

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.01:621.9.01

EDN: ILMNVU

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-21-30



Формальный метод выбора черновых баз с использованием графов размерных связей при механической обработке деталей

Ф.Ю. Игнатьев¹✉¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Резюме. Цель – определение формальных условий выбора черновых баз и правил задания связей между поверхностями заготовки и поверхностями детали, обрабатываемой на металлорежущих станках. Основой исследования является геометрия неидеальных объектов, представляющая геометрическую конфигурацию детали или заготовки в виде множества поверхностей (S), расположенных в строгом соответствии с набором линейных и угловых размерных связей (V) в шестимерном геометрическом пространстве. Представление размерных связей в каждом из шести измерений выполнялось с использованием теории графов. При моделировании процесса последовательной обработки поверхностей использован алгоритм, описанный в работах В.Г. Старостина и В.Е. Лелюхина. Рассмотрен вопрос выбора черновых баз, где критерием выбора установлена возможность формального (автоматического) формирования последовательности обработки поверхностей детали без перерасчета размерных цепей, заданных на чертеже. Показано, что установленный критерий позволяет избежать существенного «ужесточения» допусков и увеличения производственных затрат, а также является гарантией сохранения исходной конструкции детали. Проведенные исследования графов размерных связей позволили выявить и сформулировать правила выбора черновых баз и условия их связи с комплексом поверхностей детали. На примере представления геометрического образа детали и заготовки в шестимерном пространстве с двумя метриками (линейная и угловая) подробно показан процесс формального определения поверхностей, используемых в качестве баз на каждом шаге обработки. По результатам выполненных исследований предложен формальный метод выбора черновых баз, принципиальным условием которого является наличие заданных на чертеже размерных связей между поверхностями заготовки и детали в трех угловых измерениях. Изложенные материалы являются частью комплексных исследований, выполняемых для решения проблемы создания систем автоматического формирования технологических процессов изготовления деталей.

Ключевые слова: машиностроение, изготовление деталей, металлорежущие станки, технологический процесс, технологические базы, последовательность обработки

Для цитирования: Игнатьев Ф.Ю. Формальный метод выбора черновых баз с использованием графов размерных связей при механической обработке деталей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 21–30. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-21-30>. EDN: ILMNVU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Formal method for selecting rough datum in part machining using graphs of dimensional relationships

Fedor Yu. Ignatiev¹✉¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. We set out to determine formal conditions for selecting rough datum surfaces and rules for specifying the relationships between the surfaces of the workpiece and the part machined by metal-cutting equipment. The research was based on the geometry of non-ideal objects, which represents the geometric configuration of the part or workpiece in the form of a set of surfaces (S) arranged in strict accordance with a set of linear and angular dimensional relationships (V) in a six-dimensional geometric space. The representation of dimensional relationships in each of the six dimensions was performed using graph theory. The algorithm described in the works of V.G. Starostin and V.E. Lelyukhin was used for modeling the process of sequential surface machining. The question of selection of rough datum surfaces was considered. Here, the selection criterion is the possibility of automatic formation of machining sequence without recalculation of the dimension chains defined in the drawing. This criterion eliminates the problem of significant toughening of tolerances and additional

production costs. Moreover, this criterion ensures preservation of the original design of the part. The conducted studies of the graphs of dimensional relationships allowed us to formulate rules for selecting rough datum surfaces and conditions for their connection with the set of part surfaces. The representation of a geometrical image of the part and the workpiece in a six-dimensional space with two metrics (linear and angular) was used to demonstrate the process of formal definition of surfaces used as datum surfaces at each machining step. The results obtained served as the basis for developing a formal method of datum surface selection, whose principal condition consists in the presence of dimensional relationships between the surfaces of the workpiece and the part in three angular dimensions specified in the drawing. The presented materials are part of an ongoing research project into the creation of automated systems for technological machining processes.

Keywords: mechanical engineering, part manufacturing, metal-cutting machines, technological process, technological bases, cutting sequence

For citation: Ignatiev F.Yu. Formal method for selecting rough datum in part machining using graphs of dimensional relationships. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):21-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-21-30>. EDN: ILMNVU.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос автоматизации проектирования технологических процессов является актуальным на сегодняшний день. Специалисты занимаются его изучением на протяжении большого количества времени, но наличие определенных трудностей не позволяет найти совершенное решение. Автоматизация проектирования технологических процессов работает на основе использования прошлого опыта, классификации деталей по конструктивным и технологическим признакам. В изучении вопроса автоматизации в Российских источниках можно выделить типовые, модульные и единичные подходы проектирования технологических процессов² [1–4]. Разработка единичного технологического процесса подразумевает создание технологического процесса изготовления изделия одной геометрической конфигурации. К преимуществу единичного технологического процесса можно отнести возможность учета особенностей изделия и эффективное применение производственных возможностей. К недостаткам – большие затраты времени. В основе типового технологического процесса заложено использование готового технологического процесса для геометрически подобной рассматриваемой детали. Применение типового технологического процесса позволяет сократить время на разработку технологических процессов. Использование данного метода проектирования позволило создать системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), таких как «Вертикаль», «Спрут ТП» и другие [5, 6]. В зарубежных источниках используются подходы на основе

