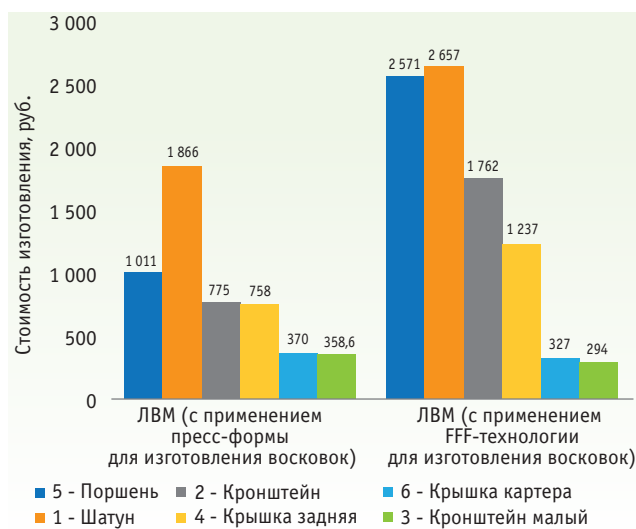


Рис. 5. Средняя стоимость изготовления 1 шт. различных деталей при партии 500 шт. без НДС, руб.

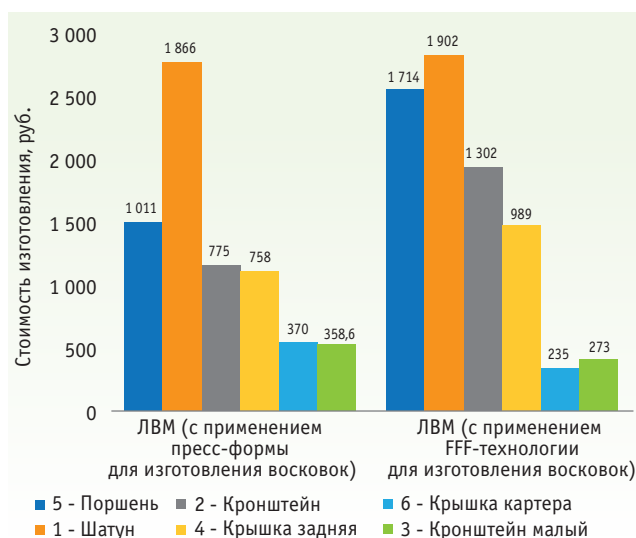


Рис. 6. Средняя стоимость изготовления 1 шт. различных деталей при партии 500 шт. (при стоимости печати 3 руб. за 1 см³), без НДС, руб.

«3D-печать (FDM) восковки»). Подобная тенденция известна для технологии селективного лазерного сплавления, например, она отмечена в работе [4].

Напротив, стоимость изготовления одной детали по технологии ЛВМ с применением на этапе подготовки производства 3D-печатной восковки зависит от программы выпуска; с увеличением объема производства стоимость одной детали снижается. График «Регрессионная модель» (см. рис. 7) оценивает данную зависимость для каждой из рассматриваемых деталей. Точка пересечения двух графиков «Регрессионная модель» и «3D-печать (FDM) восковки» определяет программу выпуска, начиная

Таблица 3. Коэффициенты регрессионных моделей

Наименование детали	Коэффициент А, руб.	Коэффициент b	Объем детали, см ³	Программа выпуска при стоимости 8 руб./см ³ , шт.
Шатун	5633,4	-0,178	149,0863	68
Кронштейн	16618	-0,493	81,459	94
Кронштейн мал.	14547	-0,596	4,254	694
Крышка задняя	16778	-0,498	48,514	187
Поршень	13790	-0,42	133,0137	54
Крышка картера	36732	-0,751	20,381	536

