

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕЧАТИ ВОСКОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

*Долгов Н.В., Акимов А.А.*

*Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",  
Москва*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, литье по выплавляемым моделям, имитационное моделирование, математическая модель, ручные пресс-формы, автоматические пресс-формы.  
**Аннотация.** В статье рассматриваются технологии литья по выплавляемым моделям, в частности, процессы изготовления восковых моделей. Показаны возможности применения аддитивных технологий в литье по выплавляемым моделям. Для оценки эффективности применения аддитивных технологий печати воском для получения восковых моделей разработана имитационная модель. По результатам имитационного моделирования получены выводы о целесообразности использования аддитивных технологий в литье по выплавляемым моделям.

## APPLICATION OF SIMULATION MODELING METHODS TO EVALUATE THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF ADDITIVE WAX PRINTING TECHNOLOGIES TO PRODUCE WAX MODELS FOR LOST-WAX CASTING

*Dolgov N. V., Akimov A. A.*

*Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow*

**Keywords:** additive technologies, lost-wax casting, simulation modeling, mathematical model, manual molds, automatic molds.

**Abstract.** The paper shows the technologies of lost-wax casting, in particular, the processes of manufacturing wax models. The possibilities of using additive technologies in lost-wax casting are shown. A simulation model has been developed to evaluate the effectiveness of using additive wax printing technologies to produce wax models. Based on the results of simulation modeling, conclusions we made about the feasibility of using additive technologies in casting according to smelted models.

### 1. Исследование технологического процесса литья по выплавляемым моделям

Метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) широко используется на машиностроительных предприятиях и отличается высокой производительностью. Технологический процесс ЛВМ в обобщенном виде состоит из следующих переделов: изготовление восковых элементов модельных блоков (восковых моделей), сборка модельных блоков, изготовление оболочковых форм и непосредственно изготовление отливок (рис. 1).

Номенклатура изготавливаемых восковых моделей разделяется на типовые и специальные восковые модели.

К типовым восковым моделям относятся те элементы модельных блоков, которые уже изготавливались на предприятии и для которых уже имеется

необходимая документация и оснастка. К таким моделям относят восковые модели элементов литниково-питающей системы и восковые модели отливок, для которых уже имеется оснастка для производства. Для изготовления типовых восковых моделей используются пресс-формы. Специальные восковые модели изготавливаются на предприятии впервые и требуют изготовления оснастки (пресс-форм), что выполняется на этапе технологической подготовки производства (ТПП).



Рис. 1. Технологическая подготовка производства и переделы литья по выплавляемым моделям

Другим способом изготовления специальных восковых моделей является их печать с использованием аддитивных технологий. ТПП при таком подходе будет заключаться в разработке управляющей программы для аддитивного оборудования, что по продолжительности является существенно ниже, чем изготовление оснастки для изготовления моделей в пресс-формах. При этом производительность аддитивного оборудования для изготовления восковых моделей будет ниже, чем при их изготовлении с применением пресс-форм, что необходимо учитывать при принятии решения о получении восковых моделей аддитивными технологиями.

Таким образом, можно выделить два подхода к изготовлению элементов модельных блоков для ЛВМ: классический, при котором изготовление всех элементов выполняется в пресс-формах, или комбинированный, при котором часть элементов модельных блоков изготавливается в пресс-формах, а часть с использованием аддитивных технологий. Для укрупненной оценки эффективности применения аддитивных технологий печати восковых моделей для литья по выплавляемым моделям в позаказном производстве предлагается разработать математическую модель, позволяющую моделировать процессы ЛВМ классическим и комбинированным методами. В качестве метода для решения данной задачи было выбрано имитационное моделирование, позволяющее проводить эксперименты с различными вариациями партии запуска и выполнять анализ результатов.

## 2. Разработка имитационной модели изготовления модельных блоков для ЛВМ

В качестве инструмента разработки имитационной модели была выбрана среда AnyLogic [1], позволяющая моделировать работу процессов и систем со

сложной логикой. Для задания логики модели могут использоваться стандартные объекты (используя встроенные библиотеки) или собственные объекты, разрабатываемые с использованием языка программирования Java.

Имитационная модель должна учитывать последовательно-параллельную схему организации изготовления специальных элементов модельных блоков: типовые элементы изготавливаются в автоматизированных пресс-формах, параллельно изготавливаются специальные элементы (модели отливок) аддитивными технологиями или в ручных пресс-формах. Также, при моделировании изготовления восковых элементов модельных блоков должны учитываться циклы технологической подготовки производства специальных восковых элементов модельных блоков, как для ручных пресс-форм, так и с применением аддитивных технологий. На первом этапе были разработана диаграмма Ганта процессов изготовления модельных блоков, визуализирующая характер выполнения процессов и их зависимость друг от друга (рис. 2) [2].