типовых технологических процессов. Можно выделить два подхода: модифицированный (вариантный) и генеративный [7, 8]. Модифицированный (вариантный) метод основан на поиске в базе данных типового технологического процесса и модификации его технологии под рассматриваемую деталь. Генеративный метод основан на создании технологических процессов с нуля с помощью имеющихся инструментов (искусственного интеллекта, нейронных сетей др.).

Полностью автоматизировать проектирование технологических процессов не позволяет существование определенных проблем. Одной из них является отсутствие возможности передачи полной информации о детали между людьми, работающими на разных этапах изготовления. Зачастую заложенные в процессе конструирования размерные связи между поверхностями детали не дают полного понимания для формирования технологии изготовления.

Важными составляющими факторами при проектировании технологического процесса являются определение и выбор заготовки. На всем этапе изготовления изделия этим вопросом занимается ряд специалистов, конструктор определяет марку материала и геометрическую конфигурацию, которые в дальнейшем могут меняться в зависимости от наличия и выбранного технологом способа обработки. Геометрические параметры заготовки должны позволять вписать в нее деталь, а размерные связи между поверхностями заготовки и детали должны дать возможность построить последовательность обработки поверхностей детали. Однако на практике в подавляющем

²Жуков Э.Л., Козарь И.И., Розовский Б.Я., Дегтярев В.В., Соловейчик А.М. Технология машиностроения.

Часть II. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие. СПб. Изд-во СПбГТУ, 2000. 498 с.

³Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. спец. вузов. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2001. 591 с.

большинстве чертежей набор размерных связей между поверхностями заготовки и детали недостаточен для однозначного определения их взаимной ориентации³ [9]. При этом существенно важным является выбор первых черновых поверхностей [10, 11]. Неправильно подобранные черновые базирующие поверхности (поверхности заготовки) зачастую приводят к ситуации, когда соблюдение размерной цепи, заложенной конструктором, невозможно. Решением этой проблемы, чаще всего применяемой в практике, является изменение связей между поверхностями и, как результат этого, пересчет допуска, что в свою очередь приводит к увеличению себестоимости, ужесточению допусков, изменению конструкции.

Проблема в данном случае заключается в выборе такого комплекта черновых баз, который позволял бы получить технологию изготовления детали без пересчета допусков.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение условий выбора черновых баз и правил задания связей между поверхностями заготовки (черновыми базами) и комплексом поверхностей детали для формального получения последовательности обработки всех поверхностей детали без перерасчета размерных связей и допусков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы для рассмотрения процесса проектирования последовательности обработки поверхностей детали в статье используется алгоритм автоматического проектирования технологического процесса механической обработки деталей, разработанный В.Г. Старостиним и В.Е. Лелюхиным [12].

Продолжение исследований в этом направлении привело к созданию геометрии неидеальных объектов, разрабатываемой В.Е. Лелюхиным и О.В. Колесниковой [13, 14]. Данные исследования позволяют изучить положение и ориентацию объектов в шестимерном пространстве. Положения геометрии дают возможность однозначно описать конструкцию и процесс порождения исследуемого объекта в этом пространстве. В качестве базиса шестимерного пространства выступает объединение трех линейных и трех угловых векторов. Объект представляет собой

совокупность поверхностей и размерных связей между ними $G(S, V)$, где $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – поверхности, ограничивающие объект, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, $v_i = (s_j, s_k)$ – размерные связи между поверхностями. Таким образом, при рассмотрении детали с помощью геометрии неидеальных объектов необходимо представить объект в виде совокупности элементарных поверхностностей (сфера, цилиндр, плоскость), ограничивающих этот объект, и построить графы размерных связей. На рис. 1 показан чертеж детали.

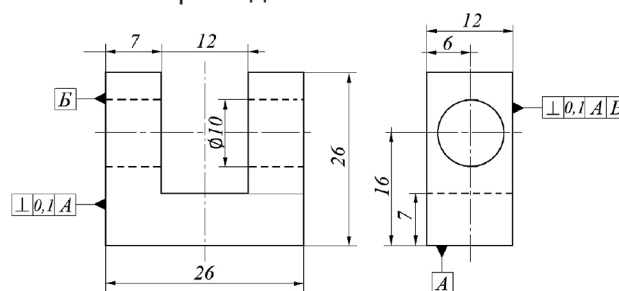


Рис. 1. Чертеж детали
 Fig. 1. Part drawing

Рассмотрим модель детали, представленной на чертеже (см. рис. 1). Для выполнения формального описания данной детали пронумеруем в произвольном порядке ее поверхности. Пример модели детали с пронумерованными поверхностями представлен на рис. 2 а.

