

УДК 004.942

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЦЕХА ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ПРИ МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПОЗАКАЗНОМ ТИПЕ ПРОИЗВОДСТВА

Никищечкин П.А., Долгов Н.В., Акимов А.А. (Москва)

Введение

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из наиболее распространенных и эффективных способов литья и активно применяется в машиностроении. Технологический процесс ЛВМ включает несколько этапов: создание модельных блоков из воска, сборка блоков, изготовление формы для отливки и, в конечном итоге, производство отливок (рисунок 1) [1,2].



Рис. 1. Основные этапы процесса литья по выплавляемым моделям

Первым этапом является изготовление восковых моделей, в число которых входят отливки и элементы литниковой системы (питатели, литники). Классическим способом изготовления всех восковых моделей является использование ручных или автоматических пресс-форм. Альтернативным способом изготовления моделей является печать восковых моделей с использованием аддитивных технологий. При этом разработка управляющей программы для аддитивного оборудования занимает значительно меньше времени, чем проектирование и изготовление оснастки для пресс-форм, однако производительность аддитивного оборудования для создания восковых моделей ниже [3-5].

Восковые модели, необходимые для изготовления оболочковых форм, можно разделить на типовые и специальные. Типовые модели представляют собой элементы модельных блоков, для которых уже имеется необходимая документация и оснастка. К ним относятся элементы литниково-питающей системы и модели отливок, для которых уже имеется необходимая оснастка или управляющая программа. К специальным восковым моделям относятся те, которые изготавливаются на предприятии впервые и требуют разработки документации, а также создания оснастки на этапе технологической подготовки производства (ТПП) [1,6].

Таким образом, можно выделить два подхода к производству элементов модельных блоков для ЛВМ: классический, где все элементы изготавливаются в пресс-формах, и комбинированный, где элементы литниковой системы создаются в пресс-

формах, а модели отливок – с использованием аддитивных технологий. Особенности каждого метода производства в части длительности технологической подготовки производства и длительности выполнения операции по их изготовлению необходимо учитывать при планировании производства и принимать решение о выборе метода их изготовления с точки зрения наименьшей длительности технологического и производственного циклов.

Расчеты производственных циклов каждого передела в отдельности можно рассчитать аналитически. Однако, при наличии большого количества заказов и использовании различных методов изготовления восковых моделей (классический и комбинированный) появляется большое количество комбинаций их использования и наложения материальных потоков, поэтому аналитический расчет производственных циклов может быть существенно затруднен [5-7].

В настоящей работе предлагается разработка имитационной модели работы литейного цеха при мелкосерийном позаказном типе производства, позволяющей проанализировать влияние выбора метода изготовления восковых моделей на производственный цикл изготовления отливок и общее время выполнения производственного заказа. Разработка имитационной модели цеха является основой для построения его цифрового двойника, позволяющего исследовать поведение производственной системы и прогнозировать ее состояние в будущем [8,9].

Реализация логики имитационной модели цеха литья по выплавляемым моделям

Для оценки эффективности использования аддитивных технологий в печати восковых моделей для ЛВМ в позаказном производстве, а также расчете производственного цикла изготовления заказов предлагается разработать имитационную модель, которая позволит моделировать процессы ЛВМ с использованием классического и комбинированного подходов и проводить эксперименты с различными вариантами партий запуска. В сравнении с аналитическими (расчетными) методами исследования имитационная модель позволит учесть работу транспортной системы, наложения материальных потоков при выполнении заданной производственной программы, взаимовлияние транспортных и технологических ресурсов, а также случайные факторы, возникающие в процессе производства (например, возникновение брака, непостоянное время выполнения операций, отказы оборудования и др.) [10].

Таким образом, разработка имитационной модели производственного процесса литья по выплавляемым моделям необходима для:

- расчета производственных циклов изготовления отливок с учетом выбранных методов изготовления при выполнении заданной производственной программы;
- оценки влияния выбранных методов изготовления восковых моделей на общее время выполнения производственного заказа;
- последующей проработки алгоритма автоматизированного выбора метода изготовления восковых моделей, позволяющего определить набор методов изготовления восковых моделей для достижения наименьшего времени выполнения производственной программы.

