

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 658.512

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-2-12

**КЛАССИФИКАТОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
С ГРАНИЦАМИ ЗОН ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ
ОРИГИНАЛЬНЫХ НЕКРУГЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
канд. техн. наук, доц. Н.В. БЕЛЯКОВ, С.К. СЕЛЕЗНЁВ
(Витебский государственный технологический университет)
д-р техн. наук, проф. Б.М. БАЗРОВ
(Институт машиноведения имени А.А. Благодатова
Российской академии наук, Москва)

Предложено направление в развитии подготовки управляющих программ для обработки деталей на металлорежущих станках с ЧПУ на базе типизации параметров зон переходных процессов. Показана возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы с границами зон переходных процессов на основе анализа форм обрабатываемых конструктивных элементов, переходов их обработки, а также поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей. Приводятся фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением. Предложены соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ зон переходных процессов. Такой подход создает условия для теоретико-эмпирического имитационного моделирования процессов резания в зонах переходных процессов, обеспечивающего максимальную производительность обработки и стойкость инструментов с учетом воздействия различных факторов, а также сокращения длин рабочих ходов.

Ключевые слова: обрабатываемая поверхность, конструктивный элемент, классификатор, режущий инструмент, ЧПУ, САМ-система, переходный процесс, адаптивные системы, управляющая программа, машиностроение.

Введение. Программирование обработки заготовок деталей машин на металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ) на современных машиностроительных предприятиях осуществляется следующими способами:

- 1) вручную – код программы вводится в текстовом редакторе на персональном компьютере и переносится с помощью носителя информации в управляющую систему станка;
- 2) на стойке – код вводится непосредственно на пульте управления станком, который оснащен клавиатурой и дисплеем для задания команд и визуализации имитации обработки;
- 3) с помощью специализированного программного обеспечения (САМ-систем – Computer Aided Manufactur) – по трехмерной модели детали формируются траектории перемещения инструментов, задаются режимы резания и прочие параметры, а далее с помощью постпроцессора формируется код программы для конкретного станка.

Первый и второй способы применяются на производствах, в основе которых лежат повторяющиеся однотипные переходы и операции обработки несложных по конфигурации заготовок деталей, не требующие больших затрат времени на расчет траекторий, математические и технологические расчеты, а также ввод полученных параметров в систему. Реализация таких операций осуществляется, как правило, на универсальных токарных, фрезерных, сверлильных и других станках с ЧПУ невысокой ценовой категории, а в интеграции станков в единую сеть управления по экономическим соображениям нет необходимости. К пользователям (технологам и операторам) предъявляется требование безупречного владения командами в виде G-кодов.

Третий способ находит применение на производствах сложных по конфигурации заготовок оригинальных некруглых деталей, требующих применения разнообразных переходов и операций. Для их реализации необходимо использовать обрабатывающие центры. Для таких деталей затраты времени на подготовку управляющих программ первым и вторым способами часто в разы превышают затраты времени на обработку. Современные САМ-системы (Mastercam, NX, Solidcam, Edgcam, PowerMill, T-Flex ЧПУ, Компас ЧПУ, Проман ЧПУ и др.) позволяют значительно сократить время программирования станков с ЧПУ за счет возможности автоматизированного определения траекторий перемещений инструментов и определения ряда технологических параметров, а также объединить оборудование в единую сеть передачи данных.

При проектировании операций обработки на металлорежущих станках с ЧПУ важное значение имеет расчет границ и параметров режимов резания при врезании и выходе инструментов (переходных процессах), а также определение положения систем координат заготовки и инструмента в начальной, промежуточных и конечной точках траекторий резания. Во время врезания и выхода инструментов динамически меняются составляющие силы резания, наблюдаются неустойчивость упругих деформаций технологической системы, возрастание уровня вибраций, что существенно влияет на качество обработанной поверхности, может приводить к затуплению, перегреву и поломке инструмента и снижению производительности обработки [1].

Основными направлениями снижения последствий указанных негативных явлений при переходных процессах являются: использование систем адаптивного управления; обеспечение постоянства ряда параметров с помощью изменения режимов резания.

В системах адаптивного управления при переходных процессах используются методы регистрации изменения сил резания и (или) крутящего момента, активной мощности, перемещения слоя металла заготовки, виброакустических сигналов и др. [2–4].

