

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.942:621.9.06

doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-31-40

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЗАГОТОВКИ ДЕТАЛИ ТИПА «ВАЛИК» ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

Петр Юрьевич Бочкарев^{1✉}, Андрей Борисович Долгов², Александр Анатольевич Никифоров³

¹ Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградский государственный технический университет, Камышин, Россия

² Конструкторское бюро промышленной автоматики, Саратов, Россия

³ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

¹ bpy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

² andrdolgov@mail.ru

³ ieei_director@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3879-5457>

Аннотация

Цель исследования: разработка методики формализованного описания заготовки с производственной стороны на основе графоаналитического представления размерно-точных связей между поверхностями для последующего создания цифрового двойника.

Задача, решению которой посвящена статья: устранение проблемы неполноты исходной информации и недостаточной детализации проектных решений при технологической подготовке производства, связанной с экспертным характером принятия решений и высокой трудоёмкостью обработки конструкторских данных.

Использованные методы и конструкторско-технологические решения: применены теория графов, системный анализ технологических процессов, методы формализации геометрической структуры детали, последовательное выделение элементарных поверхностей с их кодированием, построение графов размерных связей с внесением размерных характеристик, параметров шероховатости, отклонений формы, взаимного расположения, данных о базах и физико-механических свойствах поверхностного слоя.

Новизна работы: предложена оригинальная методика формализованного описания детали как объекта производства, обеспечивающая наглядное отображение взаимосвязей между поверхностями в объёме, превышающем информацию, представленную на чертеже; графовая модель адаптирована для использования в алгоритмической среде и ориентирована на создание цифрового двойника заготовки.

Результаты и выводы: построены графовые модели для двух вариантов заготовки детали типа «Валик» (калиброванный прокат и горячая штамповка); показано, что модель сохраняет структуру при изменении числовых значений размеров, но реагирует на изменение способов простановки размеров и выбора конструкторских баз; установлена пригодность метода для выявления технологической наследственности, обоснования требований к базовым поверхностям и автоматизированного выбора заготовок; подтверждена возможность интеграции разработанной модели в системы автоматизированного проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: двойник, граф, подготовка, производство, анализ, технологические базы, метод.

Ссылка для цитирования:

Бочкарев П.Ю. Разработка методики графоаналитического описания заготовки детали типа «валик» для создания цифрового двойника в технологической подготовке производства / П.Ю. Бочкарев, А.Б. Долгов, А.А. Никифоров // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 7. – С. 31-40. doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-31-40.

Original article

Open Access Article

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR GRAPHOANALYTICAL DESCRIPTION OF THE WORKPIECE OF A ROLLER-TYPE PART FOR CREATING A DIGITAL TWIN IN PRODUCTION PLANNING

Petr Yuryevich Bochkarev^{1✉}, Andrey Borisovich Dolgov², Aleksandr Anatolyevich Nikiforov³

¹ Kamyshin Technological Institute (branch of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia)

² Design Bureau of Industrial Automation, Saratov, Russia

³ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

¹ bpy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

² andrdolgov@mail.ru

³ ieei_director@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3879-5457>

Abstract

The study objective is to develop a technique for a formalized description of a workpiece for the production based on a graphoanalytical representation of dimensional relationships between surfaces for the subsequent creation of a digital twin.

The task to which the paper is devoted is to eliminate the problem of incompleteness of initial information and insufficient details of design decisions during production planning, related to the expert nature of decision-making and the high complexity of processing design data.

Methods used and design and technological solutions: graph theory, system analysis of engineering processes, methods for formalizing the geometric structure of a part, sequential selection of elementary surfaces with their coding, construction of graphs of dimensional relationships with the introduction of dimensional characteristics, roughness parameters, shape deviations, relative position, database data and physical and mechanical properties of the surface layer.

The novelty of the work: an original method of formalized description of a part as an object of production is proposed, which provides a visual representation of the relationships between surfaces in the form exceeding the information presented in the drawing; the graph model is adapted for use in an algorithmic environment and is focused on creating a digital twin of the workpiece.

Results and conclusions: graph models are constructed for two variants of the "roller" workpiece (calibrated rolled products and hot stamping); it is shown that the model retains its structure when numerical size values change, but reacts to changes in sizing methods and design bases; the suitability of the method is found out for identifying technological heredity, substantiating the requirements for basic surfaces and automated selection of workpieces; the possibility of integrating the developed model into computer-aided process design systems is confirmed.