Рис. 2. Диаграмма Ганта процессов изготовления модельных блоков для ЛВМ

Модель условно можно разделить на 3 основных блока:

- технологическая подготовка производства;
- изготовление восковых моделей;
- сборка модельных блоков.

Для моделирования и анализа различных методов изготовления элементов модельных форм в имитационной модели реализованы две параллельные схемы [3], описывающие логику для классического метода к изготовлению модельных блоков, подразумевающего изготовление элементов в автоматических (АПФ) и ручных пресс-формах (РПФ), а также комбинированного метода (КМ), в котором для изготовления восковых моделей отливок используются аддитивные технологии (рис. 3).

Логика реализована с использованием библиотеки моделирования процессов (использованы блоки Queue для создания буферов, Batch для формирования звеньев и блоков, Source для создания новых агентов и т.д.) и

библиотеки производственных систем (использованы блоки Transporter Fleet для управления транспортерами и Move By Transporter для перемещения объектов с помощью транспортеров). Также в имитационной модели созданы различные типы агентов отливок, литников, питателей, блоков и транспортеров.

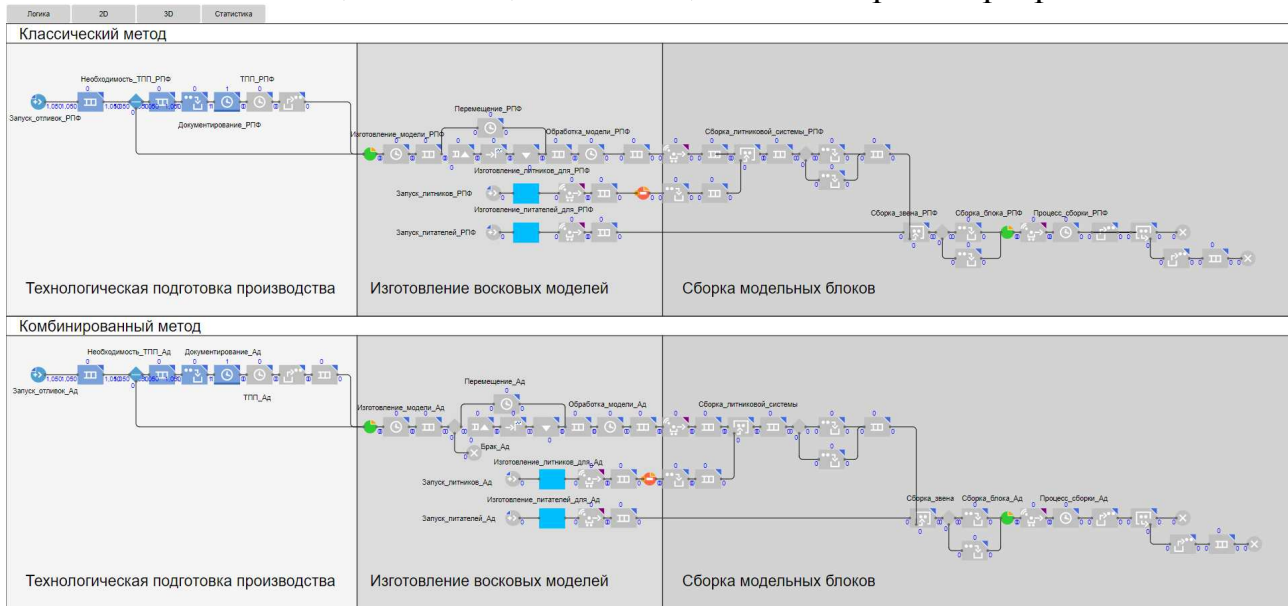


Рис. 3. Логика работы имитационной модели получения восковых моделей

Ряд параметров имитационной модели являются изменяемыми для пользователя и хранятся в Excel-файле. Файл изменяемых параметров содержит информацию о продолжительности выполнения технологических операций и производственном плане. Значения продолжительности выполнения операций задаются в виде треугольного распределения (минимальное, среднее, максимальное) для учета варьируемого времени их выполнения. Производственный план содержит данные по отливкам, для которых необходимо промоделировать изготовление модельных блоков и содержит следующий набор данных: количество моделей отливок, литников, питателей в звене; количество звеньев в блоке; программа выпуска; метод изготовления (РПФ/КМ) [4].

Для специальных отливок первым этапом является выполнение процессов ТПП. Процессы ТПП выполняются единожды для всей партии. По окончании процесса составления документации создаются агенты питателей и литников в необходимом для сборки блока количестве.