Итак, геометрия неидеальных объектов рассматривает деталь в шести степенях свободы, в трех линейных направлениях $\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z$ (перемещение вдоль координатных осей) и трех угловых $\vec{\alpha}_x, \vec{\alpha}_y, \vec{\alpha}_z$ (повороты вокруг координатных осей).

В каждом из линейных и угловых направлений необходимо рассмотреть размерные связи поверхностей и построить графы размерных связей. В графах размерных связей в качестве вершин выступают поверхности детали, а ребра показывают наличие размерной связи между поверхностями. Так, в направлении $\vec{l}_x$, на чертеже указаны размерные связи между плоскостями 3 и 4 – 26 мм, 3 и 8 – 7 мм, 8 и 9 – 12 мм. Соответственно, граф размерных связей в этом направлении будет выглядеть как показано на рис. 2 б.

Аналогично на основании пронумерованных поверхностей и указанных на чертеже размеров можно построить остальные графы размерных связей, как показано на рис. 2 б.

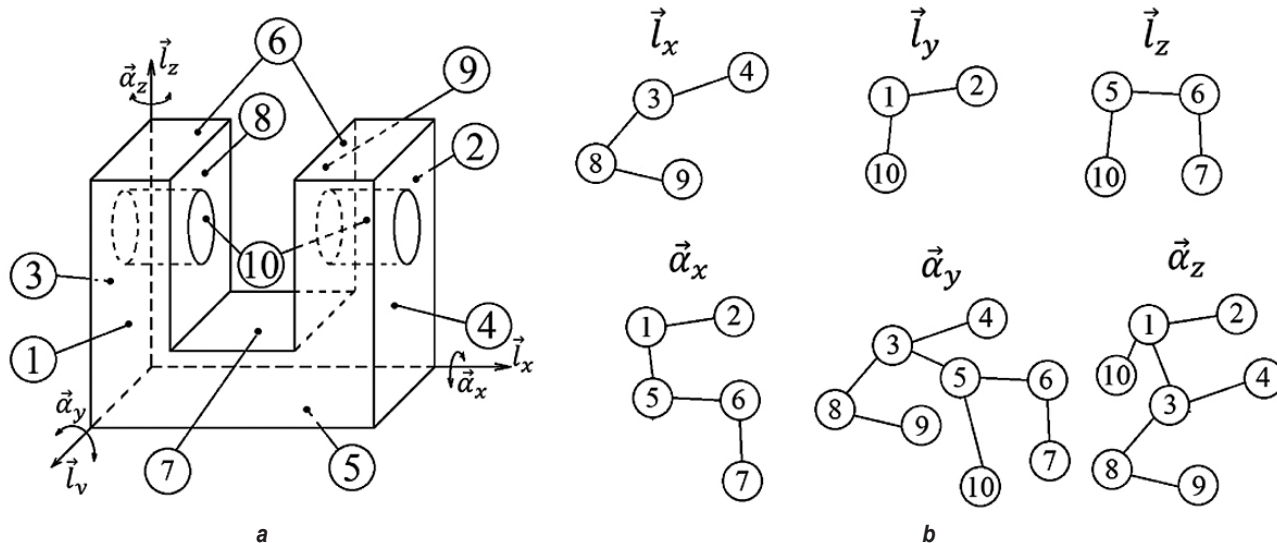


Рис. 2. Деталь с пронумерованными поверхностями (а) и соответствующие ей графы размерных связей (б)

Fig. 2. A part with numbered surfaces (a) and corresponding dimensional relationship graphs (b)

При обработке деталей на станках базирование решает задачу обеспечения взаимного расположения поверхностей (ВРП) относительно друг друга. В соответствии с действующим в нашей стране ГОСТ 2.307-2011⁴ «основанием для определения требуемой точности изделия при изготовлении являются указанные предельные отклонения размеров, а также предельные отклонения формы и расположения поверхностей». Следовательно, выбор баз полностью определяется заданными на чертеже размерными связями между поверхностями детали⁵. Тогда теоретической основой для формализации выбора баз могут служить свойства и закономерности существования размерных связей между поверхностями, указанные на чертеже⁶.

Традиционно процесс технологического проектирования начинается с разработки формы и размеров заготовки и выбора черновых баз [15]. При этом в технологической практике можно рассматривать два случая.

В первом случае, когда на чертеже изготавливаемой детали (кроме обрабатываемых поверхностей) имеется комплекс «черновых» поверхностей, не подвергающихся обработке, в соответствии с регламентами ЕСКД конструктор вынужден определять размерные

связи между исходными поверхностями заготовки и обрабатываемыми поверхностями готовой детали.