Keywords: twin, graph, preparation, production, analysis, technological bases, method.

Reference for citing:

Bochkarev PYu, Dolgov AB, Nikiforov AA. Development of a technique for graphoanalytical description of the workpiece of a roller-type part for creating a digital twin in production planning. *Transport Engineering*. 2026;7:31-40. doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-31-40.

Введение

В ходе технологической подготовки современного машиностроительного производства исходными данными служат конструкторские чертежи. Они содержат информацию о геометрии детали, её линейных и угловых размерах, полях допусков, параметрах шероховатости, требованиях к ориентации и расположению поверхностей, а также о физико-механических характеристиках материала. На традиционных чертежах взаимосвязи между поверхностями прописаны не в явном виде - они скрыты в размерных цепочках, указании баз и технических примечаниях. С точки зрения организации производства ключевыми выступают два вида

баз: конструкторские и технологические. На практике эти базы зачастую не совпадают, поэтому часто приходится вводить дополнительные технологические базы. Для структурирования параметров детали эффективно применять аппарат теории графов. В такой модели поверхности становятся вершинами, а размерные и точностные связи между ними – рёбрами. Подобный подход позволяет перейти от проектирования, основанного на интуиции и опыте эксперта, к формализованным и алгоритмизируемым процедурам, что критически важно при разработке цифровых двойников изделий.

Актуальность задачи связана с разрывом между реальной сложностью современных деталей и сборочных единиц, с одной стороны, и недостатком структурированной информации на этапе технологической подготовки производства - с другой. Данные, извлечённые из чертежей и объёмных моделей, часто бывают неполными, несистематизированными и требуют серьёзной доработки со стороны технолога. Как следствие - высокая трудоёмкость подготовки производства, ошибки при выборе технологических баз, назначении последовательности обработки и расчёте припусков, вызванные субъективными решениями. Недостаточная детализация проектных решений на ранних этапах порождает многовариантность, которую крайне сложно оценить количественно. Особенно остро эта проблема проявляется в условиях частой смены номенклатуры, характерной для гибких производственных систем. Таким образом, существует актуальная научно-практическая задача: создать формализованное описание детали и заготовки, которое наглядно отражало бы все размерно-точностные связи между поверхностями, поддавалось машинной обработке и могло служить ядром цифрового двойника.

Материалы и методы

Для достижения цели исследования и решения поставленных задач была разработана последовательная методика экспериментальной работы, включающая шесть основных этапов. На первом этапе выбран объект исследования (деталь типа «Валик») и два типовых варианта получения заготовки (калиброванный прокат и горячая штамповка), что обеспечивает репрезентативность результатов. Второй этап посвящен формализации геометрической структуры детали и выделению элементарных поверхностей с их кодированием - это необходимо для перехода от сплошного чертежа к дискретной модели. На третьем этапе с применением теории графов

Цель настоящей работы - разработка методики формализованного описания заготовки с производственной стороны на основе графоаналитического представления размерно-точностных связей между поверхностями. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: выделение и кодирование элементарных поверхностей детали типа «Валик»; построение графовых моделей для двух вариантов заготовки (калиброванный прокат и горячая штамповка); насыщение моделей информацией о размерах, допусках, шероховатости, отклонениях формы, взаимном расположении, базах и свойствах поверхностного слоя. В работе также проверяется, как предложенная графовая модель реагирует на изменение способов простановки размеров и выбор конструкторских баз, и обосновывается её пригодность для выявления технологической наследственности и автоматизированного выбора заготовок. В качестве объекта исследования выбрана деталь типа «Валик» с операцией фрезерной обработки, что позволяет на конкретном примере продемонстрировать все этапы предлагаемой методики.

строится граф размерных связей и обоснованно выбирается начальная вершина (технологическая установочная база). Четвертый этап представляет собой информационное насыщение графа в строго определенной последовательности: от размерных характеристик до физико-механических свойств поверхностного слоя. Пятый этап предназначен для проверки методики путем построения графовых моделей для двух вариантов заготовок и сравнения их. Шестой этап - это анализ полученных графов и сведение в таблицу полученных результатов. Таким образом представленные этапы позволяют оценить каждый шаг. Рассмотрим все этапы ниже.