В качестве инструмента разработки имитационной модели была выбрана среда AnyLogic, 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 [5].

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 была разработана диаграмма Ганта процессов изготовления модельных блоков, визуализирующая выполнение процессов и их связи (рисунок 2) [11-14].

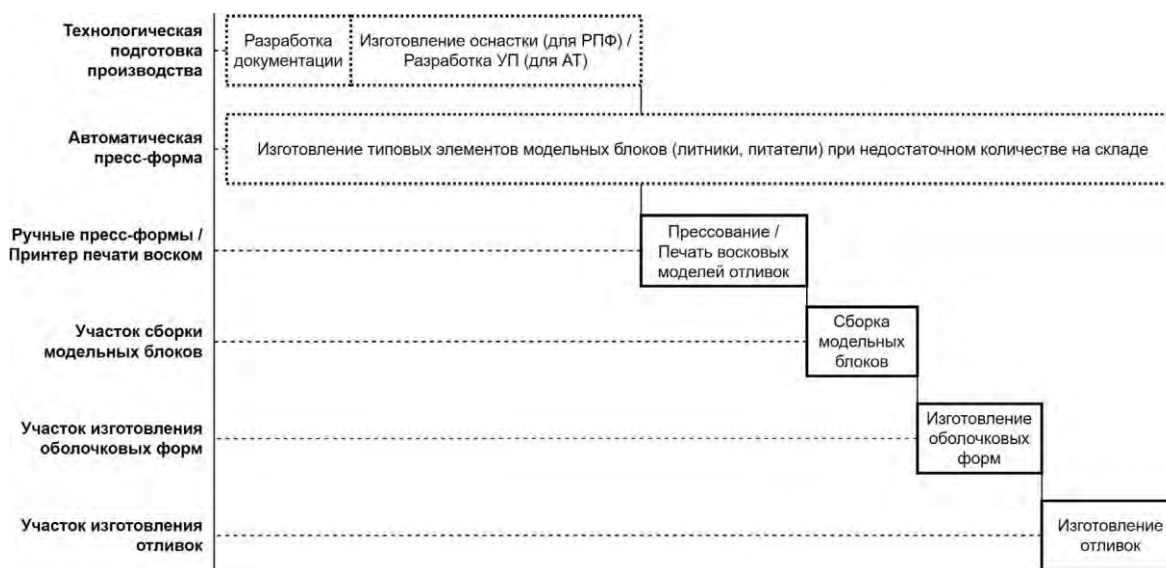


Рис. 2. Диаграмма Ганта процессов изготовления отливок методом ЛВМ

Модель условно можно разделить на 4 основных блока:

- технологическая подготовка производства и изготовление восковых моделей,
- сборка модельных блоков,
- изготовление керамических форм,
- изготовление отливок.

Для моделирования и анализа различных методов изготовления элементов модельных форм в имитационной модели реализованы три параллельные схемы, позволяющие реализовать как классический метод изготовления модельных блоков, подразумевающего изготовление элементов в автоматических (АПФ) и моделей отливок в ручных пресс-формах (РПФ), так и комбинированный метод, в котором для изготовления восковых моделей отливок используются аддитивные технологии (рисунок 3).

