

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 658.512

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-708-719>

Проектирование технологических операций на основе параметров производственной технологичности конструкции изделия с использованием алгоритма автоматизированного проектирования

Дмитрий Александрович Ишенин^{1✉}, Алексей Сергеевич Говорков²^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹ ishenin.dmitriy@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6472-8787>² govorkov_as@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9684-8572>

Резюме. Цель исследования – создание алгоритма для автоматизированного проектирования технологических операций, ориентированного на разработку технологического маршрута механической обработки детали с учетом критериев производственной технологичности, данных предприятия и использованием электронной модели изделия. Была проанализирована структура технологического процесса механической обработки детали с использованием метода «теоретического расчленения». Объектом моделирования явился технологический процесс механической обработки детали «шпангоут». Выявленные формальные параметры легли в основу создания алгоритма автоматизированного проектирования и модели технологического маршрута механической обработки детали, в которых применяются правила продукции, а также аппарат математической логики. В результате проведенных исследований предложена схема подбора технологических операций с учетом параметров технологичности конструкции изделия. Создана концепция алгоритма автоматизированного проектирования технологического процесса изготовления изделий машиностроения с заданным уровнем параметров производственной технологичности и учетом параметров предприятия. Предложен принцип формирования маршрута и выбора технологических операций механической обработки. Выбран ряд критериев производственной технологичности (трудоемкость, материалоемкость, себестоимость изготовления) для оценки технологических операций механической обработки. В результате исследования получен алгоритм автоматизированного проектирования технологических операций с учетом параметров производственной технологичности. Работа алгоритма апробирована на технологическом процессе изготовления детали «шпангоут». Применение разрабатываемого алгоритма позволит предприятиям повысить качество проектируемых технологических процессов производства изделий машиностроения. Кроме того, использование предложенного алгоритма позволит уменьшить трудозатраты и сроки разработки технологического процесса изготовления деталей машиностроения. Формализация процесса проектирования технологического процесса является важным этапом в развитии цифровизации и автоматизации всего производства.

Ключевые слова: проектирование, автоматизация проектирования, технологические операции, технологический процесс механической обработки, технологичность, технологичность конструкции изделия

Для цитирования: Ишенин Д. А., Говорков А. С. Проектирование технологических операций на основе параметров производственной технологичности конструкции изделия с использованием алгоритма автоматизированного проектирования // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 708–719. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-708-719>.

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Engineering working operations based on parameters of product manufacturability using a computer-aided design algorithm

Dmitry A. Ishenin^{1✉}, Alexey S. Govorkov²^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹ ishenin.dmitriy@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6472-8787>² govorkov_as@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9684-8572>

Abstract: The study aimed to develop an algorithm for computer-aided design (CAD) of working operations. A processing route for machining components was developed based on the criteria of production manufacturability, industrial data and a digital model of the product. The process of machining a workpiece was analysed using a method of theoretical separation. The machining process of a frame workpiece was used as a model. The identified formal parameters formed a basis for developing a CAD algorithm and a model of manufacturing route associated with the mechanical processing of a workpiece applying a condition-action rule, as well as mathematical logic. The research afforded a scheme for selecting process operations, given the manufacturability parameters of a product design. The concept of CAD algorithm was developed to design a production process of engineering products with given manufacturability parameters, including industrial data. The principle of forming a route and selecting a machining process was proposed. Several criteria of production manufacturability (labour intensity, consumption of materials, production costs) were selected to evaluate mechanical processing. A CAD algorithm for designing technological operations considering the parameters of manufacturability was developed. The algorithm was tested by manufacturing a frame workpiece. The developed algorithm can be used for reducing labour costs and development time, at the same time as improving the quality of production processes. The formalisation of process design is a crucial stage in digitalisation and automation of all production processes.

Ключевые слова: проектирование, автоматизация проектирования, технологические операции, технологический процесс механической обработки, технологичность, технологичность конструкции изделия

Keywords: design, design automation, technological operations, machining process, manufacturability, product design manufacturability

For citation: Ishenin D. A., Govorkov A. S. Engineering working operations based on parameters of product manufacturability using a computer-aided design algorithm. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):708-719. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-708-719>.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация и цифровизация производства – это, бесспорно, основные направления технологического развития промышленности. Современное промышленное производство использует цифровые и компьютерные технологии во всех аспектах своей работы. Практически все процессы, от непосредственного контроля и управления технологическим процессом до технологического проектирования, осуществляются в настоящее время с применением цифровых данных и цифровой инфраструктуры. При этом процесс проектирования технологических операций до сих пор является малоформализованным, что приводит к большой трудоемкости проектирования технологического процесса.

Разработка процесса механической обработки детали является очень трудоемкой задачей. Проектирование технологического процесса механической обработки изделия машиностроения, соответствующего параметрам производственной технологичности, осложняется тем, что номенклатура материалов и оборудования постоянно расширяется, а технологии совершенствуются [1].