Ситуация усложняется во втором случае – для деталей, у которых весь комплекс поверхностей подвергается механической обработке. В этой ситуации при подготовке производства детали реально имеем как минимум два чертежа: а) чертеж детали («чистовые» поверхности и размерные связи между ними), который разрабатывается конструктором и б) чертеж заготовки («черновые» поверхности и размерные связи между ними), разрабатываемый технологом. Следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют однозначные правила и регламенты геометрического связывания заготовки и детали.

В обоих этих случаях как собственно проектирование заготовки, так и определение размерных связей, обеспечивающих взаимную ориентацию «чистовых» и «черновых» поверхностей, выполняется на этапе технологического проектирования. В качестве инструмента технологу предлагается комплекс рекомендаций выбора черновых поверхностей, которые в обобщенном виде можно свести к следующим [16–18]:

⁴ГОСТ 2.307-2011. Единая система конструкторской документации. Нанесение размеров и предельных отклонений. Введ. 01.01.2012. М.: Стандартинформ, 2020.

⁵ГОСТ 2.307-2011. ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений. М.: Стандартинформ, 2020.

⁶Балахнин Б.С. Основы технологии машиностроения: учебник. 3-е изд., доп. М.: Машиностроение, 1969. 561 с.

- возможно использование не более трех черновых поверхностей, имеющих связи с поверхностями детали;
- каждую черновую поверхность можно использовать только один раз;
- базирующие точки черновых поверхностей не должны дублироваться, т.е. для ограничения каждой степени свободы должно быть не более одной точки.

Отечественная и зарубежная практика свидетельствует, что построить формальный механизм выбора черновых баз на основе указанных рекомендаций не удается.

Попытка формализовать выбор на основе использования заданных размерных связей наталкивается на проблему нестабильной разрешимости. Как показали проведенные исследования, не все возможные комбинации линейных и угловых размерных связей обеспечивают формальную разрешимость задачи [19].

Под разрешимостью в статье понимается существование не менее одного варианта последовательности обработки всех «чистовых» поверхностей при условии, что каждая обрабатываемая («чистовая») непосредственно связана с базирующим комплексом. При этом основным условием для формального выбора баз и определения схем базирования является использование только размерных связей, указанных на чертеже (без перерасчета размерных цепей)^{7,8}.

Формирование черновых баз рассмотрим на примере. Для рассматриваемой детали (рис. 2 а) используется заготовка, имеющая геометрическую форму в виде призмы (рис. 3 а).

Важным условием является необходимость «вписать» деталь в тело заготовки и расположить ее там так, чтобы в процессе изготовления детали геометрические погрешности заготовки не влияли на геометрию будущего изделия.

Геометрическая конфигурация заготовки, как и изготавливаемой детали, определяется набором поверхностей и размерных связей $G^z (S^z, V^z)$. Каждая из поверхностей заготовки

(S^z) потенциально может быть использована в качестве базирующей. Важным фактором выбора черновых баз будет как раз задание связей между черновым комплексом поверхностей заготовки (геометрическим образом заготовки $G^z (S^z, V^z)$) и набором поверхностей детали (геометрическим образом детали $G (S, V)$).

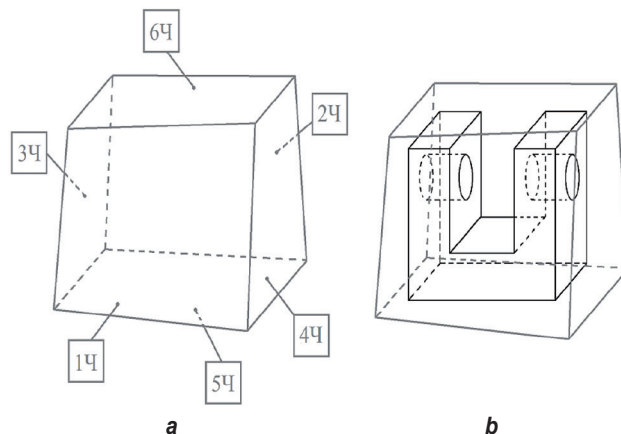


Рис. 3. Заготовка с обозначенными поверхностями (а) и деталь, вписанная в заготовку (b)
Fig. 3. A workpiece with marked surfaces (a) and a part inscribed in the workpiece (b)

Основным положением рассматриваемого подхода к проектированию баз и схем базирования является наличие необходимого и достаточного количества размерных связей, определяющих относительное расположение всех ее поверхностей [20]. Формально это выражается в связности и ацикличности графов размерных связей по трем линейным ($\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z$) и трем угловым ($\vec{\alpha}_x, \vec{\alpha}_y, \vec{\alpha}_z$) координатам. Проектирование процесса обработки детали выполняется с использованием алгоритма, описанным в работах [21].