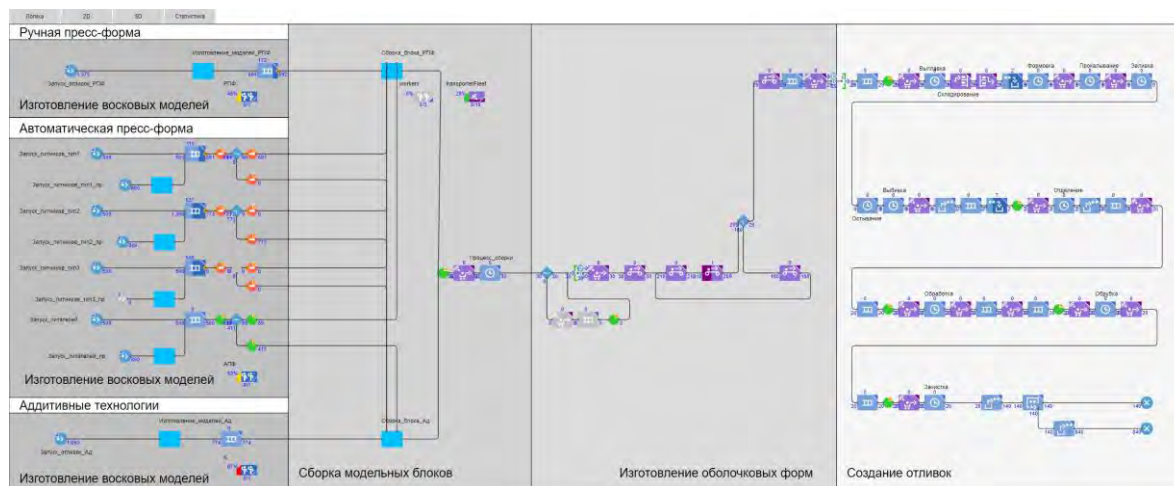


Рис. 3. Общая логика работы имитационной модели работы литейного цеха

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.

Процессы изготовления моделей отливок, литников и питателей проводятся для каждой позиции по отдельности в порядке их указания в производственном плане. Для отливок, изготавливаемых на предприятии впервые, первым этапом является выполнение процессов ТПП. Для изготовления моделей литников и питателей прохождение ТПП не требуется. Проверка на необходимость выполнения ТПП производится по показателю уникальности модели отливки и по десятичному номеру отливки, указанному в исходных данных модели: если десятичный номер встречается впервые, необходимо моделировать выполнение ТПП. Затем, при необходимости, происходит процесс переналадки оборудования на новую номенклатуру [5,15].

По окончании изготовления восковых моделей выбранным методом (РПФ/АТ) они отправляются в выходной буфер, после чего переносятся на входной буфер у слесарного рабочего места, на котором производится финишная обработка модели отливки (рисунок 4).