Основной массив информации в структуре технологического процесса занимают технологические операции.

Проектирование операций механической обработки предполагает выбор оборудова-

ния, конструкции режущих инструментов, оснастки и назначения режимов резания. Совокупность этих параметров определяет, является ли проектируемый технологический процесс технологичным.

Разработка и проектирование технологических операций начинаются с формирования перечня исходных данных. В исходных данных могут быть выделены данные предприятия, нормативные документы, электронная модель изделия и требования к детали. К данным предприятия относятся следующие:

- информация о типе производства на предприятии;
- информация о номенклатуре оборудования и оснастки, используемая на предприятии;
- информация о технологических решениях, принятых на предыдущих этапах разработки изделия.

К технологическим решениям, принятым на предыдущих этапах, относятся метод обработки и вид технологического процесса. Эти параметры зависят от вида и конфигурации изделия, его габаритов, вида принятой заготовки, точности и качества обрабатываемых поверхностей.

При проектировании технологических операций разрабатывают и уточняют их содержание, назначают последовательность переходов. Также при проектировании выби-

раются оборудование и оснастка, назначают режимы механической обработки.

Для окончательного формирования технологической операции необходимо использовать [2, 3]:

- данные о разработанном маршруте технологической обработки, схеме базирования и закрепления;
- сведения о точности и шероховатости поверхностей до и после обработки на данной операции;
- информацию о припусках на обработку;
- данные о такте выпуска или размера партии деталей.

Проектирование технологических операций завершается:

- выбором оборудования и оснастки;
- расчетом припусков;
- расчетом режимов механической обработки.

Одна из основных сложностей проектирования технологических операций для технолога заключается в том, что ему необходимо назначить оснастку и оборудование, номенклатура которых весьма разнообразна. А для решения задачи расчета режимов резания и припусков заготовки технолог может воспользоваться различными методами: табличным (опытно-статическим), аналитическим и графоаналитическим [2].

Постановка проблемы. Таким образом, при проектировании технолог или команда технологов зачастую могут получить несколько вариантов технологического процесса. В таком случае необходимо оценить полученные варианты технологических процессов (ТП) и технологических операций, руководствуясь технико-экономическими принципами проектирования: максимальной экономией времени и требуемой производительностью. Однако окончательный выбор обусловлен только опытом и знаниями технолога. Эта проблема может решиться созданием системы автоматизированного проектирования (САПР) технологических операций, учитывающей параметры производственной технологичности [4–11].

В настоящее время существует множество САПР для проектирования технологиче-

ского процесса изготовления изделий. Однако большинство из них направлены на структуризацию процесса проектирования.

Целью исследования является разработка алгоритма проектирования технологических операций с учетом заданного уровня технологичности на основе производственных данных. Для достижения поставленной цели осуществлялось решение следующих задач: разработка методик автоматизированного проектирования, позволяющих осуществлять проектирование технологического процесса исходя из обеспечения максимальной производственной технологичности; создание алгоритма выбора технологических операций с учетом параметров производственной технологичности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье авторы предлагают структурированную схему проектирования технологических операций (рис. 1). При разработке данной схемы в первую очередь учитывалась возможность внедрения ее в условиях применения интегрированных САПР с учетом параметров технологичности конструкции изделия [12].

Процесс проектирования, при котором для каждого этапа проектирования технологических операций могут потребоваться определенные и различные наборы исходных данных, начинается с подготовки исходных данных [2]. На схеме процесса проектирования исходные данные сгруппированы по типам:

- данные предприятия;
- нормативная документация;
- электронная модель изделия;
- требования к точности;
- параметры производственной технологичности.

Отдельно стоит отметить такие элементы схемы, как база данных и база знаний. Эти элементы вынесены за блок непосредственно проектирования. База данных является упорядоченным набором структурированной информации и может аккумулировать в себе полностью или частично весь набор исходных данных. База знаний, однако, в отличие

