

Обзорная статья

УДК 004.94, 519.876.5, 678.02

EDN LPOJCP

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-49-58>

Илья Владимирович Магнитский<sup>1</sup>

Елена Сергеевна Сергеева<sup>2</sup>

Вадим Валерьевич Кулев<sup>3</sup>

Сергей Владимирович Палочкин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Акционерное общество «Композит», г. Королев, Россия

<sup>4</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup> soleylju@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6956-4347>

<sup>2</sup> Sergeeva.S.Elena@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6496-6010>

<sup>3</sup> vadimkulev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3149-4974>

<sup>4</sup> palnigs@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-6192-0243>

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

### ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ УУКМ НА ОСНОВЕ КАРКАСОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ НАМОТКИ И ВЫКЛАДКИ ТКАНИ

**Аннотация.** Представлены результаты численного анализа с использованием разработанной имитационной модели производственной линии по изготовлению углерод-углеродных композиционных материалов с осесимметричной схемой армирования и комбинированной матрицей. Установлено влияние количества оборудования на каждом этапе технологического процесса, что позволило выявить его «узкие места». Предложено необходимое количество оборудования, используемого в технологическом процессе, для минимизации влияния конкуренции различных типов изготавливаемой продукции на суммарное время выполнения технологического процесса. Проиллюстрировано перестроение модели при введении более приоритетного плана изготовления продукции.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, модель производства, углерод-углеродный композиционный материал, осесимметричная схема армирования, комбинированная матрица, имитационная модель, производственная линия

**Благодарности:** работа выполнена в рамках соглашения от 04.12.2023 № 41/12-23 о предоставлении Гранта Правительства Московской области в сферах науки, технологий и инноваций.

**Для цитирования:** Имитационная модель производственной линии по изготовлению УУКМ на основе каркасов, изготовленных методами намотки и выкладки ткани / И. В. Магнитский, Е. С. Сергеева, В. В. Кулев, С. В. Палочкин // Технологии и качество. 2025. № 4(70). С. 49–58. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-49-58>.

Original article

Ilya V. Magnitsky<sup>1</sup>

Elena S. Sergeeva<sup>2</sup>

Vadim V. Kulev<sup>3</sup>

Sergey V. Palochkin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Joint-Stock Company “Kompozit”, Korolev, Russia

<sup>4</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## SIMULATION MODEL OF PRODUCTION LINE FOR THE MANUFACTURE OF CCCM BASED ON WINDING AND LAYING FRAMES

**Abstract.** The results of a numerical analysis using a developed simulation model of the production line for manufacturing carbon-carbon composite material with an axisymmetric reinforcement scheme and a combined matrix are presented. The impact of the quantity of equipment at each stage of the technological process was established, allowing to identify its “bottlenecks”. The necessary amount of equipment used in the technological process was proposed to minimise the influence of competition between different types of

*manufactured products on the total duration of the technological process. The model restricting caused by the introduction of priority-based production schedule is illustrated.*

**Keywords:** digital twin, production model, carbon-carbon composite material, axysymmetric scheme, combined matrix, simulation model, production line

**Acknowledgements:** the work was carried out under Agreement No 41/12-23 dated 04.12.2023 on the provision of a grant from the Government of Moscow Region in the fields of science, technology, and innovation.

**For citation:** Magnitsky I. V., Sergeeva E. S., Kulev V. V., Palochkin S. V. Simulation model of production line for the manifature of CCCM based on winding and laying frames. Technologies & Quality. 2025. No 4(70). P. 49–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-49-58>.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) обладают уникальными характеристиками [1], что позволяет их использовать для изделий в различных областях промышленности, например, энергетической и химической, а также легкой промышленности и т. д.

Однако изготовление УУКМ – весьма длительный, трудоемкий и ресурсоемкий процесс [2], и ошибки, допущенные при проектировании производств, крайне нежелательны, так как могут привести к значительным убыткам.

В таких условиях хорошо зарекомендовало себя применение цифровых двойников производства [3–8] – моделей, позволяющих имитировать интересующие аспекты реального производства, для решения задач проектирования оборудования и его объединения в участки, оценок возможности, сроков и затрат на выполнение тех или иных заказов, выявления узких мест технологии и путей их ликвидации, выбора стратегии управления производственными мощностями и других. Особенно широко цифровые двойники применяются в описании процессов информационной, машиностроительной, и агропромышленных отраслей [4, 6, 7, 9].

Для моделирования обычно используются подходы, основанные на моделях IDEF0 [10] и IDEF3 [11]. Первые имеют общий характер и применяются для описания процессов на предприятии в целом, описывая его деятельность как набор отдельных функций и их связей. Модели IDEF0 не предполагают подробного анализа частных функций и служат для проведения начального общего анализа систем. Модели IDEF3 имеют более низкий уровень и описывают последовательность операций, входящих в конкретный процесс.