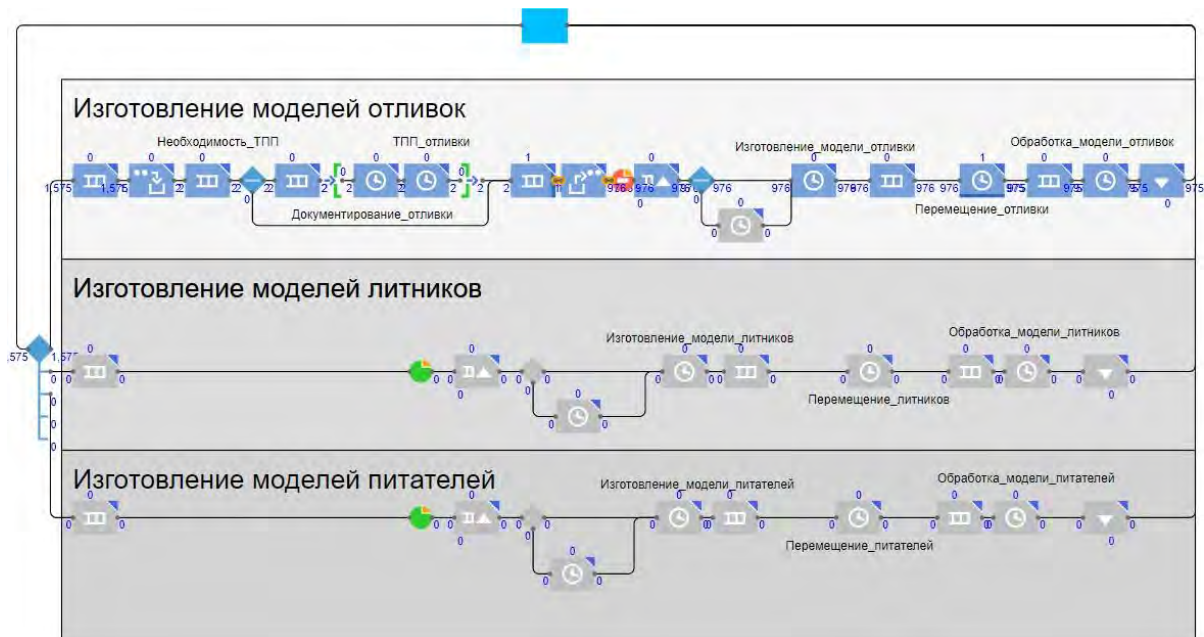


Рис. 4. Логика работы блока для моделирования изготовления восковых моделей

Литники могут относиться к одной из трех категорий, которые задаются в исходных данных для каждой отливки. Питатели являются универсальными для всех моделей отливок. Для хранения запаса литников каждого вида и питателей в модели предусмотрены буферы, вместимость которых задается в исходных данных. Логика работы данных буферов заключается в том, что при достижении минимальной загрузки склада ставится задача на производство фиксированного количества объектов, рассчитываемых как разность между полной вместимостью буфера и минимально допустимым значением. Изготовление литников и питателей производится на установке АПФ. Реализация описанной логики позволяет поддерживать необходимое количество элементов литниковой системы для производства звеньев, при этом одной из задач экспериментов является определение оптимальной вместимости буферов и минимально допустимых значений оставшегося количества объектов [16].

После завершения процесса изготовления восковых моделей производится их транспортировка с помощью автоматических управляемых тележек (AGV) из выходного буфера слесарного рабочего места во входной буфер на участок сборки. При наличии полного комплекта для сборки блока элементы модели перемещаются с помощью AGV на слесарное рабочее место для выполнения процесса сборки (рисунок 5).

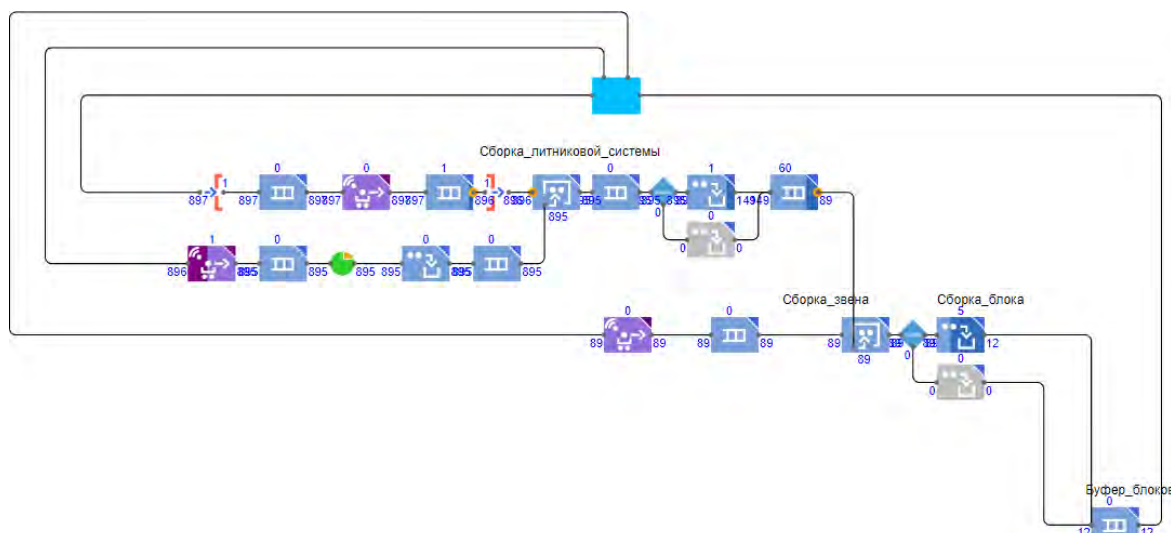


Рис. 5. Логика работы блока моделирования сборки литниковой системы

Ряд параметров имитационной модели является изменяемым для пользователя и хранится 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: модель отливки (децимальный номер, название); уникальность отливок; метод изготовления восковых моделей отливки (РПФ/АТ); тип используемых литников; количество отливок, литников и питателей в звене; количество звеньев в блоке; программа выпуска.

После завершения процесса сборки готовые модельные блоки отправляются на конвейер, на котором каждый модельный блок проходит семь раз посты с обмакиванием в суспензию и нанесением многослойного огнеупорного покрытия. Между процессами происходит сушка модельных блоков. После перемещения модельного блока на выходной буфер конвейера последовательно выполняются следующие процессы:

- выплавка модельного состава;
- складирование готовых оболочковых форм;
- формовка опок;
- прокаливание оболочковых форм;
- заливка оболочковых форм;
- остывание оболочковых форм;
- выбивка опок;
- отделение керамики;
- абразивная обработка;
- обрубка отливок;
- слесарная зачистка.