Этап 1. Выбор объекта и исходных данных

В качестве объекта выбрана деталь типа «Валик» (рис. 1). Для его изготовления предложено два варианта заготовки.

Первый вариант - калиброванный прокат по ГОСТ 1051–73 (рис. 2), второй вариант - горячая штамповка (рис. 3).

Исходная информация берётся с чертежа - это размеры, допуски, требования к шероховатости и взаимному расположению поверхностей. Это обеспечивает ре-

презентативность работы и позволяет в дальнейшем экстраполировать результаты на весь класс типа тел вращения.

Этап 2. Выделение элементарных поверхностей

На втором этапе последовательного выделяются элементарные поверхности. Каждой поверхности присваивается порядковый номер и код типа в соответствии с известным классификатором [5, 6]. Выбор этого метода обоснован необходимостью перейти от сплошного геометриче-

ского описания детали к дискретному структурированному виду, пригодному для построения графа. Без такого выделения невозможно формализовать размерно-точностные связи, поскольку чертёж задаёт их неявно.

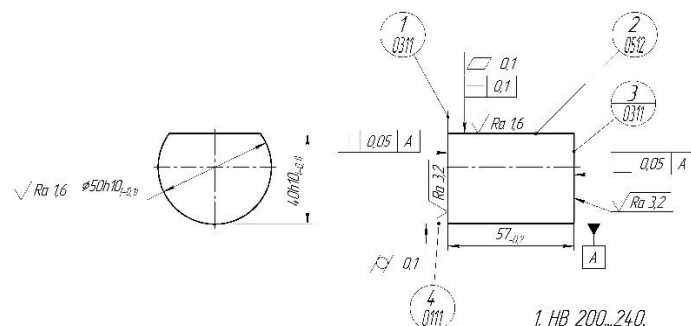


Рис. 1. Деталь «Валик»
Fig. 1. Roller part

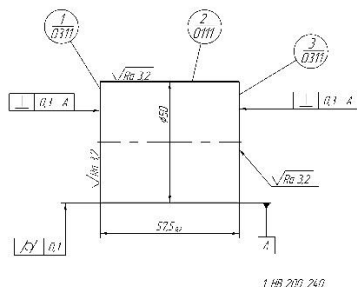


Рис. 2. Заготовка детали «Валик» (прокат)
Fig. 2. Preparation of Roller part (rolling)

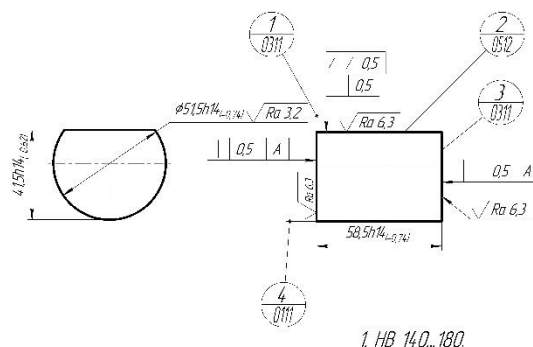


Рис. 3. Заготовка детали «Валик» (штамповка)
Fig. 3. Roller part workpiece (stamping)

Этап 3. Построение графа размерных связей и выбор начальной вершины

Для построения графа применена теория графов, которая является общепринятым аппаратом формализации связей между элементами сложных систем. Вершинами графа служат элементарные поверхности, рёбрами - размерные и точностные связи между ними. Начальная вершина выбирается с учётом правила технологической подготовки производства: в первую очередь обрабатываются поверхности, которые будут использовать-

ся как технологические установочные базы. В рассмотренных примерах это поверхности, контактирующие с оборудованием при первой операции. Данный подход позволяет получить ориентированный граф, направление рёбер в котором указывает последовательность обработки. Обоснование выбора именно такой начальной вершины: она задаёт «точку отсчёта» для всего маршрута обработки, что соответствует принципу единства баз.

Этап 4. Информационное насыщение графовой модели

Граф насыщается данными в строго определённой последовательности (шесть шагов), которая диктуется логикой технологического проектирования: сначала вносятся размерные характеристики, затем параметры качества поверхности (шероховатость), далее - отклонения формы, взаимное расположение, базы и, наконец, физико-механические свойства поверхностного слоя. Такая иерархия обоснована тем, что каждый последующий параметр уточняет или ограничивает предыдущий.