Вернемся к примеру. Так как на чертеже (см. рис. 1) не указаны связи поверхностей детали с черновыми, проставим их самостоятельно.

Графы размерных связей с добавлением черновых поверхностей показаны на рис. 4. Соблюдая условия выбора черновых поверхностей, получаем, что у поверхности 1Ч будет три базирующих точки $\vec{\alpha}_x, \vec{l}_y, \vec{\alpha}_z$; 3Ч – две базирующих точки $\vec{l}_x$; α_y и 5Ч – одна $\vec{l}_z$.

⁷Леонтьев Л.Б., Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Леонтьев А.Л. Системное проектирование технологических процессов изготовления и восстановления деталей машин: учебное пособие. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. 400 с. EDN: ATPHOR.

⁸Косилов А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.

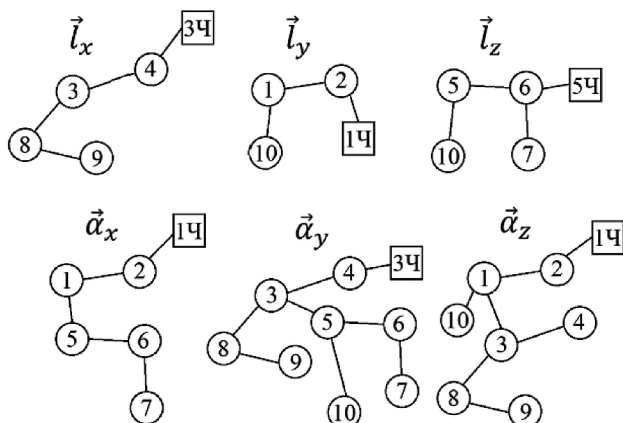


Рис. 4. Графы размерных связей с проставленными черновыми поверхностями

Fig. 4. Graphs of dimensional relationships with marked rough surfaces

Процесс проектирования заключается в следующем. В ходе анализа детали необходимо пронумеровать произвольным образом все ее будущие поверхности, соответствующие чертежу, и реальные (существующие) поверхности заготовки. На основе существующих размерных связей строятся графы размерных связей и матрица смежности, где каждая строка матрицы формально описывает взаимосвязи соответствующей поверхности с другими поверхностями (0 – отсутствие связи, 1 – наличие связи по соответствующему направлению $\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z, \vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$) (рис. 5 а).

Каждая поверхность в матрице смежности представлена в виде шестиклеточной таблицы, формально описывающей с помощью 0 (отсутствие) и 1 (наличие) ограничения свободы по направлениям ($\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z, \vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$) для задания ее положения (пример шестиклеточной таблицы для поверхности 1Ч показан на рис. 5 б).

После построения матрицы смежности проводится анализ наличия совпадений шестиклеточных таблиц существующих поверхностей с поверхностями, которые нужно обработать (несуществующие). Наличие совпадения означает, что поверхность можно обработать, используя существующую поверхность в качестве базы (как показано на рис. 5 а, поверхности 1Ч и 2 имеют одинаковые базисные точки). Затем строка обработанной поверхности переносится в верхнюю часть таблицы, столбец удаляется и поверхность считается обработанной. Далее продолжается поиск совпадений в верхней части таблицы с поверхностями, которые еще не обработаны. Перенос всех поверхностей в статус существующих означает, что все поверхности детали обработаны.

Множество проведенных модельных экспериментов с представленной конфигурацией и выбором различных базисных поверхно-

		1	2	3	4	5	6
существующие поверхности	1Ч		0 1 0 1 0 1				
	5Ч						0 0 1 0 0 0
	3Ч				1 0 0 0 1 0		
несуществующие (необработанные) поверхности	1	0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1	0 0 0 0 0 1		0 0 0 1 0 0	
	2	0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1				
	3	0 0 0 0 0 1		1 0 0 0 1 1	1 0 1 0 1 1	0 0 0 0 1 0	
	4						
	5						
	6						

a
b

X Y Z

l

0	1	0
1	0	1

α

Рис. 5. Фрагмент матрицы смежности (а) и шестиклеточная таблица поверхности 1Ч (б)

Fig. 5. A fragment of the adjacency matrix (a) and a six-cell table of the 1Ч surface (b)

стей показало, что рассматриваемый пример не дает возможности провести обработку детали без перерасчета размерных связей и допусков. Различные комбинации наборов базирующих точек выбранных черновых поверхностей также не приводят к получению последовательности обработки всех поверхностей детали. Во всех случаях для дальнейшей обработки необходимо изменение размерной цепочки и перерасчет допусков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования в этом вопросе и многочисленные модельные эксперименты позволили сформулировать условия, гарантирующие сходимость алгоритма последовательной обработки поверхностей детали в отношении построения последовательности обработки, включающей все обрабатываемые поверхности.