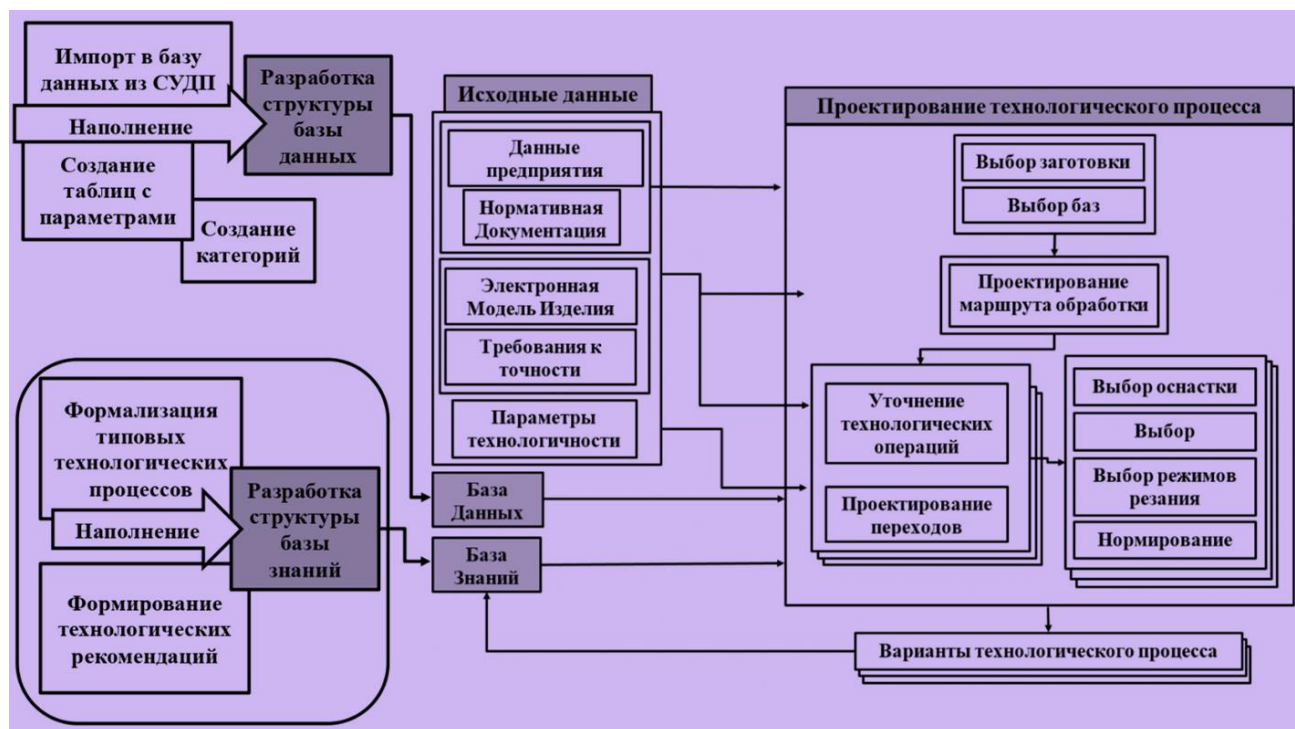


Рис. 1. Схема процесса проектирования технологического процесса с учетом параметров производственной технологичности

Fig. 1. Diagram of the flow process design taking into account production manufacturability parameters

от базы данных содержит в себе правила вывода и информацию об опыте и знаниях технологов [13].

База данных и база знаний должны стать основой алгоритма. При этом разработка базы данных на настоящий момент не является проблемой, так как большинство современных предприятий аналогичные базы данных уже использует. Основной задачей сейчас является разработка специальной базы знаний, для этого необходима формализация типовых технологических процессов и получение рекомендаций экспертов-технологов.

Различные варианты маршрутов технологической обработки изделия проектируются с использованием данных о геометрических параметрах производимой детали и заготовки, порядке выполнения технологических операций и переходов, информации об использовании определенного вида оснастки и инструмента.

В результате процесса проектирования технолог должен найти вариант технологического процесса, который будет являться наиболее технологичным. Для выбора наиболее технологичного варианта нужно

руководствоваться параметрами технологичности конструкции изделия (ТКИ), которая может быть оценена с качественной и количественной сторон.

Качественный метод оценки технологичности основан на практическом опыте и знаниях технологов и реализуется на основании эвристического анализа соответствия конструкции изделий производственной технологичности.

При **количественной** оценке ТКИ используют разнообразные показатели технологичности. Рассматривая производственную технологичность, общепринято пользуются следующими параметрами [14–20]:

- трудоемкость изделия при изготовлении – суммарные затраты труда на выполнение технологического процесса изготовления изделия;
- удельная трудоемкость изделия в изготовлении – отношение трудоемкости изделия в изготовлении к номинальному значению основного параметра;
- технологическая себестоимость изделия в изготовлении – суммарные затраты средств на осуществление технологического

процесса изготовления изделия;

- коэффициент применимости материала – отношение нормы расхода данного материала к сумме норм расхода всех материалов на изготовление изделия.

При разработке методики автоматизированного проектирования технологических операций авторами было проведено разделение используемых при проектировании на группы исходных данных. Затем, опираясь на типовой технологический процесс, из него были выделены значимые для определенного этапа проектирования исходные данные, способ и основание для их выделения. После этого аналогично данная методика была проделана для формализованного процесса (табл. 1).

Первым рассматриваемым этапом проектирования ТП взят «выбор заготовки». Для выбора заготовки основными параметрами являются следующие:

- геометрия, т.е. в данном случае максимальные габаритные размеры детали;
- материал;
- точность изготовления изделия.

Большинство из этих данных присутствует на электронной модели изделия, доступной для получения информации технологом. Выбор заготовки осуществляется технологом на основании базы данных или справочного материала.