Реализация пользовательского интерфейса имитационной модели

Основной интерфейс имитационной модели в режиме 2D просмотра представлен на рисунке 6.

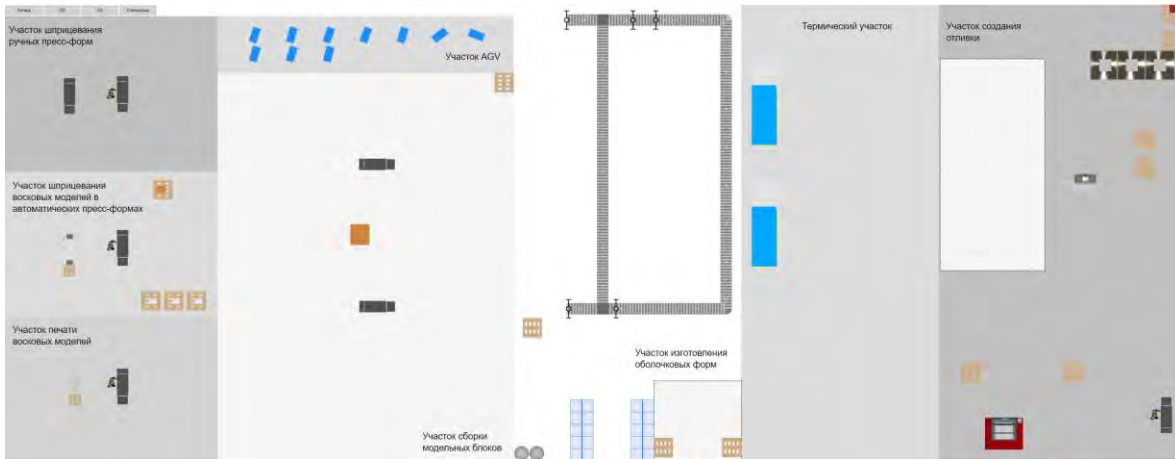


Рис. 6. Основной интерфейс имитационной модели литейного цеха

Реализованная имитационная модель позволяет рассчитывать и визуализировать статистические данные по эксперименту, содержащие следующий набор параметров:

- длительность производственного цикла изготовления отдельных единиц номенклатуры (минимальное, среднее, максимальное) в табличном виде;
- длительность технологического цикла изготовления отдельных единиц номенклатуры (минимальное, среднее, максимальное) в формате таблицы;
- коэффициент загрузки каждой группы оборудования и складов в формате столбчатой диаграммы (текущее значение) и в формате графика (динамика изменения);
- коэффициент переналадки оборудования (одностанционная шприц-машина, установка печати воском) в формате столбчатой диаграммы (текущее значение) и в формате графика (рисунок 7) (динамика изменения).

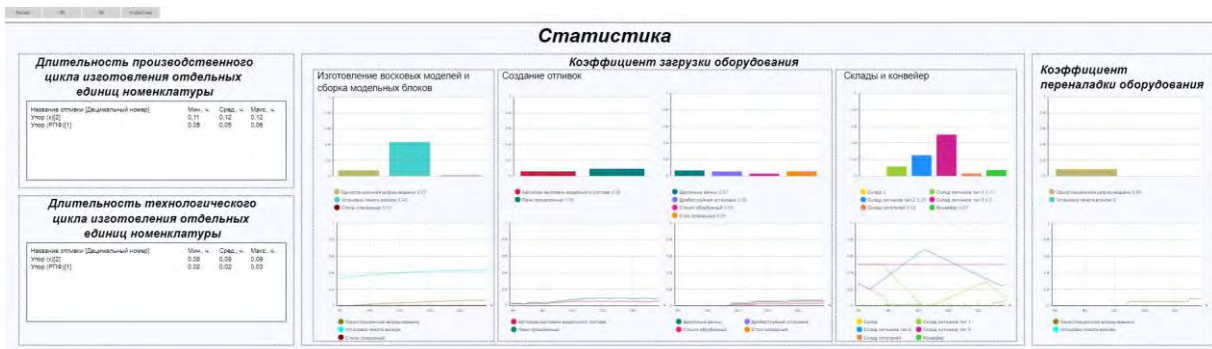


Рис. 7. Интерфейс статистики имитационной модели

Проведение экспериментов на базе разработанной 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 (классический/комбинированный), 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 [17].