В процессе исследований было отмечено, что особое внимание необходимо уделить графам угловых размерных связей, так как именно они отвечают за возможность смены линейных направлений обработки. Так, например, чтобы после обработки горизонтальной плоскости перейти к обработке вертикальной, необходимо наличие между ними заданной угловой размерной связи. Для полной обработки всей детали необходимо наличие заданных угловых связей между всеми линейными направлениями, т.е. граф связей угловых измерений. Данный граф может быть получен симметрической разностью графов угловых направлений.

Если рассмотреть исследуемый пример (см. рис. 4), можно заметить, что условие наличия связей между поверхностями в угловых направлениях, образующих граф связей угловых измерений, выполняется. Имеются связи между поверхностями 1 и 5 в направлении $\vec{\alpha}_x$, между 3 и 5 в направлении $\vec{\alpha}_y$ и связи между 1 и 3 поверхностями в направлении $\vec{\alpha}_z$.

Наличие графа связей угловых измерений позволяет сформулировать **правила выбора черновых баз**:

Вершины графов угловых связей, входящих в начальный комплект баз (поверхности заготовки) должны иметь непосредственную связь с вершинами, образующими граф связей угловых измерений (рис. 7).

Если одна из вершин графа размерных связей, входящих в начальный комплект баз (по-

верхности заготовки), не имеет непосредственной связи с вершинами, образующими граф связей угловых измерений, то обработка должна начинаться именно с этой поверхности.

В рассматриваемом примере (см. рис. 4) выбор черновых поверхностей и связи с поверхностями, входящими в граф связей угловых измерений, не соответствуют сформулированным правилам. Поэтому были заново подобраны черновые поверхности и связи, соответствующие условиям. Они показаны на рис. 6.

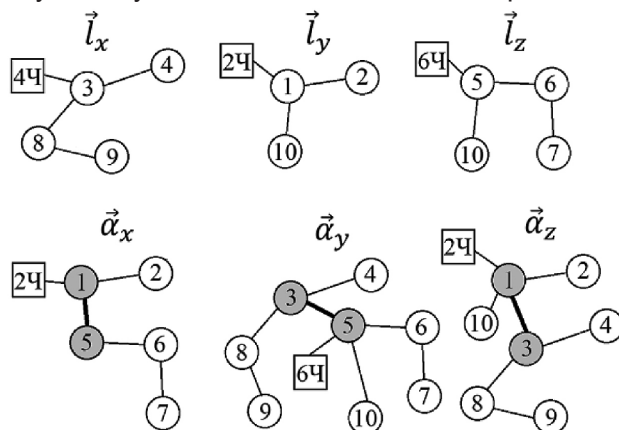


Рис. 6. Вариант подбора черновых поверхностей по разработанным условиям

Fig. 6. A selection option for rough surfaces according to the specified conditions

Модельные эксперименты с различными конфигурациями деталей и выявленными условиями показали, что последовательная обработка поверхностей деталей возможна для различных наборов базирующих точек, при наличии непосредственных связей между выбранными черновыми базирующими поверхностями и поверхностями, которые условно связаны во всех трех угловых направлениях (выделены серым на рис. 6). Данный вариант сочетания черновых и будущих поверхностей показан на рис. 7.

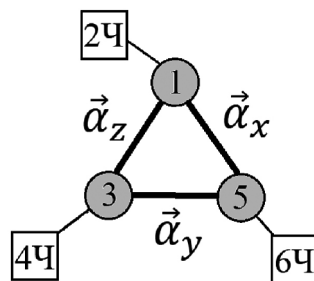


Рис. 7. Вариант сочетания черновых поверхностей и поверхностей детали,

образующих граф связи угловых измерений
 Fig. 7. An option for combining rough surfaces and part surfaces forming an angular measurement connection graph