Для этапа выбора баз значимым параметром являются геометрия детали и состав ее конструктивных элементов (КЭ), эти же параметры являются основными для формирования маршрута обработки, они тесно взаимосвязаны между собой.

Параметры для проектирования технологических операций целесообразнее всего разделить по типу операции. В большинстве технологических процессов можно выделить три вида операций: контрольная, разметочная и формообразующая.

При проектировании операции формообразования технолог использует геометрические данные и данные о конструктивных элементах детали, данные о материале изделия, информацию о точности изготовления детали.

Эти данные можно получить из электронной модели изделия или чертежа детали, при необходимости дополнив их информацией из нормативной документации и справочников.

При разработке разметочной или контрольной операции технолог должен использовать данные о геометрических параметрах детали и ее конструктивных элементах. Эту информацию технолог аналогично может получить из электронной модели изделия или чертежа.

Теперь рассмотрим представление тех же исходных данных в уже формализованном процессе.

Таблица 1. Представление исходных данных в формализованном процессе проектирования
Table 1. Presentation of input data in a formalized design process

Этап проектирования		Исходные данные (значимый параметр)	Представление в существующем технологическом процессе	Представление в формализованном процессе
Выбор заготовки		геометрия	технолог по модели	модель + БЗ + БД
		материал	атрибут модели	атрибут модели
		точность	НД, модель (чертеж)	БЗ + БД
Выбор баз		геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД
Проектирование маршрута обработки		геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД
Операции	формообразование	геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД
		материал	атрибут модели	атрибут модели
		точность	НД, чертеж	БЗ + БД
	разметочная	геометрия	технолог по модели	модель + БЗ
	контрольная	геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД

Примечание: КЭ – конструктивный элемент; БД – база данных; БЗ – база знаний; НД – нормативная документация.

Геометрические параметры изделия, материал и точность являются основной исходной информацией этапа выбора заготовки. Геометрическая информация в формализованном процессе может быть представлена совокупностью баз знаний и данных, а также электронной моделью изделия.

Геометрическая информация и данные о конструктивных элементах изделия используются для выбора баз и проектирования маршрута механической обработки. На этапе проектирования операций необходимы следующие информационные исходные данные: геометрическая информация, о конструктивных элементах, а также сведения о материале и точности.

Для формализации процесса проектирования и разработки методики автоматизированного проектирования с учетом параметров технологичности в первую очередь необходимо наличие правил базы знаний, т.к. они необходимы для представления исходных данных. Помимо базы знаний, для представления исходных данных необходимы: база данных, электронная модель изделия или чертеж.

При решении вопроса автоматизации проектирования множество частных задач проектирования технологических операций можно разделить на формализуемые и неформализуемые [12]. Ряд задач, которые могут быть отнесены к формализуемым, достаточно короток. Можно выделить следующие задачи:

- расчет припусков и межпереходных размеров;

- расчет режимов резания;

К неформализуемым можно отнести задачи нерасчетного характера:

- разработка маршрута обработки детали;

- структура операции;

- выбор станков, инструментов и т.д.

Однако различные варианты решения данных задач могут быть уточнены на основании параметров производственной технологичности конструкции изделия. Таким образом, в автоматическом режиме ряд заведомо неподходящих вариантов может быть

отменен, затем производится составление другого, наиболее подходящего, ряда. В этих условиях автоматизированное проектирование технологических операций может представлять собой последовательный выбор типовых решений в зависимости от комплекса условий производства, конструкторско-технологических параметров детали и параметров технологичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим подробно работу предложенного алгоритма автоматизированного проектирования технологических операций (рис. 2). Работа алгоритма рассматривалась на примере проектирования ТП для детали «шпангоут» (рис. 3). Данная деталь является цельнофрезерованной и относится к ребрам жесткости.

Подготовка исходных данных. Процесс разработки технологических операций начинается с формирования исходных данных. При проектировании технологической операции и в целом технологического процесса требуются разные и определенные наборы исходной информации. Часть информации для проектирования берется из базы данных, а часть, допустим, из информации о геометрических параметрах, из электронного макета изделия.

Выбор заготовки. Для этого этапа технологу необходимы данные о геометрии детали, получаемые с ЭМИ. Метод получения заготовки и ее материал должны назначаться при помощи правил специальной базы знаний. По завершении данного этапа технологу должны быть предложены различные варианты вида заготовки, представленные как $Z(m, GI, s)$,

где m – материал заготовки; GI – геометрические данные; s – способ изготовления.

В данном случае «шпангоут» является исключительно ответственной деталью летательного аппарата, вид ее заготовки оговорен в конструкторской документации и не может быть изменен.

Выбор технологических баз. При выборе баз технолог использует данные о геометрии и конструктивных элементах детали.