Например, требование к взаимному расположению поверхностей может быть выполнено только при известных размерах, а физико-механические свойства влияют на выбор режимов резания уже после того, как определена геометрия. Использование именно шестиуровневого насыщения обеспечивает полноту описания, достаточную для последующего автоматизированного принятия технологических решений. На рис. 4 представлен граф детали «Валик».

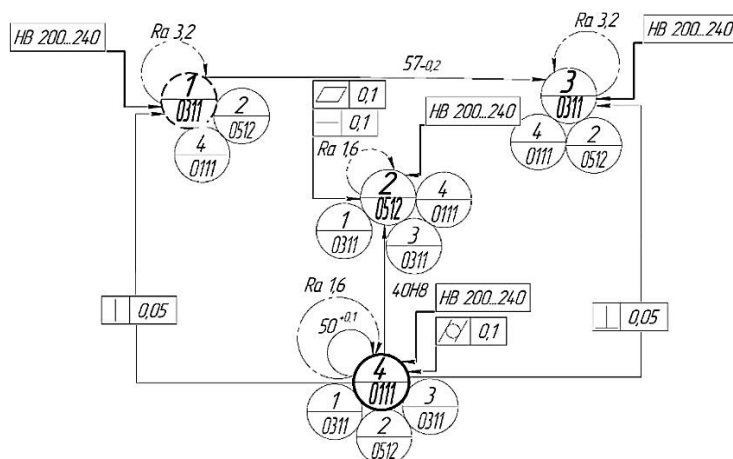


Рис. 4. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Валик», насыщенный конструкторско-технологической информацией

Fig. 4. Graph of dimensional relationships between elementary surfaces of Roller part, filled with design and engineering information

Этап 5. Экспериментальная проверка на двух вариантах заготовок

Для проверки валидности методики построены две графовые модели: для заготовки из калиброванного проката (рис. 5) и для заготовки, полученной горячей штамповкой (рис. 6). Сравнение этих моделей позволяет оценить, как метод реагирует на изменение технологического наследия (разные исходные точностные и размерные характеристики). Выбор именно двух кон-

трастных методов получения заготовки (прокат с минимальными припусками и штамповка с формоизменением) обоснован необходимостью проверить робастность методики - её способность сохранять структуру при изменении числовых значений размеров, но реагировать на изменения в способах простановки размеров и выборе конструкторских баз.

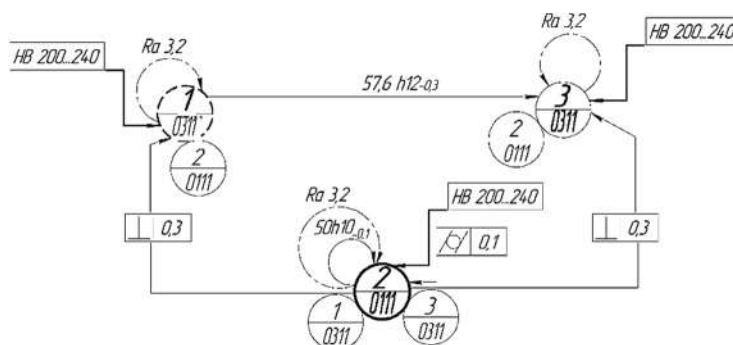


Рис. 5. Граф размерных связей между элементарными поверхностями заготовки детали «Валик» (прокат)
Fig. 5. Graph of dimensional relationships between the elementary surfaces of Roller part workpiece (rolling)

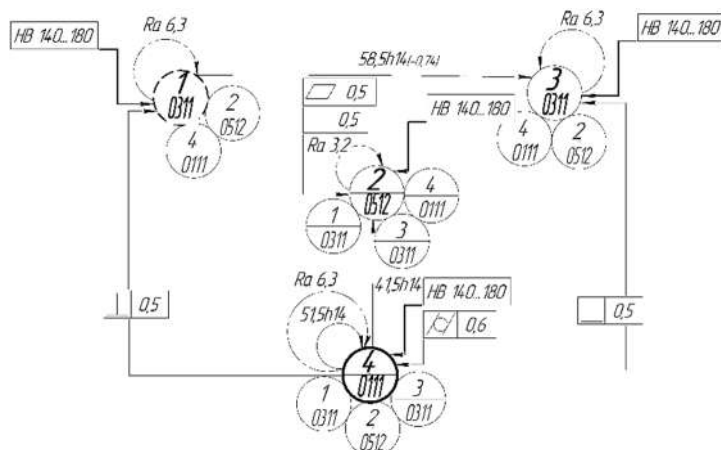


Рис. 6. Граф размерных связей между элементарными поверхностями заготовки детали «Валик» (штамповка)
Fig. 6. Graph of dimensional relationships between the elementary surfaces of Roller part workpiece (stamping)