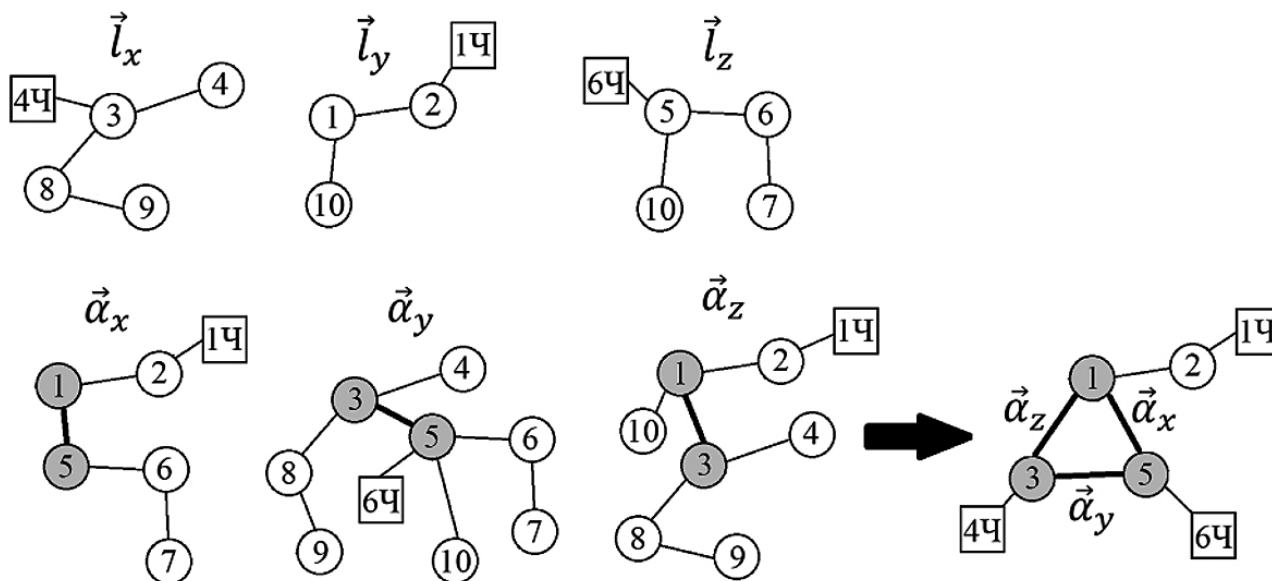


Рис. 8. Второй вариант сочетания черновых поверхностей с поверхностями детали по разработанным условиям

Fig. 8. The second combination option for rough surfaces and part surfaces according to the specified conditions

Исследования позволили выявить другие возможные варианты сочетаний, при которых обработка детали возможна. Одним из таких случаев является вариант, когда одна из базовых (черновых) поверхностей не имеет непосредственной связи с поверхностями детали. В таком случае обработка должна начинаться именно с этой поверхности (рис. 8).

Это значит, что поверхность 1Ч (см. рис. 8) должна выступать в качестве установочной базы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании рассмотренных условий и алгоритма последовательной обработки предложен формальный метод выбора чер-

новых баз. Для выбора черновых поверхностей необходимо, чтобы в процессе конструирования изделия было выполнено условие связи угловых измерений, т. е. группы поверхностей, имеющие размерные связи в направлениях ($\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z$), имели межгрупповые связи в угловых направлениях. При выполнении данного условия конструктором (специалистом) необходимо черновые базирующие поверхности связать с поверхностями, образующими граф связей угловых измерений. Это позволит гарантированно получить последовательность обработки всех поверхностей данной геометрической конфигурации детали без перерасчета допусков и размерных связей.

Список источников

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. Л.: Машиностроение, 2001. 368 с.
2. Базров Б.М. Модульная технология и ее внедрение в механосборочное производство // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 24–30. EDN: SJARMX.
3. Пуш В.Э, Пигерт Р., Сосонкин В.Л. Автоматические станочные системы. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1982. 319 с.
4. Митрофанов С.П. Научная организация труда машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1976. 712 с.
5. Андриченко А.Н. Три поколения российских САПР технологических процессов // CAD/cam/cae Observer. 2017. № 2. С. 28–34. Режим доступа: <http://www.cadcamcae.lv/N110/28-34.pdf> (дата обращения: 30.09.2023).
6. Хараджиев А. Комплексная автоматизация подготовки производства на базе СПРУТ-технологии // САПР и графика. 2000. № 11. Режим доступа: <https://sapr.ru/article/8111> (дата обращения: 30.09.2023).
7. Skander A., Roucoules L., Meyer J.-S.K. Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 37. Iss. 5-6. P. 443–454. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1003-2>.
8. Yusof Yu., Latif K. Survey on computer-aided process planning // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. P. 77–89. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>.

9. Ayadi B., Anselmetti B., Bouaziz Z., Zghal A. Three-dimensional modelling of manufacturing tolerancing using the ascendant approach // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol.39. Iss. 3. P. 279–290. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1225-3>.
10. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. Л.: Машгиз, 1955. 516 с.
11. Балакшин Б.С. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. М.: Машиностроение, 1972. 615 с.
12. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Формализация проектирования процессов обработки резанием. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
13. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Ружицкая Е.В. Антоненкова Т.В. Геометрия неидеальных объектов в инженерной деятельности (машиностроение и робототехника): монография. М.: Знание-М, 2020. 104 с. EDN: AHTHGZ.
14. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Ruzhitskaya E.V. The geometry of non-ideal objects in process engineering for processing parts on machine tools // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2022. P. 165–173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_20.
15. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения: в 2-х кн. Кн. 2: Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1982. 367 с.
16. Яхин А.Б. Проектирование технологических процессов механической обработки. М.: Оборонгиз, 1946. 268 с.
17. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. М.: Высшая школа, 1974. 416 с.
18. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
19. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E., Ignatiev F.Yu. Formation of schemes generating geometric structure of machine parts // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 355–363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063_138.
20. Антоненкова Т.В. Способ формального проектирования структуры технологических процессов // *Технология машиностроения*. 2023. № 3(129). С. 1–12. <https://doi.org/10.23670/IRL.2023.129.51>. EDN: QPTVMU.
21. Игнатъев Ф.Ю., Колесникова О.В., Лелюхин В.Е. Исследование сходимости алгоритма автоматического проектирования технологического процесса механической обработки // *Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике*. 2021. Т. 53. С. 30–37. <https://doi.org/10.17084/20764359-2021-53-30>. EDN: SHRRMZ.