Процессы обработки и изготовления моделей отливок, литников и питателей проводятся для каждой модели в отдельности. При этом процессы изготовления литников и питателей происходят на одной установке. После изготовления восковой модели с использованием аддитивных технологий производится ее проверка на брак. Если она не проходит проверку, то отправляется в брак и процесс изготовления запускается заново для новой восковой модели. По окончании изготовления восковых моделей они отправляются в выходной буфер, после чего переносятся на входной буфер у слесарного стола.

После завершения процесса обработки восковых моделей производится их транспортировка с помощью автоматических управляемых тележек (AGV) из выходного буфера слесарного стола во входной буфер на участок сборки. При

наличии полного комплекта для сборки блока элементы модели перемещаются с помощью AGV на слесарный стол для выполнения процесса сборки.

В процессе моделирования имеется возможность визуализации статистических данных по эксперименту, содержащих длительность производственного цикла изготовления отдельных единиц номенклатуры (минимальное, среднее, максимальное) в формате таблицы; длительность технологического цикла изготовления отдельных единиц номенклатуры (минимальное, среднее, максимальное) в формате таблицы; текущий коэффициент загрузки оборудования (одностанционная шприц-машина, установка печати воском) в формате столбчатой диаграммы; коэффициент загрузки оборудования (одностанционная шприц-машина, установка печати воском) в формате графика (рис. 4) [5].

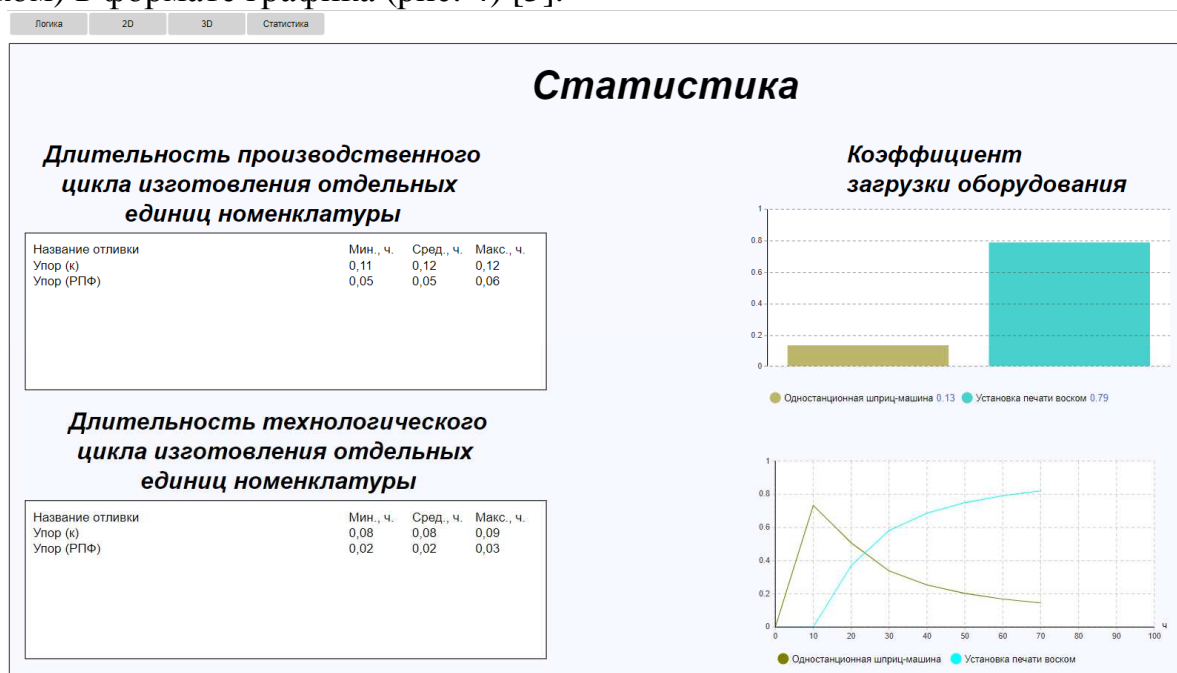


Рис. 4. Интерфейс статистики имитационной модели

По окончании моделирования производится сохранение результатов эксперимента в выходной Excel файл, содержащий следующие данные: порядковый номер эксперимента, наименования номенклатуры отливок, количество штук в партии, метод изготовления (РПФ/КМ), длительность технологического цикла изготовления отдельных единиц номенклатуры (минимальное, среднее, максимальное), длительность производственного цикла изготовления отдельных единиц номенклатуры (минимальное, среднее, максимальное) и время изготовления партии моделей отливок [6].

### 3. Проведение экспериментов

Результаты проведенных в имитационной модели экспериментов показали, что при увеличении объема партии необходимых для изготовления восковых моделей классический метод в ручных пресс-формах является более эффективным, так как позволяет изготовить заданное количество восковых моделей за более короткий срок. При этом для изготовления меньшего количества восковых моделей различной номенклатуры целесообразнее использовать комбинированный метод (рис. 5).