Практическая реализация моделей IDEF3, как правило, представляет собой программное обеспечение в виде варианта конечного автомата, иногда осложненного дополнительными модулями. На рынке имеется ряд программных решений, предназначенных для создания и анализа моделей IDEF3 производств, например,

ProSim, ProCap, BpWin, All Fusion Process Modeler. Однако применение такого программного обеспечения требует большого количества исходных данных, часто практически недоступных в реальных условиях, что затрудняет проведение экспресс-анализа производств, требуя значительного времени подготовки и настройки моделей. При наличии компактного объекта моделирования зачастую целесообразна локальная реализация модели, учитывающая интересующие аспекты производства.

Настоящая статья посвящена разработке имитационной модели производства заготовок УУКМ на основе каркасов, изготовленных методами намотки и выкладки ткани.

В дальнейшем мы будем пользоваться следующими терминами. Под имитационной моделью (далее – модель) будем понимать комплексную сущность, абстрактным образом описывающую технологический процесс изготовления заготовок УУКМ. Минимальной структурной единицей модели является узел, способный получать, хранить, обрабатывать и передавать информацию о стадии технологического процесса, изготовленных/обработанных ресурсах другим узлам. Модель определяет направление взаимодействия узлов с возможностью учета приоритетности очереди выполнения плана – целевого показателя, подразумевающего количество заготовок УУКМ, удовлетворяющий определенным требованиям набор которых называется партией.

Результатом работы модели является суммарное время и необходимое количество ресурсов для выполнения заданного плана, а также перечень изготовленных продуктов и их партий.

Для учета реального времени выполнения важной характеристикой является состояние продукта, любое изменение которого регистрируется на временной линии, что позволяет формировать и отслеживать его историю. Также продукт имеет еще две характеристики, определяющие его состояние и регистрирующиеся на

временной линии: его номер и тип. Тип продукта задает характеристику, общую для части продуктов, например, размер заготовки, количество ресурса, необходимого для ее изготовления, стадии технологического процесса и их последовательность и т. д. Таким образом, тип продукта позволяет группировать их по выбранному общему признаку.

Важным элементом модели является наличие буфера – итогового склада готовых продуктов различного типа, куда они попадают в конце цикла их изготовления. Использование этой сущности позволяет формировать партии продуктов согласно шаблону партии, определяемому текущим планом и являющемуся списком пар «тип продукта – количество продуктов в партии». Продукты и партии являются объектами модели, инициализация, обработка и хранение которых обеспечивают узлы модели.

Каждый узел модели имеет различное поведение в зависимости от его функции: изменение состояния продукта, его хранение, временная задержка для имитации отдельных операций, например контрольных. Множество поведений узлов определяются введенные их классы, наследуемые от базового. Базовый класс предоставляет стандартную реализацию интерфейса взаимодействия узлов, которую подклассы при необходимости переопределяют для описания своего поведения. Единый интерфейс взаимодействия позволяет другим узлам получать информацию о состоянии текущего узла, не заботясь о его реализации.

Базовый класс узла для каждого своего подкласса включает объект статистики узла, предназначенный для ведения учета его состояния на всей временной линии. Состояние также содержит информацию о количестве продуктов заданного типа на выходе из узла, количестве готовых партий в узле, количестве израсходованного сырья.

При запуске модели выполнение программы входит в цикл, на каждом шагу которого происходит формирование контекста цикла.

Контекст цикла необходим для представления узлам модели следующей информации: текущее время работы модели; время, прошедшее с момента последнего цикла; приоритетная очередь планов модели.

В ходе цикла каждый узел может уведомить о наличии работы с передачей значения времени, оставшегося до ее окончания. По окончании цикла результатом является минимальное значение из переданных, которое соответствует ближайшему событию окончания работ. Полученное значение используется для вычисления времени следующего цикла. Если ни

один узел не сообщил о проведении работ в ходе последнего цикла, выполнение программы выходит из цикла и работа модели заканчивается.

В ходе работы модели каждый узел стремится к следованию стратегии быстрейшего формирования следующей партии. Для этого узлы, отвечающие за обработку продуктов, перед выбором объекта обработки собирают информацию об имеющемся количестве продуктов в следующих узлах модели. На основе этой информации и данных о текущем более приоритетном, но не выполненном плане узел-обработчик определяет тип или типы продуктов, единиц которых не достает для формирования следующей партии. В случае если предыдущие узлы могут предоставить потребное количество продуктов заданного типа, узел-обработчик захватывает продукты и начинает процесс обработки. В противном случае узел-обработчик входит в режим ожидания продуктов необходимого типа.

Для учета индивидуального технологического цикла для каждого типа продуктов в модели введены узлы-распределители, которые направляют полученный продукт в соответствующую ветвь модели. Ветвь представляет собой совокупность узлов, в пределах которой происходит производство или обработка продуктов одного типа или группы типов.

Заметим, что узлы в различных ветвях модели могут разделять одну и ту же единицу оборудования. После начала работы одного узла происходит блокировка единицы оборудования, что не позволяет другим узлам, разделяющим эту единицу, начать собственный процесс. Таким образом, перед началом работы узел-обработчик, помимо ветви, в которой он находится, учитывает параллельные ветви, в которых находятся узлы, разделяющие с ним единицу оборудования. В связи с выбранной стратегией единицы оборудования резервируются для узлов, которые обрабатывают типы продуктов, экземпляров которых не достает для следующей партии.