References

1. Bazrov B.M. *Modular technology in mechanical engineering*. Leningrad: Mashinostroenie; 2001, 368 с. (In Russ.).
2. Bazrov B.M. Modular processing and its application in mechanical assembly production. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014;7:24-30. (In Russ.). EDN: SJARMX.
3. Push V.E., Pigert R., Sosonkin V.L. *Automated machining systems*. Moscow: Mashinostroenie; 1982, 319 p. (In Russ.).
4. Mitrofanov S.P. *Scientific organization of labor in mechanical engineering production*. Leningrad: Mashinostroenie; 1976, 712 p. (In Russ.).
5. Andrichenko A.N. Three generations of Russian CAD technological processes. In: *CAD/cam/cae Observer*. 2017;2:28-34. Available from: <http://www.cadcamcae.lv/N110/28-34.pdf> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
6. Kharadzhiev A. Integrated automation of manufacturing preparation based on SPRUT technology. *SAPR i grafika*. 2000;11. Available from: <https://sapr.ru/article/8111> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
7. Skander A., Roucoules L., Meyer J.-S.K. Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;37(5-6):443-454. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1003-2>.
8. Yusof Yu., Latif K. Survey on computer-aided process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;75:77-89. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>.
9. Ayadi B., Anselmetti B., Bouaziz Z., Zghal A. Three-dimensional modelling of manufacturing tolerancing using the ascendant approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;39(3):279-290. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1225-3>.
10. Sokolovskij A.P. *Scientific foundations of the mechanical engineering technology*. Leningrad: Mashgiz; 1955, 516 p. (In Russ.).
11. Balakshin B.S. *Interchangeability and engineering measurements in mechanical engineering*. Moscow: Mashinostroenie; 1972, 615 p. (In Russ.).
12. Starostin V.G., Lelyukhin V.E. *Cutting design formalization*. Moscow: Mashinostroenie; 1986, 136 p. (In Russ.).
13. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Ruzhickaya E.V. Antonenkova T.V. *Geometry of non-ideal objects in engineering (mechanical engineering and robotics)*. Moscow: Znanie-M; 2020, 104 p. (In Russ.). EDN: AHTHGZ.
14. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Ruzhitskaya E.V. The geometry of non-ideal objects in process engineering for processing parts on machine tools. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2022, p. 165-173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_20.
15. Balakshin B.S. *Theory and practice of mechanical engineering technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1982, 367 p. (In Russ.).
16. Yakhin A.B. *Designing technological processes of mechanical processing*. Moscow: Oborongiz; 1946, 268 p. (In Russ.).

17. Korsakov B.C. *Fundamentals of mechanical engineering technology*. Moscow: Vysshaya shkola; 1974, 416 p. (In Russ.).
18. Bazrov B.M. *Technological bases for self-adjusting machine design*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 216 p. (In Russ.).
19. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E., Ignatiev F.Yu. Formation of schemes generating geometric structure of machine parts. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;355-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063_138.
20. Antonenkova T.V. A way to formally design the structure of technological processes. In: *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal Tekhnologiya mashinostroeniya* = International scientific research journal *Engineering Technology*. 2023;3:1-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRL.2023.129.51>. EDN: QPTVMU.
21. Ignatiev F.Yu., Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E. Investigation of the convergence of the automatic design algorithm of the mechanical processing technological process. *Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie* = *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2021;53:30-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.17084/20764359-2021-53-30>. EDN: SHRRMZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Игнатьев Федор Юрьевич,
доцент департамента Компьютерно-интегрированных
производственных систем
Политехнического института,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Россия
✉ f.ignatyev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0006-0317-2133>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fedor Yu. Ignatiev,
Associate Professor of the Department
of Computer-Integrated Production Systems of the
Polytechnic Institute,
Far Eastern Federal University,
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690091, Russia
✉ f.ignatyev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0006-0317-2133>

Вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Contribution of the author

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.02.2024 г.; принята к публикации 25.02.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 25.02.2024.