Этап 6. Сборка результатов в таблицу и анализ связей

Результаты по каждому типу поверхности сведены в таблицу, где сопоставлены качество точности, форма и расположение, шероховатость и твердость для заготовки и для готовой детали. Такой табличный формат выбран для наглядного выявления технологической наследственности - переноса погрешностей и свойств с заготовки на деталь. Анализ графов и таблицы выполнен с использованием систем-

ного подхода, позволяющего выявить не только прямые, но и опосредованные связи (например, влияние точности базовой поверхности на точность обрабатываемой). Применение системного анализа в данном контексте обосновано тем, что деталь рассматривается не как изолированный набор поверхностей, а как целостный объект производства с внутренними взаимозависимостями.

Сводная информация конструкторско-технологических параметров детали
Summary of the design and engineering parameters of the part
Table

Код вида поверхности	Обработанная поверхность				Заготовка			
	Квалитет точности	Форма и расположения поверхностей	Шероховатость	Твердость	Квалитет точности	Форма и расположения поверхностей	Шероховатость	Твердость
Размерно-точные параметры детали и заготовки полученной из проката								
0111	h10	отклон. от цилиндрич. 0,1	Ra 3,2	HB 200.. 240	h10	отклон. от цилиндрич. 0,1	Ra3, 2	HB 200.. 240
0512	h10	плоскост. 0,1 прямолин. 0,1	Ra 1,6	HB 200.. 240	h10	отклон. от цилиндрич. 0,1	Ra3, 2	HB 200.. 240
0311	h10	отклон. от перпендикуляр. 0,05	Ra3,2	HB 200.. 240	h12	отклон. от перпендикуляр. 0,3	Ra3, 2	HB 200.. 240
Размерно-точные параметры детали и заготовки полученной методом штамповки								
0111	h10	отклон. от цилиндрич. 0,1	Ra 3,2	HB 200.. 240	14	отклон. от цилиндрич. 0,6	Ra6, 3	HB 140... 180
0512	h10	плоскост. 0,1 прямолин. 0,1	Ra 1,6	HB 200.. 240	14	отклон. от перпендикуляр. 0,5	Ra6, 3	HB 140... 180
0311	h10	отклон. от перпендикуляр. 0,05	Ra3,2	HB 200.. 240	14	отклон. от перпендикуляр. 0,5	Ra6, 3	HB 140... 180

Общее обоснование методологического инструментария

В целом методологический инструментарий работы включает: теорию графов (для формализации структуры), системный анализ (для выявления связей и наследственности), методы формализации геометрической структуры (для выделения поверхностей), а также классификаторы поверхностей [5, 6] и справочные данные по точности и шероховатости. Все эти методы являются стандартными для техноло-

гической подготовки производства и цифровизации машиностроения [1–9], что обеспечивает воспроизводимость результатов. Их совокупное применение именно в описанной последовательности направлено на решение главной задачи - создание формализованной модели, которая может быть интегрирована в САПР ТП и служить основой для цифрового двойника заготовки.

Обсуждение

Разработанная методика графоаналитического представления размерно-точных связей поверхностей заготовки продемонстрировала устойчивую работоспособность на примере детали типа «Валик» для двух различных типов заготовок – калиброванного проката и горячей штамповки. Полученные графовые модели подтвердили основную гипотезу исследования: формализованное описание детали в виде ориентированного графа с насыщенными вершинами и рёбрами позволяет перейти от неявного, экспертно-зависимого анализа чертежа к структурированному, алгоритмизируемому представлению, пригодному для машинной обработки.