Для демонстрации работы представленной модели выбран следующий пример модельного технологического процесса [12] производства заготовок УУКМ (табл. 1). В качестве данных о ресурсах использована следующая гипотетическая информация: длина углеродной ткани составляет 50 м, а ширина 1,5 м; количество углеродной ткани для единицы продукта в зависимости от его типа представлено в таблице 2; количество существующего в цехе оборудования представлено в таблице 3. Схема технологического процесса приведена на рисунке 1. В качестве партии продуктов рассматривался набор из 1 заготовки типа А, 1 заготовки типа В и 1 заготовки типа С.

Таблица 1

Операции, последовательность и загрузка оборудования для производства заготовок

№ п/п	Операция/оборудование	Время работы, ч, для заготовок типа			Максимальное число продуктов, для заготовок типа		
		А	Б	В	А	Б	В
1	Шитье	-	-	20	-	-	1
2	Иглопробивной станок	15	5	-	1	1	-
3	Рентгеноскопическая система контроля	1	1	-	1	1	-
4	Установка для газофазного уплотнения	100	90	60	5	5	2
5	Мехобработка	-	-	8	-	-	1
6	Рентгеноскопическая система контроля	1	5	1	1	1	1
7	Мехобработка	5	1	-	1	1	-
8	Установка высокотемпературной обработки (ВТО)	80	80	-	2	2	-

Таблица 2

Размеры углеродной ткани для единицы продукта

Тип продукта	Длина, м	Ширина
Заготовка типа А	25	1/3 от ширины полотна
Заготовка типа В	10	1/3 от ширины полотна
Заготовка типа С	15	1/1 от ширины полотна

Таблица 3

Количество единиц оборудования

Оборудование/операция	Количество единиц
Иглопробивной станок	1
Шитье	1
Установка для газофазного уплотнения	2
Установка ВТО	2

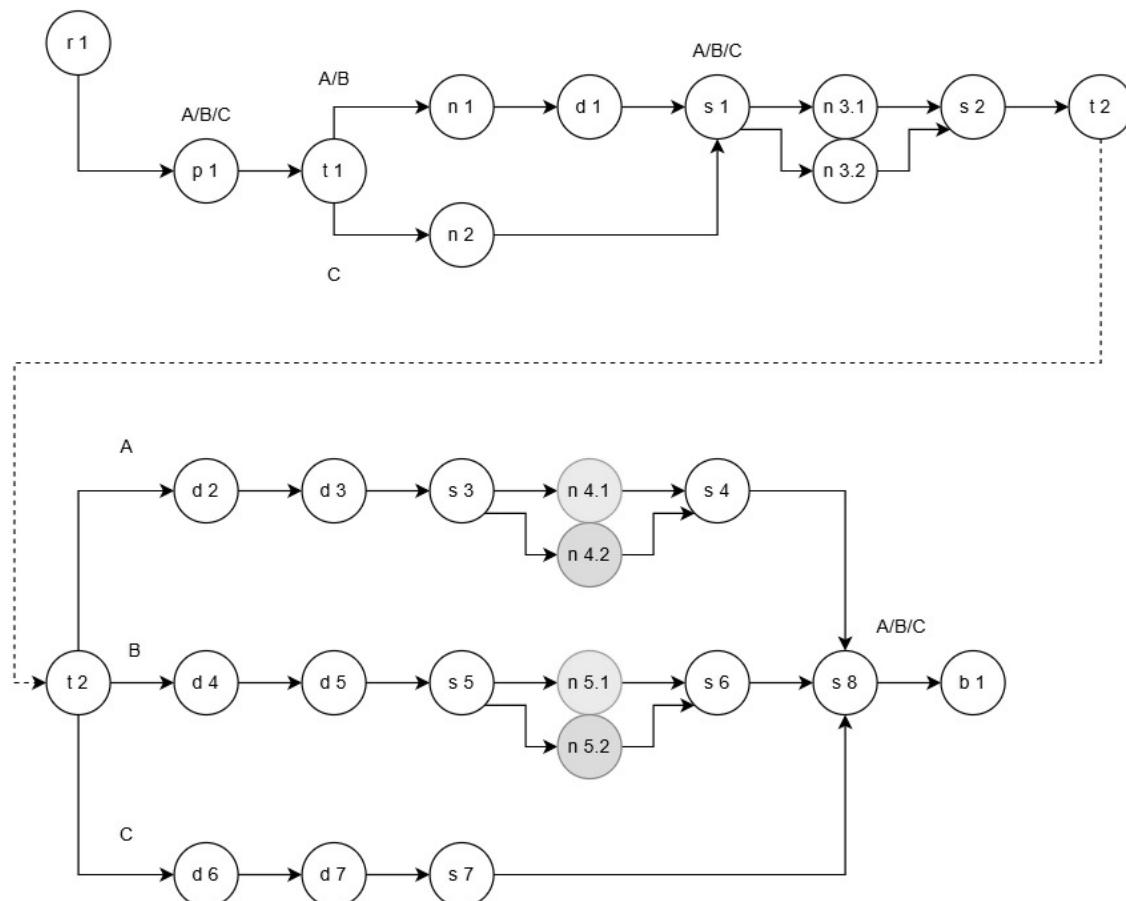


Рис. 1. Процесс, описанный с использованием разработанной модели

На рисунке 1 отражены узлы следующих типов:

- г – узел условно бесконечного источника ресурсов, позволяющего получить потребное количество сырья для всей очереди планов;
- р – узел инициализации продуктов, создающий объекты продуктов при необходимости;
- т – узел распределения продуктов, направляющий продукты в ветви, зависящие от типа этих продуктов;
- н – узел обработки продуктов;
- д – узел рентгенконтроля качества продуктов;
- с – узел временного хранилища продуктов;
- б – узел формирования партий из продуктов.

Работа оборудования на рисунке 1 изображена следующим образом:

- н 1 – иглопробивной станок;
- н 2 – шитье;
- н 3.1 и н 3.2 – 1 и 2 экземпляр установки для газофазного уплотнения соответственно;
- н 4.1 и н 4.2 – 1 и 2 экземпляр установки ВТО соответственно;
- н 5.1 и н 5.2 – 1 и 2 экземпляр установки ВТО соответственно.

Для выбора целевого количества партий в плане проведено исследование зависимости среднего периода изготовления единицы партии (такта) от количества партий в плане. В результате проведенного исследования установлено, что приблизительно с 20-й партии средний период изготовления единицы партии от количества партий в плане не зависит и выходит на асимптоту. В связи с этим принято решение исследовать поведение модели и ее результаты с планом изготовления 20 партий.

Для удобства отображения на графиках введены следующие обозначения оборудования: иглопробивной станок – I, шитье – II, установки для газофазного уплотнения № 1 и № 2 – III и IV соответственно, установка ВТО № 1 и № 2 – V и VI соответственно.

На рисунках 2–4 представлены примеры зависимостей количества заготовок заданного типа от времени. Кривые графиков соответствуют изменению количества заготовок в буферных хранилищах. Метки под кривыми соответствуют моментам начала и конца работ единиц оборудования.

В результате моделирования установлено, что процесс изготовления заготовок УУКМ по выбранному плану длится 43 дня с момента начала работ. При этом обращает на себя внимание то обстоятельство, что из-за необходимости одновременной обработки значительного количества единиц полуфабрикатов в установках для газофазного уплотнения необходимо формирование и накопление на складе партий материала, выходящих с производства одновременно, что нарушает ритмичность. Этот же фактор приводит и к необходимости накопления на складах готовых полуфабрикатов перед процессом высокотемпературной обработки.

Также с использованием разработанной модели исследована зависимость длительности процесса изготовления заготовок УУКМ по выбранному плану от количества единиц оборудования. Результаты этого исследования представлены в таблицах 4 и 5.