Рис. 2. Общая схема алгоритма проектирования технологического процесса
Fig. 2. General diagram of the flow process design algorithm

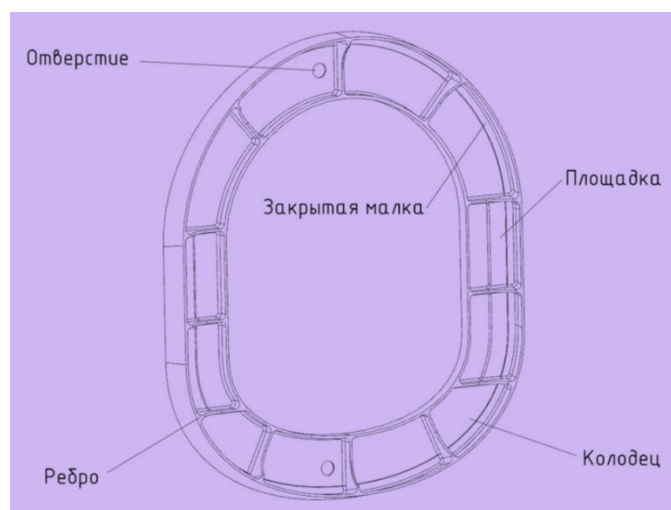


Рис. 3. Шпангоут
Fig. 2. Frame

Эти исходные данные технолог получает с ЭМИ. Выбор технологических баз производится с использованием правил базы специальных знаний.

У детали «шпангоут» базой назначается задняя стенка – поверхность с отсутствием информации.

Предварительное формирование маршрута обработки. В неформализованном процессе проектирования задача фор-

мирования маршрута механической обработки полностью зависит от технолога. В работе технолог может обращаться к различным справочникам и нормативной документации.

Однако формализованный алгоритм, рассматриваемый в данной статье, использует для формирования маршрута обработки специальную базу знаний. Таким образом, на этапе проектирования технолог должен, используя базу знаний, сформировать после-

довательность технических операций таким образом, чтобы получился полный процесс формирования готового изделия. База знаний должна сформировать несколько вариантов маршрутов механической обработки, руководствуясь критериями производственной технологичности из которых технолог выберет удовлетворяющий его вариант. На данном этапе технологические операции не формируются окончательно, а только определяется их вид.

На этом этапе требуются данные о геометрических параметрах детали и конструктивных элементах изделия.

Маршрут технологической обработки можно представить как упорядоченную последовательность операций:

$$M (O_1, O_2, \dots O_i),$$

где O_i – технологическая операция.

Каждая операция должна переводить заготовку из «состояния n » в «состояние $n+1$ » (рис. 4).

Реальный маршрут технологической обработки детали «шпангоут» выглядит так:

$$M (O_{п1}, O_{м1}, O_{п2}, O_{к1}, O_{ф1}, O_{ф2}, \text{ и т.д.}),$$

где $O_{п}$ – подготовительная операция; $O_{м}$ – маркирование; $O_{к}$ – контрольная операция; $O_{ф}$ – операция формообразования.

Проектирование переходов и операций. Проектирование операций осуществляется с использованием базы знаний на основании маршрута механической обработки, полученного на предыдущем этапе.

Для формирования технологической операции используются информация о геометрических параметрах детали, данные о конструктивных элементах изделия, материале заготовки и точности изготовления.

Технологическая операция может быть представлена как

$$O (v, n, t),$$

где v – вид операции; n – состояние изделия;

t_0 – основное время обработки резанием.

Однако точнее будет представить операцию как последовательность переходов:

$$O (P_1, P_2, \dots P_n),$$

а переход как

$$P (v, t_0),$$

где v – вид операции; t_0 – основное время обработки резанием.

Текущий вид заготовки на каждом этапе маршрута обработки описывает параметр состояния изделия. Каждое состояние заготовки характеризуется рядом параметров (геометрических и технологических).

Назначение операции осуществляется с учетом критерия наименьшей трудоемкости.

На этом этапе производится подбор оборудования, исходя из составленного ранее маршрута технологической обработки, подбор осуществляется из базы данных оборудования с использованием правил базы знаний.

Окончательное формирование маршрутов обработки. После всех проведенных операций система может сформировать несколько вариантов маршрутов технологической обработки. Главным критерием подбора являются параметры технологичности. Основной задачей этого этапа является оптимизация маршрута технологической обработки путем поиска кратчайших маршрутов с последующим выбором наименее трудоемких.

Исходными данными для этого этапа служат сведения, полученные на предыдущих этапах работы.

Формирование выходных данных – это завершающий этап технологического проектирования, здесь технолог получит несколько вариантов технологического процесса, из которых ему потребуется выбрать наиболее приемлемый для применения на производстве. Варианты ТП ранжированы по критерию наименьшей трудоемкости. Схема работы предложенного алгоритма представлена на рис. 5.