В ходе исследования был проведен ряд экспериментов с использованием разработанной имитационной модели, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов имитационной модели литейного цеха

Децимальный номер	Название отливки	Уникальность отливок	Тип литников	Программа выпуска	Метод изготовления	Время на производство партии
Эксперимент 1						
01	Оболочка	Да	1	60	К	47,87
02	Корпус	Да	2	210	РПФ	130,39
03	Упор	Да	1	160	РПФ	253,76
Эксперимент 2						
01	Оболочка	Да	1	60	РПФ	188,86
02	Корпус	Да	2	210	К	58,17
03	Упор	Да	1	160	К	181,57
Эксперимент 3						
01	Оболочка	Да	1	600	К	102,87
02	Корпус	Да	2	2100	РПФ	598,03
03	Упор	Да	1	1600	РПФ	752,33
Эксперимент 4						
01	Оболочка	Да	1	600	РПФ	125,11
02	Корпус	Да	2	2100	К	618,98
03	Упор	Да	1	1600	К	757,83

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что при увеличении объема партии классический метод изготовления восковых моделей в РПФ является более производительным по сравнению с комбинированным методом, использующим установки аддитивной печати для изготовления восковых моделей отливок. Однако, в случае небольших объемов партии, но большого количества разных номенклатурных позиций, т.е. при мелкосерийном позаказном типе производства, использование аддитивных технологий может быть оправдано, поскольку это позволяет сократить время подготовки производства по сравнению с изготовлением ручных пресс-форм. Результаты экспериментов также показывают, что при одновременном запуске нескольких партий различных типов отливок может наблюдаться увеличение времени на производство партии отливок по причине наложения материальных потоков друг на друга. Для выполнения программы выпуска за минимальное время на производство отливок требуется доработка логики распределения ресурсов и планирования запуска партий отливок в производство.

Выводы

В статье рассмотрены особенности технологического процесса литья по выплавляемым моделям. Проанализированы подходы к производству элементов модельных блоков и выявлены особенности каждого из них, заключающиеся в длительности выполнении технологической подготовки производства и времени выполнения операции. Разработанная имитационная модель цеха литья позволяет проанализировать влияние выбора метода изготовления восковых моделей на производственный цикл изготовления отливок и общее время выполнения производственного заказа с учетом работы транспортной системы и непостоянного времени выполнения операций. Важно отметить, что на результаты моделирования также существенно влияет заданная в производственном заказе последовательность

партий запуска, что должно учитываться при планировании производства в соответствующих информационных системах [18-20].

Информация о финансовой поддержке

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. Долгов, В. А. Обоснование применения метода литья по выплавляемым моделям в позаказном многономенклатурном производстве / В. А. Долгов, П. А. Никищечкин, Н. В. Долгов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2023. – № 2(145). – С. 47-60. – DOI 10.18698/0236-3941-2023-2-47-60. – EDN JPIBUF.
2. Максимей, И.В. Имитационное моделирование сложных систем. Математические основы. – Минск: БГУ, 2009. – 264 с.
3. Малыханов, А. А. От имитационной модели к цифровому двойнику: анализ опыта выполнения коммерческих проектов / А. А. Малыханов, В. Е. Черненко // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности: Труды конференции, Екатеринбург, 16–18 октября 2019 года. – Екатеринбург: Издательство Уральского государственного педагогического университета, 2019. – С. 37-46. – EDN WFKLKE.
4. Моделирование процессов литья по выплавляемым моделям низколегированных сплавов меди с железом / К. Г. Семенов, В. В. Чернов, К. А. Батышев [и др.] // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2022. – № 11(65). – С. 147-153. – EDN ХОТЕНЕ.
5. Долгов, Н. В. Применение методов имитационного моделирования для оценки эффективности использования аддитивных технологий печати воском для получения восковых моделей для литья по выплавляемым моделям / Н. В. Долгов, А. А. Акимов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 113-119. – DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-113-119. – EDN XARPFI.
6. Формирование информационной модели для оценки эффективности производственной системы / В. А. Долгов, А. А. Кабанов, Н. С. Андреев, И. В. Дацюк // Вестник МГТУ "Станкин". – 2014. – № 4(31). – С. 191-195. – EDN TFCGYD.
7. Dolgov, V. A. Simulation of Technological Systems in Custom Production / V. A. Dolgov // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, No. 9. – P. 951-955. – DOI 10.3103/S1068798X10090212. – EDN ODQKMT.
8. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins / S. N. Grigoriev, P. A. Nikishechkin, V. A. Dolgov, N. V. Dolgov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 2020, 07–11 September. – Sevastopol, 2020. – P. 032094. – DOI 10.1088/1757-899X/971/3/032094. – EDN XDKTOY.
9. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, П. А. Никищечкин, Н. В. Долгов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2021. – № 2(137). – С. 43-58. – DOI 10.18698/0236-3941-2021-2-43-58. – EDN TRCNAW.