Однако предлагаемые решения адаптивного управления требуют использования специальных сложных и дорогих конструктивных решений, часто являются не в полной мере эффективными ввиду отсутствия математических моделей для управления процессами резания, недостаточности быстродействия механизмов станков, а также отсутствия и (или) невозможности установки из-за неприспособленности станков измерительных датчиков нужных размеров, точности и эффективности.

Параметрами, постоянство которых обеспечивается для снижения негативных последствий переходных процессов, являются: объемная производительность, подача на зуб, погрешность и др. [5; 6]. Особый интерес представляет высокоскоростная обработка, суть которой заключается в том, что при управлении станком при переходных процессах необходимо добиться постоянного малого сечения среза и высокой скорости (в 8–10 раз выше скорости традиционной обработки). При таком подходе из-за постоянной толщины среза уменьшаются колебания сил резания, а выделяющееся тепло переходит не в заготовку и инструмент, а в стружку.

Реализовать высокоскоростную обработку возможно только на самых современных станках с новыми типами приводов главного движения и подач, обеспечивающих соответствующие высокие значения частот вращения шпинделя, подач на рабочем и холостом ходах, дискретность перемещений, конструкциями направляющих, подшипниковых узлов, а также новыми конструкциями режущего и вспомогательного инструментов. Особенности систем ЧПУ для высокоскоростной обработки являются: короткий цикл определения траекторий; заложенные функции искусственного интеллекта (например, система контурного и наноконтурного управления (Modeler Control для Fanuc), система учета износа инструмента); реализация алгоритма просмотра кадров look-ahead со скоростью 100...200 кадров в секунду и др. Стоимость таких станков в сотни раз превышает стоимость традиционных станков с ЧПУ, составляющих по оценкам экспертов 85–95% отечественного станочного парка.

Подготовка управляющих программ для высокоскоростной обработки производится с использованием САМ-систем, что требует соответствующего инструментария. Как показал анализ САМ-систем, одним из лидеров в этом направлении является компания CNC Software (система Mastercam). В системе для обработки фрезерованием предлагается использовать технологию динамических перемещений Dynamic Motion, согласно которой снимаемый припуск разбивается на одинаковые микрообъемы. Далее назначаются режимы резания для удаления этих микрообъемов при каждом срезе материала, и таким образом формируется траектория перемещений инструмента. Схожие подходы предлагаются в системе NX (компания Siemens) в виде автоматической оптимизации подачи Automatic feed rate optimization. Система рассчитывает не микрообъемы снимаемого материала, а их усредненные значения, что позволяет использовать алгоритмы и для традиционной обработки.

Но технологии Dynamic Motion и Automatic feed rate optimization специализируются на обработке фрезой и не предусматривают использования других, например, осевых, инструментов. Так, для обработки сверлением при названных подходах невозможно прогнозировать влияние на качество обработки (точность размеров, шероховатость, допуски формы и расположения) следующих негативных факторов: наростообразование, изменение твердости поверхности заготовки, автоколебания, изменение векторов сил резания и деформация технологической системы, износ инструментов, температурные воздействия и др.

Таким образом, использование систем адаптивного управления, а также известные алгоритмы обеспечения постоянства параметров вносят существенный вклад в решение проблемы обеспечения качества, но имеют ограниченную специфическую область применения.

При подготовке управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ технологи и операторы чаще всего решают задачи программирования обработки типовых элементарных поверхностей (плоскости, уступы, окна, открытые отверстия и т.п.). Для ускорения процесса их программирования широкое распространение получили стандартные циклы и специальные G-коды, а также калькуляторы режимов резания. Однако, кроме описанного инструментария, современные средства программирования станков с ЧПУ не позволяют для типовых конструктивных элементов и различных форм режущих частей инструментов в автоматическом режиме определять и (или) задавать длины врезаний, устойчивого резания и выходов, координаты начальных, промежуточных и конечных положений инструментов, а также обоснованно при этом менять режимы резания.

Для типовых конструктивных элементов зоны врезания и выхода инструментов можно классифицировать на основе учета форм обрабатываемых поверхностей и режущих частей инструментов, а также рассчитать геометрические параметры этих зон. Классификация и расчет геометрических параметров зон врезания и выхода инструментов позволяют теоретико-эмпирически имитационно моделировать процессы резания в зонах переходных процессов для обеспечения максимальной производительности обработки и стойкости инструментов с учетом воздействия различных негативных факторов.

Поэтому *целью работы* является разработка классификатора типовых решений и математических моделей расчета параметров зон переходных процессов при обработке оригинальных некруглых деталей для последующего управления станком с ЧПУ на их основе.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены задачи: проведен анализ признаков классификации и классификаторов конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы; разработан классификатор типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами переходных процессов для обработки поверхностей деталей; разработаны математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ переходных процессов при обработке типовых элементов.