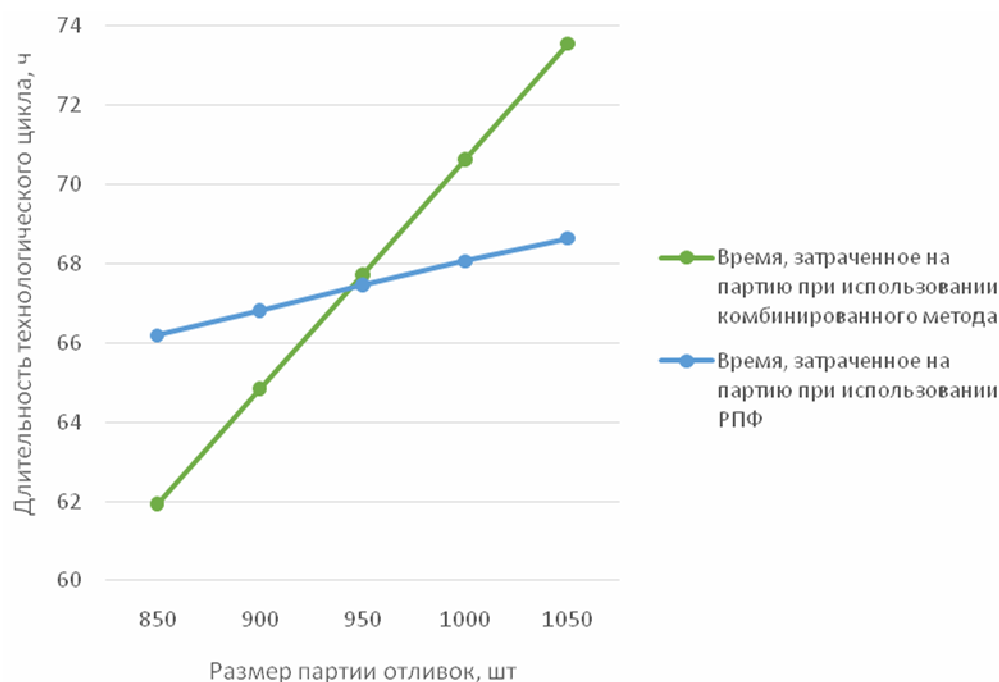


Рис. 5. Графики зависимости длительности технологического цикла от размера партии

Из графика видно, что с учетом принятых исходных данных модели при объеме партии, равным 950 единиц, оба метода имеют практически одинаковое время, которое требуется для ее изготовления. Эта точка показывает границы эффективности использования аддитивного метода. При изготовлении партии, в которую входит меньше 950 единиц восковых моделей, аддитивные технологии оправдывают свое применение. При увеличении объема партии свыше 950 единиц производительность при использовании комбинированного метода начинает уступать классическому методу.

Таким образом, при увеличении объема партии классический метод изготовления восковых моделей в РПФ будет более производительным относительно комбинированного метода с применением аддитивных технологий. В обратной ситуации, при небольших объемах партии, но увеличении количества различных специальных номенклатурных позиций, применение комбинированного метода является более эффективным. Использование аддитивных технологий может быть оправданным при использовании в мелкосерийном позаказном производстве за счет низкой продолжительности ТПП относительно подготовки производства для изготовления ручных пресс-форм.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10254, <https://rscf.ru/project/22-79-10254/>. Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инжиниринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).

#### Список литературы

1. Any Logic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/>

2. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А., Ивашин С.С., Долгов Н.В. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2022. – №3. – С. 84-99. – doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99.
3. Никишечкин П.А., Ивашин С.С., Черненко В.Е., Малыханов А.А., Долгов Н.В. Система имитационного моделирования PlantTwin как инструмент верификации производственных планов и поддержки принятия решений для повышения эффективности машиностроительных производств // Вестник машиностроения. – 2021. – №30. – С.80-85. – doi.org/10.36652/0042-4633-2021-3-80-85.
4. Максимей И.В. Имитационное моделирование сложных систем. Математические основы. – Минск: БГУ. – 2009. – 264 с.
5. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Леонов А.А. Имитационное моделирование производственных процессов с применением логик планового и ситуационного резервирования рабочих мест // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – №1. – С. 3-10. – doi.org/10.36652/0869-4931-2021-75-1-3-10.
6. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А., Долгов Н.В. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2021. – №2(137). – С.43-58. – doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58.

Сведения об авторах:

*Долгов Никита Витальевич* – младший научный сотрудник, аспирант;

*Акимов Артем Александрович* – младший научный сотрудник, аспирант.