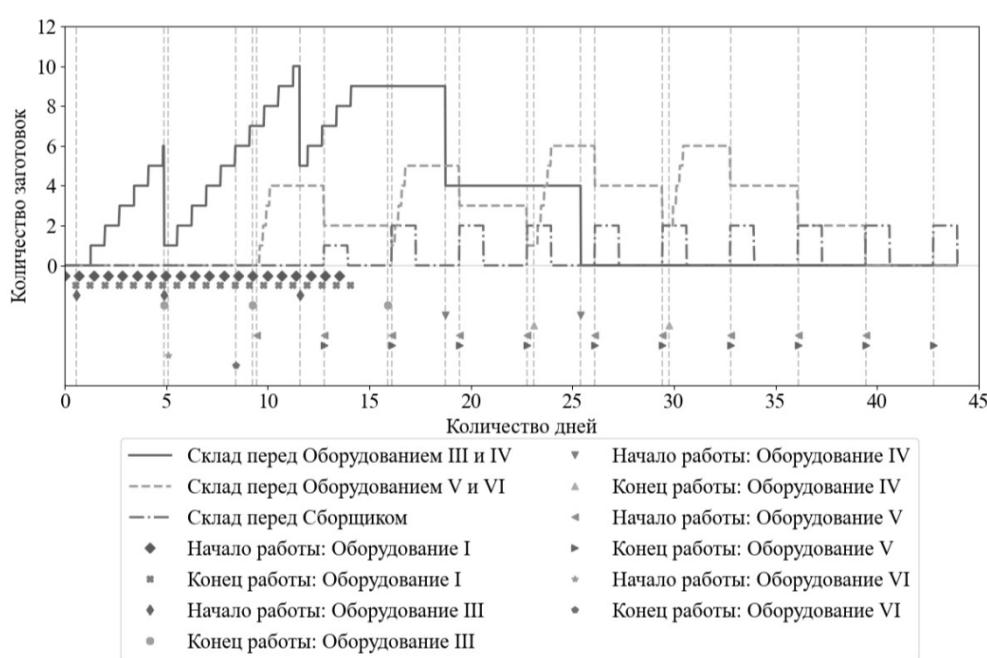


Рис. 2. Цикл производства заготовок типа А

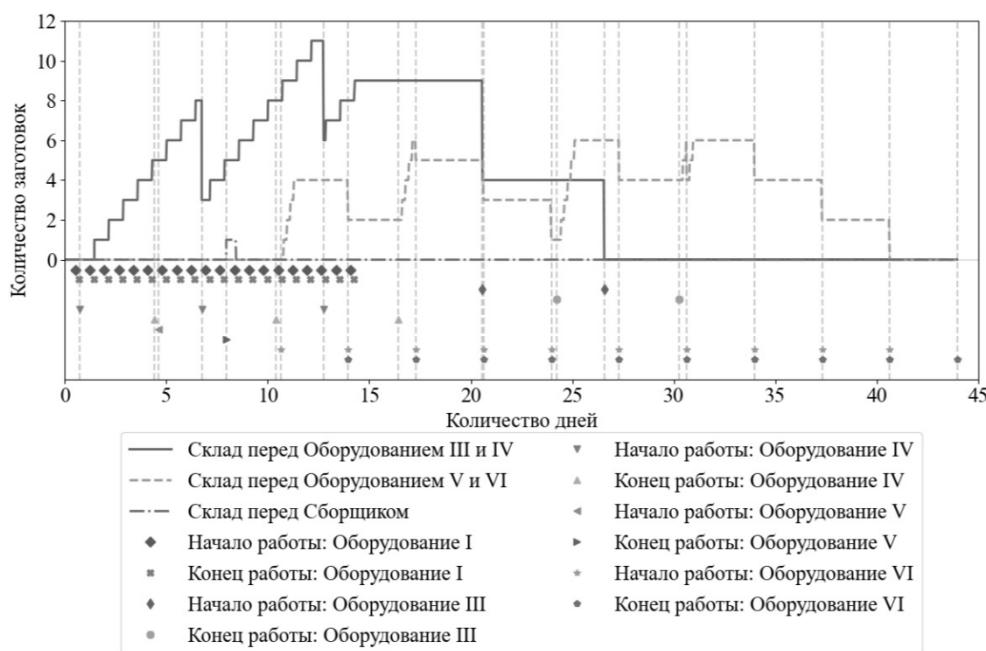


Рис. 3. Цикл производства заготовок типа В

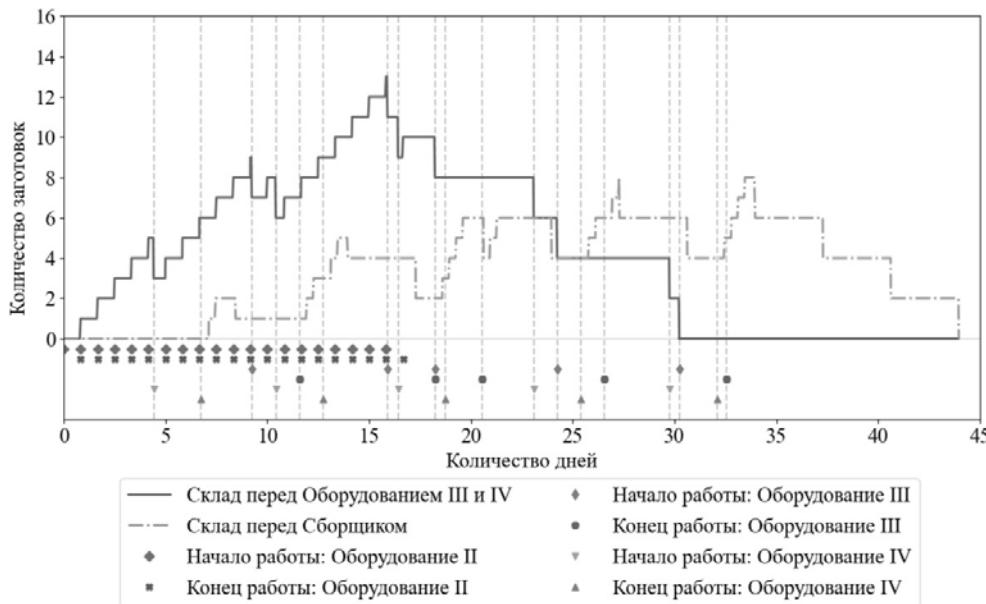


Рис.4. Цикл производства заготовок типа С

Таблица 4

Зависимость длительности процесса изготовления заготовок УУКМ от количества установок для газофазного уплотнения

Количество оборудования	Время работы, дни
1	63
2	43
3	41
4	41

Таблица 5

Зависимость длительности процесса изготовления заготовок УУКМ от количества установок ВТО

Количество оборудования	Время работы, дни
1	77
2	43
3	37

Как видно из данных, представленных в таблицах 4 и 5, наибольшее влияние на длительность процесса изготовления заготовок оказывает количество установок ВТО, следовательно, можно сделать вывод, что именно этот тип оборудования и является «узким местом», так как за него конкурируют заготовки нескольких типов. Было бы логичным в этом случае предположение о необходимости введения дополнительных единиц установок ВТО, однако даже при увеличении этого количества в 3 раза выигрыш по времени изготовления заготовок не превышает 20 % при существенном удорожании технологического процесса.