10. Долгов, В. А. Анализ технологического цикла сборки изделий в многономенклатурном машиностроительном производстве с учетом нестабильной длительности операций / В. А. Долгов, О. С. Прошкина // Вестник МГТУ "Станкин". – 2022. – № 4(63). – С. 17-22. – EDN CNKDKZ.
11. Вороненко, В. П. Информационная модель базового производственно-технологического решения для адаптации технологического процесса к текущему состоянию системы предприятия / В. П. Вороненко, В. А. Долгов // Вестник МГТУ "Станкин". – 2011. – № 3(15). – С. 173-177. – EDN NWDWPT.
12. Григорьев, С. Н. Метод оценки производственной технологичности изделий на основе применения семантических моделей в условиях цифрового производства / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, Е. Г. Рахмилевич // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 12(729). – С. 16-25. – DOI 10.18698/0536-1044-2020-12-16-25. – EDN AYMNQX.
13. Simulation Modeling of Assembly Processes in Digital Manufacturing / A. Kutin, V. Dolgov, A. Podkidyshev, A. Kabanov // 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 19-21 July 2017, Gulf of Naples, Italy. – Ischia, Naples, 2018. – P. 470-475. – DOI 10.1016/j.procir.2017.12.246. – EDN DMUFJM.
14. Долгов, В. А. Информационная поддержка процессов освоения прогрессивных технологий на машиностроительных предприятиях / В. А. Долгов, С. В. Луцок, А. А. Подкидышев // Вестник машиностроения. – 2019. – № 11. – С. 57-61. – EDN TRTXQW.
15. Вдовин, К. Н. Компьютерное моделирование физического питания отливки "колесо" в литье по выплавляемым моделям / К. Н. Вдовин, Н. А. Феоктистов, М. В. Овчинникова // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2018. – № 17. – С. 98-101. – EDN YUKOQX.
16. Семантические модели технологических систем для имитационного моделирования производственных процессов / В. А. Долгов, А. А. Подкидышев, И. В. Дацюк [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72, № 8. – С. 350-354. – EDN XUVNGP.
17. Равочкин, А. С. Верификация численных методов моделирования литья по выплавляемым моделям для отливок газотурбинных двигателей в программе LVMFlow / А. С. Равочкин, Ю. В. Чибирнова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2022. – Т. 20, № 11. – С. 488-492. – DOI 10.36652/1684-1107-2022-20-11-488-492. – EDN UJFOKT.
18. Чибирнова, Ю. В. Проблематика применения численных методов моделирования литья по выплавляемым моделям для отливок ГТД / Ю. В. Чибирнова, А. С. Равочкин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2020. – № 2(53). – С. 102-106. – EDN XSSHSY.
19. Григорьев, С. Н. Имитационное моделирование производственных процессов с применением логик планового и ситуационного резервирования рабочих мест / С. Н. Григорьев, А. А. Леонов, В. А. Долгов // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75, № 1. – С. 3-10. – DOI 10.36652/0869-4931-2021-75-1-3-10. – EDN UPXCVV.
20. Лютов, А. Г. Моделирование данных процесса литья по выплавляемым моделям / А. Г. Лютов, Ю. В. Рябов, Р. Р. Зиннатуллин // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 26–28 февраля 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020. – С. 104-109. – EDN WTFRFK.