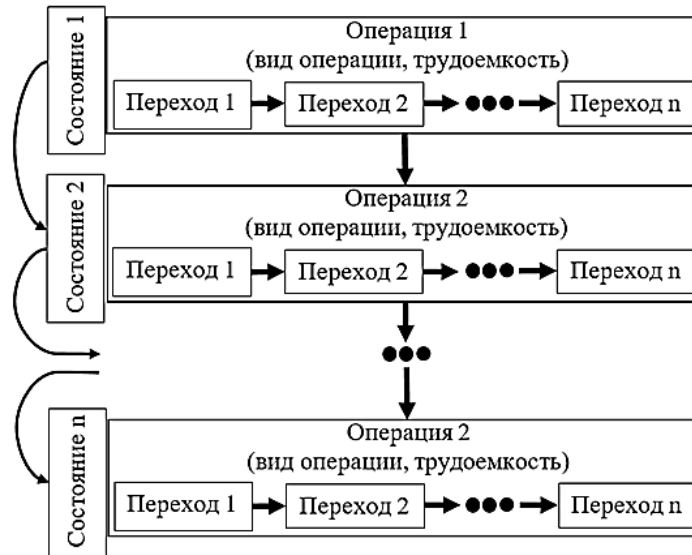


Рис. 4. Маршрут технологической обработки
Fig. 4. Processing route

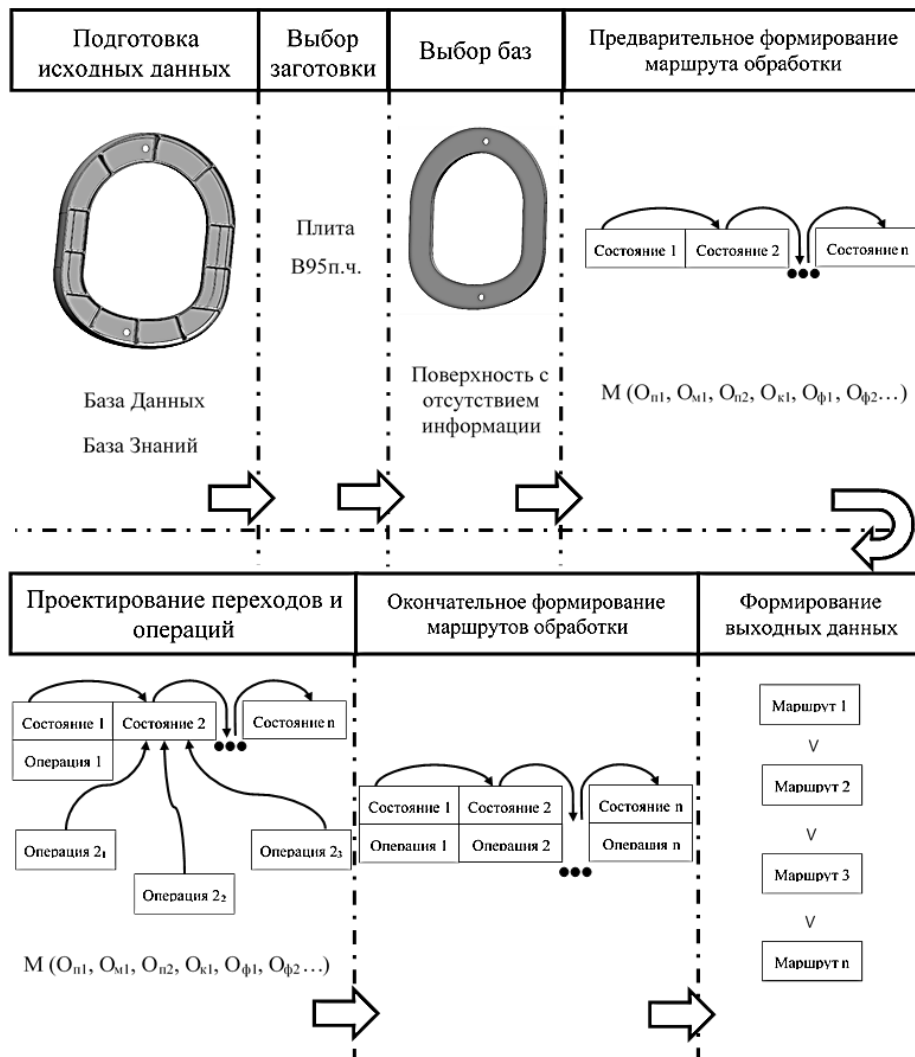


Рис. 5. Схема работы алгоритма проектирования на примере детали «шпангоут»
Fig. 5. Diagram of design algorithm operation on example of the Frame part

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанный выше подход к проектированию технологического процесса позволит:

- повысить качество проектируемого технологического процесса за счет формализации процесса проектирования, и как следствие уменьшения количества ошибок, допускаемых технологами;
- уменьшить трудозатраты и сроки разработки технологического процесса изготовления деталей машиностроения.