Отдельно стоит отметить, что при сопоставимом с установками ВТО времени работы, но существенно большем объеме загрузки, количество установок для газофазного уплотнения, большее трех единиц, при выбранном количестве остального оборудования не влияет на длительность процесса изготовления заготовок.

Также установлено, что влияние количества единиц оборудования иглопробивного станка и шитья на длительность процесса изготовления заготовок УУКМ по выбранному плану незначительно.

Таким образом, анализ подбора параметров модели показывает, что из-за различной производительности оборудования, применяемого на каждой стадии технологического процесса, для минимизации влияния узких мест

производственного цикла с учетом стоимости единицы оборудования необходимо придерживаться соотношения наличных единиц этого оборудования, приведенного в таблице 5.

Наличие различных видов одновременно изготавливаемых заготовок материалов требует формулирования стратегии выбора порядка их изготовления при наличии конкуренции за единицы оборудования. Поскольку в работе рассмотрена ситуация комплектной поставки заготовок, наиболее целесообразной является стратегия, связанная с максимизацией выпуска именно количества комплектов за небольшие промежутки времени. Таким образом, выбор способа загрузки оборудования зависит от того, каких единиц заготовок недостаточно для формирования комплектов. Также необходимо заметить, что для операций, расположенных в середине технологического процесса, количество заготовок каждого вида следует определять на стадиях, непосредственно за ними следующих.

При возникновении вновь создаваемых заданий на изготовление партий какой-то конкретной заготовки УУКМ их изготовление может проходить с повышенным приоритетом.

С целью демонстрации перестройки модели технологического процесса при изменении очереди планов (рис. 7–9), на 18 дне в исходную модель введен новый более приоритетный план, требующий 15 партий, каждая из которых состоит из одной заготовки типа А.