Основная часть. Для исследования и решения поставленных в работе задач использовались методы иерархической классификации, аналитической геометрии, математического моделирования и теории автоматизации. Были проанализированы чертежи деталей, технологические процессы их изготовления, а также каталоги режущих инструментов, литературных источников и интернет-изданий. Объект разработки – классификаторы конструктивно-технологических элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы с границами переходных процессов.

Выполненный анализ информационных источников по систематизации объектов производства и конструктивных элементов различных хронологических периодов показал, что в своем развитии их классификация прошла четыре основных этапа. На первом этапе (до 1940-х гг.) классификация деталей проводилась локально отдельными исследователями на некоторых предприятиях. В это время были заложены идеи типовой и групповой технологий, развиваемые на втором этапе (до 1970-х гг.) учеными А.П. Соколовским, С.П. Митрофановым, Ф.С. Демьянюком, А.Я. Малкиным, В.Б. Гокунном и др. К основным признакам классификации деталей относятся геометрическая форма, точность, габаритные размеры и материал. Этот этап характеризуется разнообразием в классификации деталей по геометрическому признаку. Так, А.П. Соколовский предлагает все многообразие деталей в зависимости от их конфигурации представлять пятнадцатью классами, Ф.С. Демьянюк – семью, а А.Я. Малкин – пятью. Внутри классов в зависимости от технологических особенностей выделяются подклассы, группы, виды, типы. При этом в отдельные классы выделяются некруглые детали сложной формы.

Третий этап (до 2000-х гг.) характеризуется унификацией решений типовой и групповой технологий для создания иллюстрированного определителя деталей общемашиностроительного применения, классификатора ЕСКД, конструкторско-технологического классификатора изделий машиностроения и приборостроения ОКРБ 500-94, а также технологического классификатора ОК 021-95 (разработаны под руководством Е.А. Панфилова, Ю.И., Блохина Н.В. Арбузовой и др.). В частности, классификатор ЕСКД содержит описания деталей шести классов: тела вращения, не относящиеся к телам вращения детали (корпусные, опорные, емкостные) и др. Классы имеют в структуре информацию о виде, подклассе, группе и подгруппе, различающиеся по специальным признакам. Указанные классификаторы решают задачу создания единой системы деталей машиностроения и создают основу работы САПР ТП адресации для несложных по конфигурации деталей типа валов, втулок, осей, зубчатых колес и т.п. (Г.К. Горанский, Н.М. Капустин, И.П. Норенков и др.).

Третий этап также характеризуется созданием основ универсальных САПР ТП синтеза, пригодных для оригинальных некруглых деталей сложной формы. Синтез технологии подразумевает декомпозицию детали на конструктивные элементы (линии, поверхности, симплексы, шестимерные векторы, функциональные модули, элементы конструкции и др.), которые далее объединяются в однородные группы с определением линейных и угловых связей между ними для последующего решения прикладных задач. Так, в работах В.Г. Старостина и В.Е. Лелюхина поверхности предлагается представлять в виде шестимерных векторных матричных форм. В работах В.Д. Цветкова рассматриваются вопросы синтеза единичных технологических процессов на основе многоступенчатого итерационного поиска с помощью классификаторов элементарных поверхностей, согласно которому все конструктивные элементы делятся по кинематическому признаку на классы (вид направляющей), подклассы (вид образующей), группы (уточнение формы образующей), виды (форма по длине) и типы (отношение к материалу). В работах Б.М. Базрова для решения задач организации производства, инструментального обеспечения, проектирования приспособлений и др. впервые предлагается рассматривать деталь не как совокупность взаимосвязанных поверхностей, а как совокупность взаимосвязанных модулей поверхностей (функциональных модулей). Все модули поверхностей разделены на три класса по служебному признаку: базирование, рабочие и связующие. Полная классификация модулей содержит 26 наименований в зависимости от сочетания элементарных поверхностей. Введено понятие интегрального модуля поверхностей и соответствующего ему технологического блока [7–9].