Сравнение графов для проката и штамповки показывает, что топология графа (состав вершин и принципиальные связи между элементарными поверхностями) сохраняется при изменении числовых значений размеров, допусков и припусков. Однако содержательное наполнение рёбер и вершин существенно различается: меняются качества точности, шероховатости, твёрдость поверхностного слоя, а также характер размерных цепей. Это означает, что предложенная модель чувствительна именно к технологическому наследию заготовки, что является её достоинством при автоматизированном выборе варианта заготовки.

Особого внимания заслуживает поведение графовой модели при изменении способов простановки размеров и выбор конструкторских баз. В ходе работы уста-

новлено, что при переносе размеров с одних поверхностей на другие или смена конструкторской базы приводят к переориентации рёбер графа. Это свойство позволяет использовать цифровой двойник не только для описания детали, но и для создания многовариантного маршрута обработки детали, что выгодно отличает данную методику от традиционных чертежей, не содержащих технологических связей в явном виде.

На основании результатов получены выводы:

- модель наглядно показывает, какие погрешности формы, расположения и свойств поверхностного слоя переходят с заготовки на деталь, а какие – устраняются механической обработкой;

- граф может служить основой для обоснования требований к базовым поверхностям, поскольку начальная вершина графа (технологическая установочная база) задаёт всю последующую логику обработки.

Таким образом, предложенная методика занимает промежуточное положение между известными подходами (классические графы размерных связей, системы кодирования поверхностей) и полноценным цифровым двойником, интегрирующим также физические и управляющие модели. Полученные результаты согласуются с работами [1, 4, 5, 9, 11] и развивают их в сторону большей алгоритмической готовности.

Заключение

В результате выполнения настоящего исследования достигнута поставленная цель – разработана и экспериментально апробирована методика формализованного описания заготовки на основе графоаналитического представления размерно-точностных связей между поверхностями, пригодная для создания цифрового двойника.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Предложена оригинальная методика последовательного преобразования конструкторской документации в графовую модель, включающая шесть этапов: выбор объекта, выделение и кодирование элементарных поверхностей, построение графа размерных связей с выбором начальной вершины, шестиуровневое информационное насыщение (размеры → шероховатость → отклонения формы → взаимное расположение → базы → физико-механические свойства), экспериментальную проверку и табличный анализ. Методика отличается от известных аналогов [4–6] комплексным учётом не только размерных, но и точностных, базирующих и структурных характеристик поверхностного слоя.

2. Построены и сопоставлены графовые модели для двух вариантов заготовки детали «Валик» (калиброванный прокат и горячая штамповка). Экспериментально подтверждено, что модель сохраняет топологическую структуру при изменении числовых значений размеров, но закономерно изменяет содержание рёбер и вершин при смене способа простановки размеров, выборе конструкторских баз и типа заготовки. Это доказывает её чувствительность именно к технологически значимым параметрам.

3. Установлена пригодность методики для решения трёх прикладных задач

технологической подготовки производства:

- выявление технологической наследственности (перенос погрешностей и свойств с заготовки на деталь);
- обоснование требований к технологическим базам на основе анализа начальной вершины графа;
- автоматизированный сравнительный анализ вариантов заготовок без повторного ручного кодирования.

4. Подтверждена возможность интеграции разработанной графовой модели в системы автоматизированного проектирования технологических процессов. Благодаря дискретному, кодированному представлению поверхностей и явному заданию связей модель может быть реализована в реляционной базе данных или графовой СУБД и использована в качестве информационного ядра цифрового двойника заготовки.

5. Определены направления дальнейших исследований: распространение методики на класс корпусных деталей с разработкой правил агрегирования поверхностей; учёт жёсткостных характеристик технологической системы; создание программного прототипа, автоматически строящего граф по трёхмерной модели детали в формате *STEP* или *Parasolid*.

Таким образом, разработанная методика устраняет ключевое противоречие между сложностью современных деталей и недостаточной формализованностью исходных данных при технологической подготовке производства, обеспечивая наглядное, алгоритмизируемое и насыщенное описание заготовки как объекта производства. Результаты работы могут быть использованы на машиностроительных предприятиях при внедрении систем цифрового двойника и автоматизации процессов механообработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чигиринский Ю. Л. Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства / Ю. Л. Чигиринский // Научные технологии в ма-

шиностроении. 2020. № 8(110). С. 29-35. DOI 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.