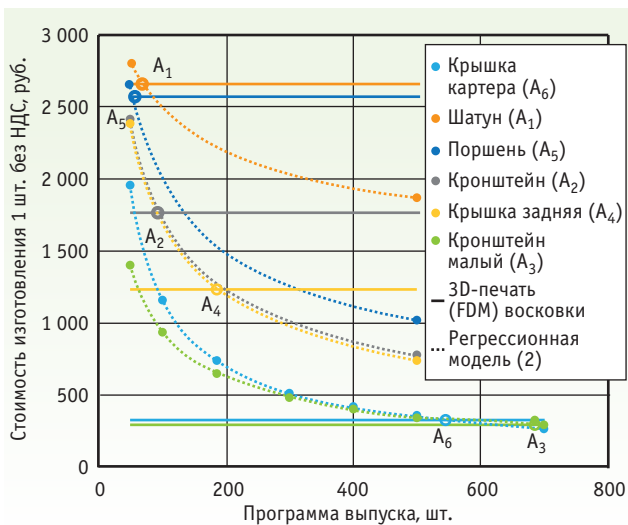


Рис. 7. Прогноз рентабельности применения 3D-печатных восковок из пластика WAX3D

с которой применение 3D-печатной восковки при подготовке производства по технологии ЛВМ становится экономически выгодным в случае мелкосерийного производства машиностроительных деталей объемом не более 200 см³. Данные о программах выпуска, при которых наблюдается эффективность совмещения традиционной и аддитивной технологий при мелкосерийном производстве, представлены в табл. 3.

ВЫВОДЫ

Результаты, представленные на рис. 1–7, демонстрируют потенциал 3D-печати по технологии FFF из воскоподобного материала для ее развития в части применения к технологии ЛВМ машиностроительных деталей при программе выпуска до 500 шт. Применение восковок из WAX3D на эта-

пе подготовки производства по технологии ЛВМ приносит экономический эффект.

Для каждого из рассматриваемых изделий получена своя регрессионная модель, которая позволяет оценить стоимость изготовления детали и при этом учесть ее степень сложности и объем (рис. 7).

Для того чтобы популяризировать печать воскоподобным материалом на FFF-принтере, необходимо снизить стоимость 3D-печати, что становится возможным при увеличении объема продаж воскоподобного пластика, как отдельно, так и в составе технологии, включающей оборудование, режимы обработки и сам материал. Прогнозируемая в будущем стоимость FDM-печати из воскоподобного пластика – 3–10 руб./см³. В этом случае мастер-модель, изготовленная из воскоподобного материала, становится конкурентоспособной восковке, применяемой на данный момент в технологии ЛВМ, при программе выпуска до 500 шт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дикарева В.В., Петров П.А., Свиринов М.С., Жихарева Е.Д., Молчанов Р.А. Рентабельность применения технологии FFF при изготовлении детали методом ЛВМ // *Машиностроение и инженерное образование*. 2020. № 2. С. 14–21.
2. 3dtoday.ru: Wax3D. Из чертежа в металл: [сайт]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/filamentarno/wax3d-printing-wax-models-for-casting-in-fdm-3d-printer/> (дата обращения: 20.01.2021).
3. WAX3D (ВОСК ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ) <https://filamentarno.ru/wax3d.html> (дата обращения: 20.01.2021).
4. Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В., Филимонов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учебное пособие для вузов / Под общ. ред. А.Л. Галиновского. М.: Издательство Юрайт, 2020. 115 с. (Высшее образование).

ДИКАРЕВА Валерия Витальевна – студентка 4-го курса Московского политехнического университета

ПЕТРОВ Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Московского политехнического университета

ЖИХАРЕВА Елена Дмитриевна – старший преподаватель Центра проектной деятельности Московского политехнического университета

МОЛЧАНОВ Руслан Андреевич – директор компании Filamentarno!

YASKAWA

100-ЛЕТНИЙ ОПЫТ РАБОТЫ
В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ



- Преобразователи частоты от 0,4 до 12 000 кВт
- Шпиндельные двигатели
- Комплексные сервоприводы от 0,003 до 75 кВт
- Линейные сервосистемы
- Контроллеры управления движения
- Программируемые логические контроллеры
- Роботы

КОСПА

КОМПОНЕНТЫ
И СИСТЕМЫ
ПРОМЫШЛЕННОЙ
АВТОМАТИЗАЦИИ



+7 (495) 660-28-22; www.cospa.ru

ООО «КОСПА» ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР И СЕРВИСНЫЙ ЦЕНТР YASKAWA