Как считают авторы, применение данного алгоритма автоматизированного проектирования технологических операций с использованием параметров производственной тех-

нологичности должно позволить повысить качество выпускаемой продукции и уменьшить трудоемкость технологической подготовки производства предприятиям машиностроительной отрасли. Это особенно актуально в современных условиях производства, так как предприятия существуют в мире жесткой конкуренции. Необходимо отметить, что ориентированная на конкурентов среда требует от машиностроения обеспечения технологической гибкости машиностроительных производств, которую способны обеспечить только автоматизация и цифровизация производства.

Список источников

1. Бочкарев П. Ю., Шалунов В. В., Бокова Л. Г. Проектирование технологических операций механообработки в системе планирования технологических процессов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 3. № 1. С. 46–54.
2. Говорков А. С., Чьен Ха Ван. Разработка автоматизированной системы проектирования технологических процессов изготовления изделия машиностроения на основе трехмерной модели // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4. С. 48–55.
3. Фокин И. В., Божеева Т. В. Автоматизация процедуры принятия решений при разработке технологических процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1. С. 67–72.
4. Govorkov A. S., Fokin I. V., Lavrentyeva M. V., Karlina Yu. I. Methodology of the formalized approach of the automated construction of the manufacturing route of a mechanical engineering product // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632. P. 012093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012093>.
5. Баранова Е. М., Баранов А. Н. Разработка процедуры контроля качества изделий на базе современного подхода к проектированию технологических операций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 10. С. 76–86.
6. Подрез Н. В., Токарев Д., Жилиев А., Фокин И. Система разработки технологических процессов изготовления деталей и сборочных единиц АТ на основе существующих взаимосвязей с учетом 3-х мерной модели // Наука будущего – наука молодых: сб. тез. III Всерос. науч. форума (г. Нижний Новгород, 12–14 сентября 2017 г.). Нижний Новгород: Изд-во ООО «Инконсалт К», 2017. С. 319–320.
7. Тимирязев В. А., Белянкина О. В., Серебряков А. А. Автоматизированное проектирование технологических процессов с использованием ЭВМ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 10. С. 220–222.
8. Кузнецов П. Н., Брижанский Л. В., Кузнецова А. П. Повышение надежности техники путем автоматизированного проектирования деталей и узлов // Наука и Образование. 2019. Т. 2. № 4. С. 264.
9. Sokolnikov R. A., Bozheeva T. V., Govorkov A. S. Development of methodology for formalized selection of technological operations when designing technological process manufacturing of machinery // Journal of Physics Conference Series. 2020. Vol. 1582. No. 1. P. 012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012080>.
10. Камшилов С. Г. Системы автоматизированного проектирования в производственных процессах // Вестник Челябинского государственного университета. 2004. Т. 7. № 1. С. 104–108.
11. Ишенин Д. А. Возможности для автоматизирования выбора технологических операций с учетом производственной технологичности конструкции изделия // Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика: сборник статей по матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 14 января 2020 г.). Уфа: Изд-во НИЦ «Вестник науки», 2020. С. 79–83.
12. Подрез Н. В. Обзор математических методов представления технологических процессов // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2016. С. 32–36.
13. Кузнецов В. А., Владыка А. А., Цитриков А. В., Захарова О. О. Проектирование технологического процесса изготовления деталей на основе технико-экономического моделирования // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». 2012. Т. 2. № 2. С. 112–116.
14. Непомилуев В. В., Соколова Е. Ю. Методология выбора оптимального варианта технологического решения по комплексному критерию // Машиностроение – основа технологического развития России: сб. науч. ст. V Международной науч.-техн. конф. (г. Курск, 22–24 мая 2013 г.). Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2013. С. 257–261.
15. Ирзаев Г. Х. Экспертные методы управления тех-

нологичностью промышленных изделий. М.: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2010. 192 с.

16. Бокова Л. Г., Королев Р. Д., Бочкарев П. Ю. Совершенствование оценки производственной технологичности изделий специального машиностроения // Высокие технологии в машиностроении: матер. XVI Всерос. науч.-техн. конф. (г. Самара, 25–28 октября 2017 г.). Самара: Изд-во СамГТУ, 2017. С. 9–10.

17. Леонович Д. С., Журавлёв Д. А., Карлина Ю. И. Современные тенденции развития инженерного анализа изделий с деталями из композиционных материалов на примере принципов работы ANATOLEFLEX // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 11. С. 56–62. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-56-62>

18. Ларченко А. Г. Оценка качества изделий из поли-

мерных материалов машиностроительного назначения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 3. С. 463–471. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471>.

19. Рычков Д. А., Лобанов Д. В., Смирнова Д. А. Методика оптимизации режимов резания в интеллектуальной системе проектирования технологических процессов // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 4. С. 18–24.

20. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В., Сульдин С. П., Тюрбева Т. Б. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 1. С. 77–84. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>.

References

1. Bochkaryov P. Yu., Shalunov V. V., Bokova L. G. Machining technological operations designing within the system of technological operations planning. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2009;3(1):46-54. (In Russ.)