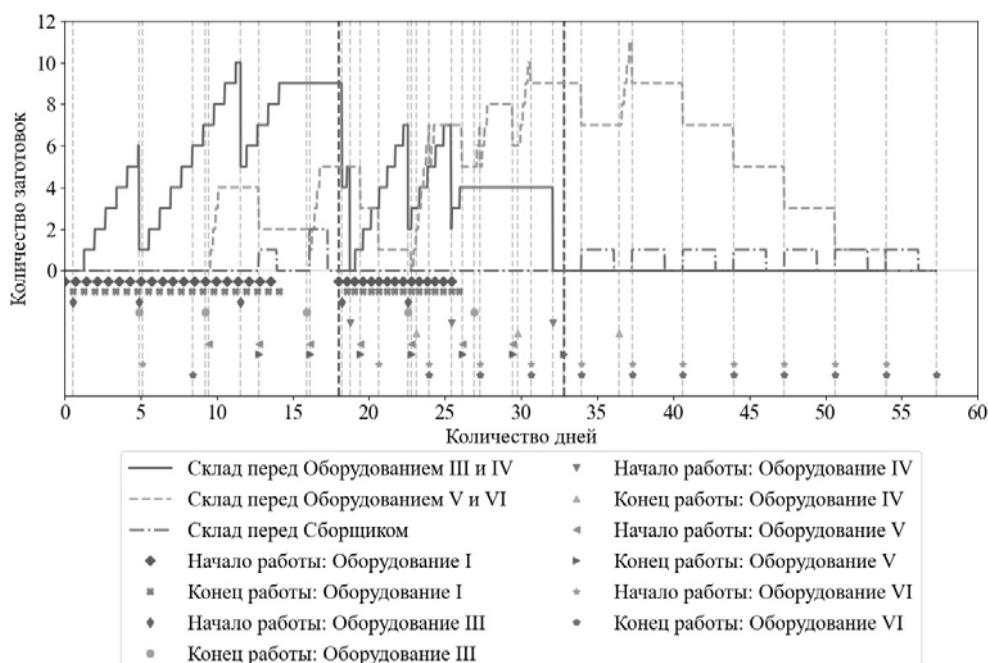


Рис. 7. Измененный цикл производства заготовок типа А

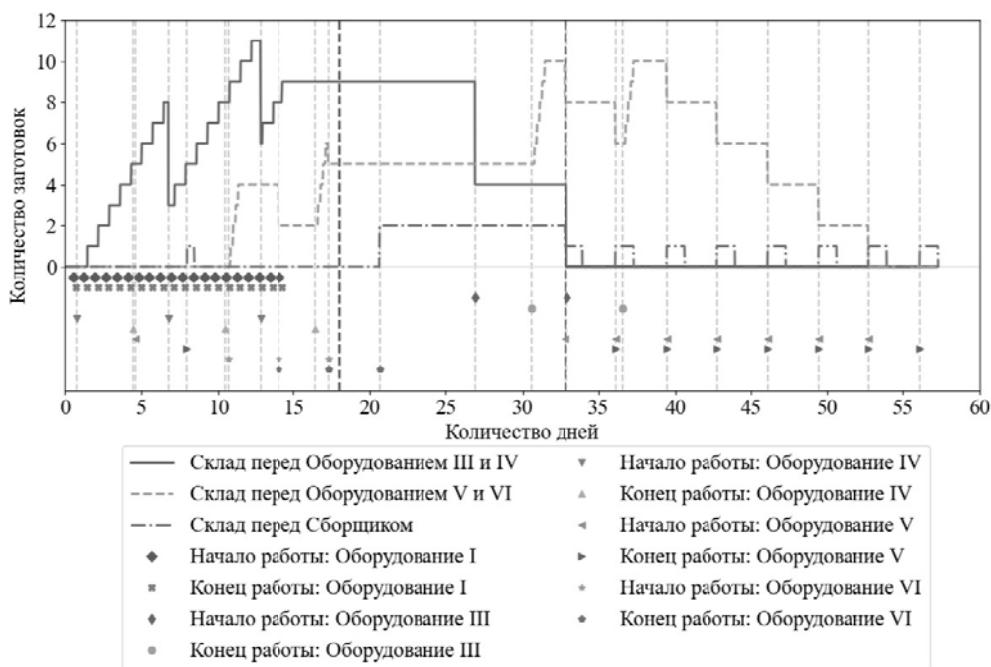


Рис. 8. Измененный цикл производства заготовок типа В

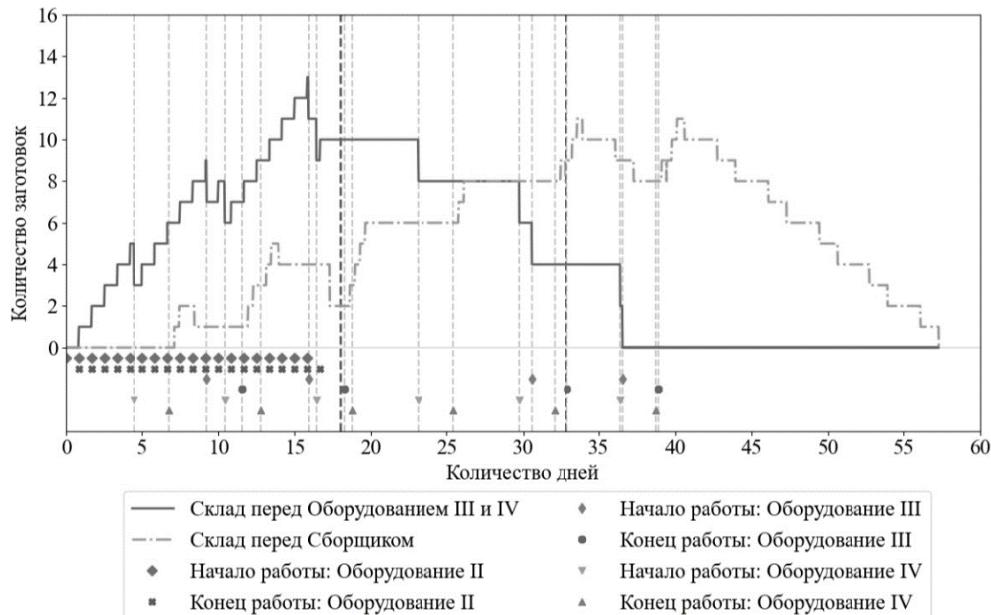


Рис. 9. Измененный цикл производства заготовок типа С

Как видно из рисунков 7–9, введение более приоритетного плана изготовления заготовок вносит существенные изменения в технологический процесс производства в целом, что негативно влияет на его выполнение. Для снижения степени этого влияния необходимо создание резервных полуфабрикатов каждой степени готовности, что повышает устойчивость производства в целом, сокращает возможные сроки изготовления продукции по вновь создаваемым заказам, снижает риски срыва сроков в случае выхода из строя отдельных единиц оборудования и перебоев с поставками сырья и оснасток. Создавать такие резервы целесооб-

разно в условиях подготовки производства до выхода на ритмичность и восстанавливать по мере возможности.

В работе предложена имитационная модель производственной линии по изготовлению УУКМ с осесимметричной схемой армирования и комбинированной матрицей. С использованием численного моделирования исследована зависимость длительности технологического процесса от сочетания количества различных типов оборудования, выявлены его «узкие места» и определено количество единиц оборудования, применяемого на каждой стадии технологического процесса, позволяющее минимизировать

влияние «узких мест» на производственный цикл с учетом стоимости единицы оборудования. Также на примере наличия более приори-