2. Справочник технолога / под общей ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

3. Базров Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография. М.: КУРС, 2023. 324 с.
4. Бочкарев П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10-14.
5. Бочкарев П.Ю., Решетникова Е.П. Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 30-36. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-36.
6. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 3 (117). С. 19-25.
7. Митин С.Г., Бочкарев П.Ю., Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве // Инновационная деятельность. 2013 №4 (27). С 36-41
8. Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Цифровизация машиностроительного производ-

ства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39-48

9. Бочкарев, П. Ю. Моделирование цифрового двойника детали на основе размерноточностного описания взаимосвязей поверхностей / П. Ю. Бочкарев, А. Б. Долгов, А. А. Никифоров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2026. № 3(310). С. 14-21. DOI 10.35211/1990-5297-2026-3-310-14-21.
10. Митин, С.Г. Совершенствование технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств при проектировании операций фрезерной обработки : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Митин Сергей Геннадьевич. Саратов, 2009. 188 с.
11. Долгов А.Б. Методология цифрового описания деталей и технологических возможностей оборудования в системе ТПП машиностроительного предприятия / А.Б. Долгов, А.А. Никифоров, П.Ю. Бочкарев // Механика - XXI века : XXV Межрегион. науч.-техн. конф. с междунар. участием : сб. докл. Братск : ФГБОУ ВО «БрГУ», 2026. С. 217-221.

REFERENCES

1. Tchigirinsky JL. Current state and trends in development of technological engineering preproduction. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2020;8(110):29-35. DOI 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.
2. Suslov AG, editor. Technologist's handbook. Moscow: Innovative Mechanical Engineering; 2019.
3. Bazrov BM. Basis of technological preparation of machine-building production: monograph. Moscow: KURS; 2023.
4. Bochkarev YuN. System representation of planning technological processes of mechanical treatment. Tekhnologiya Mashinostroeniya. 2002;1:10-14.
5. Bochkarev YuN, Reshetnikova PN. Work preparation upgrading for machining industries based on an expanded analysis of parts design features. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2023;12(150):30-36. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-36.
6. Reshetnikova EP, Bochkarev PYu. Parts grouping concept of machining production at efficient route formation of engineering process of their manufacturing. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2021;3(117):19-25.
7. Mitin SG, Bochkarev PYu. Innovative aspects of design automation of machining operations in mul-

tiproduct manufacturing. Innovation Activity. 2013;4(27):36-41.

8. Tchigirinsky JL, Krainev DV, Frolov EM. Digitalization of machine-building production: process design, production, tracking. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2022;8(134):39-48.
9. Bochkarev PYu, Dolgov AB, Nikiforov AA. Modeling of digital twin of a part based on a dimensional-precision description of the interrelationships of surfaces. Izvestia VSTU. 2026;3(310):14-21. DOI 10.35211/1990-5297-2026-3-310-14-21.
10. Mitin SG. Improving the technological training of multi-nomenclature machining industries in the design of milling operations [dissertation]. [Saratov (RF)]; 2009.
11. Dolgov AB, Nikiforov AA, Bochkarev PYu. Methodology of digital description of parts and technological capabilities of equipment in CCI system of a machine-building enterprise. Collection of interregional scientific - technical conference with the international participation, 2026: Mechanics to the 21st century; Bratsk: BrSU Federal State Budgetary Educational Institution; 2026.

Информация об авторах:

Бочкарев Петр Юрьевич - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Камышинского технологическо-

го института (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государ-

ственный технический университет», тел. +79272213640, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57189893110, Elibrary.ru Author ID 118281.

Долгов Андрей Борисович – начальник серийно-конструкторского отдела акционерного общества

Bochkarev Petr Yuryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering at Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University; phone: +79272213640; Scopus-Author ID 57189893110, Elibrary.ru Author ID 118281.

«Конструкторское бюро промышленной автоматики».

Никифоров Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, главный конструктор по гражданской продукции акционерного общества «Конструкторское бюро промышленной автоматики».

Dolgov Andrey Borisovich – Head of the Serial Design Department of Design Bureau of Industrial Automation.

Nikiforov Aleksandr Anatolyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Designer for Civil Products of Design Bureau of Industrial Automation.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026; принята к публикации 26.06.2026. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 30.04.2026; approved after review on 03.06.2026; accepted for publication on 26.06.2026. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.