2. Govorkov A. S., Chien Ha Van. Development of the automated system of design engineering products manufacturing technological proces based on three-dimensional model. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;4:48-55. (In Russ.)

3. Fokin I. V., Bozheeva T. V. Automation of the decision-making procedure in the development of technological processes. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2017;1:67-72. (In Russ.)

4. Govorkov A. S., Fokin I. V., Lavrentyeva M. V., Karlina Yu. I. Methodology of the formalized approach of the automated construction of the manufacturing route of a mechanical engineering product. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632:012093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012093>.

5. Baranova E. M., Baranov A. N. Develop procedures for quality control of products on the basis of contemporary approach to design technological operations. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2017;10:76-86. (In Russ.)

6. Podrez N. V., Tokarev D., Zhilyaev A., Fokin I. Development system of technological processes for manufacturing of aircraft parts and assembly units based on existing relationships taking into account the 3-dimensional model. In: *Nauka budushchego – nauka molodyh: sbornik tezisev III Vserossijskogo nauchnogo foruma = Science of the future – science of the young: collected abstracts of III All-Russian scientific forum*. 12–14 September 2017, Nizhnij Novgorod. Nizhnij Novgorod: OOO "Inkonsalt K"; 2017, p. 319-320. (In Russ.)

7. Timiryazev V. A., Belyankina O. V., Serebryakov A. A. The automated designing of technological processes with

computers. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;10:220-222. (In Russ.)

8. Kuznetsov P. N., Brizhanskij L. V., Kuznetsova A. P. Improving equipment reliability by computer-aided design of parts and assemblies. *Nauka i obrazovanie*. 2019;2(4)264. (In Russ.)

9. Sokolnikov R. A., Bozheeva T. V., Govorkov A. S. Development of methodology for formalized selection of technological operations when designing technological process manufacturing of machinery. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1582(1):012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012080>.

10. Kamshilov S. G. Computer-aided design systems in production processes. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2004;7(1):104-108. (In Russ.)

11. Ishenin D. A. Automation potential of selection of technological operations taking into account the production manufacturability of product design. In: *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. Innovatika: sbornik statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual Problems of Science and Technology. Innovation. Collected articles of the materials of the International Scientific Conference*. 14 January 2020, Ufa. Ufa: NIC "Vestnik nauki"; 2020, p. 79-83. (In Russ.)

12. Podrez N. V. Review of mathematical methods for representing technological processes. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aircraft engineering and transport of Siberia: collected articles of All-Russian youth. Scientific and practical conference*. 11 November 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 32-36. (In Russ.)

13. Kuznetsov V. A., Vladyka A. A., Citrikov A. V., Zakharova O. O. Design of the technological process of manufacturing parts based on technical and economic modeling. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2012;2(2):112-116. (In Russ.)

14. Nepomiluev V. V., Sokolova E. Yu. Selection procedure of the optimal option for a technological solution ac-

ording to a complex criterion. *Mashinostroenie – osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii: sbornik nauchnyh statej V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Mechanical engineering as the basis of technological development in Russia: collected articles of V international scientific and technical conference*. 22–24 May 2013, Kursk. Kursk: The Southwest State University; 2013, p. 257–261. (In Russ.)

15. Irzaev G. H. *Expert methods of managing processability of industrial products*. Moscow: "Infra-Inzheneriya"; 2010, 192 p. (In Russ.)

16. Bokova L. G., Korolev R. D., Bochkarev P. Yu. Improving assessment of industrial processability of special mechanical engineering products. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XVI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = High technologies in mechanical engineering: materials of XVI All-Russian scientific and technical conference*. 25–28 October 2017, Samara. Samara: Samara Polytech Flagship University; 2017, p. 9-10. (In Russ.)

17. Leonovich D. S., Zhuravlev D. A., Karlina Yu. I. Modern development tendencies in engineering analysis of

products with composite material parts on example of ANATOLEFLEX operating principles. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):56-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-56-62>

18. Larchenko A. G. Quality assessment of products from polymeric materials designed for engineering purposes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):463-471. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471>

19. Rychkov D. A., Lobanov D. V., Smirnova D. A. Methodology of optimization of cutting regimes in intelligent system of designing technological processes. *Sovremennye materialy, tehnika i tehnologii*. 2018;4:18-24. (In Russ.)

20. Kalyakulin S. Yu., Kuzmin V. V., Mitin E. V., Suldin S. P., Tyurbieva T. B. Designing the structure of technological processes based on synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018;28(1):77-84. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ишенин Дмитрий Александрович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Говорков Алексей Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,
директор института информационных технологий и
анализа данных,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 09.11.2021; принята к публикации 27.12.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Ishenin,

Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Alexey S. Govorkov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Director of the Institute of Information Technologies and
Data Analysis,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 09.11.2021; accepted for publication 27.12.2021.