тетного плана производства проиллюстрирована перестройка модели технологического процесса при изменении очереди планов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Morgan P. Carbon Fibers and their Composites. Boca Raton : CRC Press, 2005. 1131 p.
2. Модель внутренних напряжений в заготовках углерод-углеродных композиционных материалов на основе иглопробивных каркасов, изготовленных методом намотки ткани / И. В. Магнитский, М. В. Магнитская, Д. А. Цветков, М. А. Любченко, С. В. Палочкин // Технологии и качество. 2024. № 4. С. 47–54.
3. Соколов Ю. А., Гусев С. А. Производственные системы с цифровым двойником // Металлообработка. 2020. № 5-6. С. 53–67.
4. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : монография / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина [и др.] ; под ред. А. И. Боровкова. СПб. : Политех-Пресс, 2022. 492 с.
5. Wang Y., Tao F., Zuo Y. Digital-twin-enhanced quality prediction for the composite materials // Engineering. 2023. № 2. P. 23–33.
6. Smith J. K., Dickinson C. Discrete-event simulation and machine learning for prototype composites manufacture lead time predictions // Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. Singapore, 2022. P. 1695–1706
7. Steringer R., Zorrer H., Zambal S., Eitzinger C. Using discrete event simulation in multiple system life cycles to support zero-defect composite manufacturing in aerospace industry // IFAC Papers On Line. 2019. Vol. 52, no 13. P. 1467–1472.
8. A hierarchical composite framework of parallel discrete event simulation for modelling complex adaptive systems / F. Zhu, Y. Yao, W. Tang, J. Tang // Simulation modelling practice and theory. 2017. No 77. P. 141–156.
9. Lapuente G. A., Avinzano P. M., Castillo M. P. L. Methodologies in digital twin for manufacturing industry: A systematic literature review // Future generation computer systems. 2025. No 174. URL: [https://www.researchgate.net/publication/393424086\\_Methodologies\\_in\\_digital\\_twin\\_for\\_manufacturing\\_industry\\_A\\_systematic\\_review](https://www.researchgate.net/publication/393424086_Methodologies_in_digital_twin_for_manufacturing_industry_A_systematic_review) (дата обращения: 10.09.2025).
10. РД IDEF 0 – 2000. Методология функционального моделирования IDEF0 : руководящий документ. М. : Госстандарт России, 2000. 75 с.
11. Бритов Г. С. Метод формального описания PFDD-диаграмм IDEF3-технологии // Моделирование систем и процессов. 2014. № 2. С. 25–32.
12. Бушуев В. М., Мусин Р. К., Синани И. Л. Закономерности пироуплотнения тканопрошивных углеродных каркасов в термоградиентном режиме для изготовления герметичных конструкций // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 1. С. 125–130.

## REFERENCES

1. Morgan P. Carbon Fibers and their Composites. Boca Raton, CRC Press, 2005. 1131 p.
2. Magnitsky I. V., Magnitskaya M. V., Tsvetkov D. A., Lyubchenko M. A., Palochkin S.V. Model of internal stress in blanks of carbon-carbon composite materials based on needle-punched frameworks manufactured by the fabric winding method. *Tehnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2024;4(66):47–54. (In Russ.)
3. Sokolov Y. A., Gusev S. A. Industrial systems with digital twin. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2020;5-6:53–67. (In Russ.)
4. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A., Shcherbina L. A. et al. Digital twins in the high-technology manufacturing industry. Saint-Peterburg, POLITECH-PRESS Publ., 2022. 492 p. (In Russ.)
5. Wang Y., Tao F., Zuo Y. Digital-twin-enhanced quality prediction for the composite materials. Engineering. 2023;2:23–33.
6. Discrete-event simulation and machine learning for prototype composites manufacture lead time predictions. Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference. Singapore, 2022. P. 1695–1706.
7. Steringer R., Zorrer H., Zambal S., Eitzinger C. Using discrete event simulation in multiple system life cycles to support zero-defect composite manufacturing in aerospace industry. IFAC Papers On Line. 2019;52,13:1467– 472.

8. Zhu F., Yao Y., Tang W., Tang J. A hierarchical composite framework of parallel discrete event simulation for modelling complex adaptive systems. *Simulation modelling practice and theory.* 2017;77: 141–156.
9. Lapuente G. A., Avinzano P. M., Castillo M. P. L. Methodologies in digital twin for manufacturing industry: A systematic literature review. *Future generation computer systems.* 2025;174. URL: [https://www.researchgate.net/publication/393424086\\_Methodologies\\_in\\_digital\\_twin\\_for\\_manufacturing\\_industry\\_A\\_systematic\\_literature\\_review](https://www.researchgate.net/publication/393424086_Methodologies_in_digital_twin_for_manufacturing_industry_A_systematic_literature_review) (дата обращения: 10.09.2025).
10. RD IDEF 0 – 2000. Metodologiya funkcnal'nogo modelirovaniya IDEF0. Moscow, Gosstandart Rossii, 2000. 75 p. (In Russ.)
11. Britov G. S. A method for formally describing IDEF3-technology PFDD diagrams *Modelirovanie sistem i processov* [Modeling of systems and processes]. 2014;2:25–32. (In Russ.)
12. Bushuev V. M., Musin R. K., Sinani I. L. Patterns of pyro-sealing of fabric-stitched carbon frames in a thermogradient mode for the manufacture of hermetic structures. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region]. 2012;1:125–130. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.10.2025

Принята к публикации 07.11.2025

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

И. В. Магнитский, кандидат технических наук, доцент

Е. С. Сергеева, кандидат физико-математических наук

В. В. Кулев, инженер

С. В. Палочкин, доктор технических наук, профессор