Современный четвертый этап характеризуется разработкой классификаторов для решения прикладных задач кастомизации продукции, обеспечения гибкости производства и ремонта, создания новых методов обработки и нанесения покрытий, формализации, алгоритмизации и автоматизации процедур синтеза технологии и др. Например, в работах Е.А. Кудряшова классификация объектов производства по способу образования и обработки способствует решению задачи восстановления утраченной работоспособности деталей машин. В работах И.Л. Волчекевича предложенный классификатор деталей по схожести конструктивно-технологических признаков используется при планировании программ выпуска участков и цехов машиностроительных предприятий. В работах Ю.А. Харламова для разработки специализированной САПР ТП предложен технологический классификатор изделий машиностроения и их поверхностей с покрытиями, полученными методами газотермического напыления. В работах Д.А. Вишневого проведена систематизация и классификация деталей по условиям изнашивания для развития и совершенствования методов расчета и оценки износа основных видов деталей и узлов машин металлургического комплекса. В работах Ш.Х. Нгуенга классификация и параметризация поверхностей свободной формы призвана способствовать решению задач оптимизации обработки сложных деталей на станках с ЧПУ [10–12].

Однако для решения задач синтеза технологии отсутствуют классификаторы типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами переходных процессов для обработки поверхностей оригинальных некруглых деталей сложной формы, а также соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования, учитывающие границы этих процессов.

На основе проведенного анализа чертежей и технологических процессов изготовления оригинальных некруглых деталей сложной формы установлено, что все многообразие обрабатываемых элементарных конструктивных элементов таких деталей можно свести по кинематическому признаку их образования к трем основным классам: плоским, вращения и винтовым, а поверхностей врезаний и выходов инструментов – к двум: плоским и вращения. Для формальной идентификации обрабатываемых конструктивных элементов, а также поверхностей врезаний и выходов внутри классов выделен ряд иерархических признаков и определен состав. Так, в класс обрабатываемых поверхностей вращения предлагается включить подклассы: элементарные, продольные и торцовые канавки, а подкласс элементарные предлагается делить на цилиндры и конусы, которые в свою очередь делятся на два вида (с входом-выходом и закрытые) и два типа (наружные и внутренние). А в класс обрабатываемых плоских конструктивных элементов предлагается включить подклассы: плоскости, пазы, выступы и окна, а подкласс пазы предлагается делить на: прямоугольные, трапецеидальные, Т-образные и наклонные, которые в свою очередь можно разделить на два вида (с входом-выходом и закрытые).

Установлены теоретически возможные и наиболее часто используемые варианты взаимного расположения обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей врезаний и выходов инструментов. К примеру, ось обрабатываемого элементарного цилиндрического внутреннего конструктивного элемента может пересекаться с осью наружной цилиндрической поверхности вращения под прямым углом и углом, отличным от прямого, скрещиваться под прямым углом и углом, отличным от прямого. Совместный анализ форм поверхностей входов-выходов инструментов, а также обрабатываемых поверхностей позволил предложить систему классификации их взаимных расположений (рисунок 1).

Разработан классификатор переходов обработки конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, а также таблица соответствия их идентификаторов переходам обработки и видам режущих инструментов в зависимости от поверхностей входов-выходов.

Анализ каталогов фирм производителей режущих инструментов позволил свести все многообразие форм их режущих частей к ряду вариантов. Так, режущие части твердосплавных пластин современных торцовых фрез сводятся к четырем вариантам, а сверл – к восьми: спиральное, шнековое, эжекторное с одноплоскостной заточкой, спиральное с двухплоскостной заточкой; спиральное с закругленными режущими кромками; спиральное конструкцией В.И. Жирова и др. [13; 14].

Совместный анализ форм обрабатываемых конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, переходов их обработки, а также поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей дает возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов. На рисунках 2 и 3 показаны фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением.

На рисунках 2 и 3: $L_{вр}$ – длина врезания $L_{вых}$ – длина выхода; W_n , W_k , E_n и E_n – системы координат заготовки и инструмента в начальных и конечных точках; $L_{под}$ – длина подвода инструмента (принимается 2...3 мм); $L_{нер}$ – расстояние между системой координат заготовки и точкой начала врезания инструмента; $L_{квых}$ – расстояние между системой координат заготовки и точкой начала выхода инструмента; $L_{вр2}$ – длина врезания, обусловленная геометрией заготовки; $L_{вых1} = L_{вр1}$ – длина врезания (выхода), обусловленная геометрией режущей части; $L_{нер}$ – длина перебега (принимается 2...3 мм); $L_{вых2}$ – длина выхода инструмента, обусловленная геометрией заготовки; $Z_{нер1}$, $Z_{нер2}$, $Z_{квых1}$, $Z_{квых2}$ – координаты начального и конечного положений инструмента в системе координат заготовки.

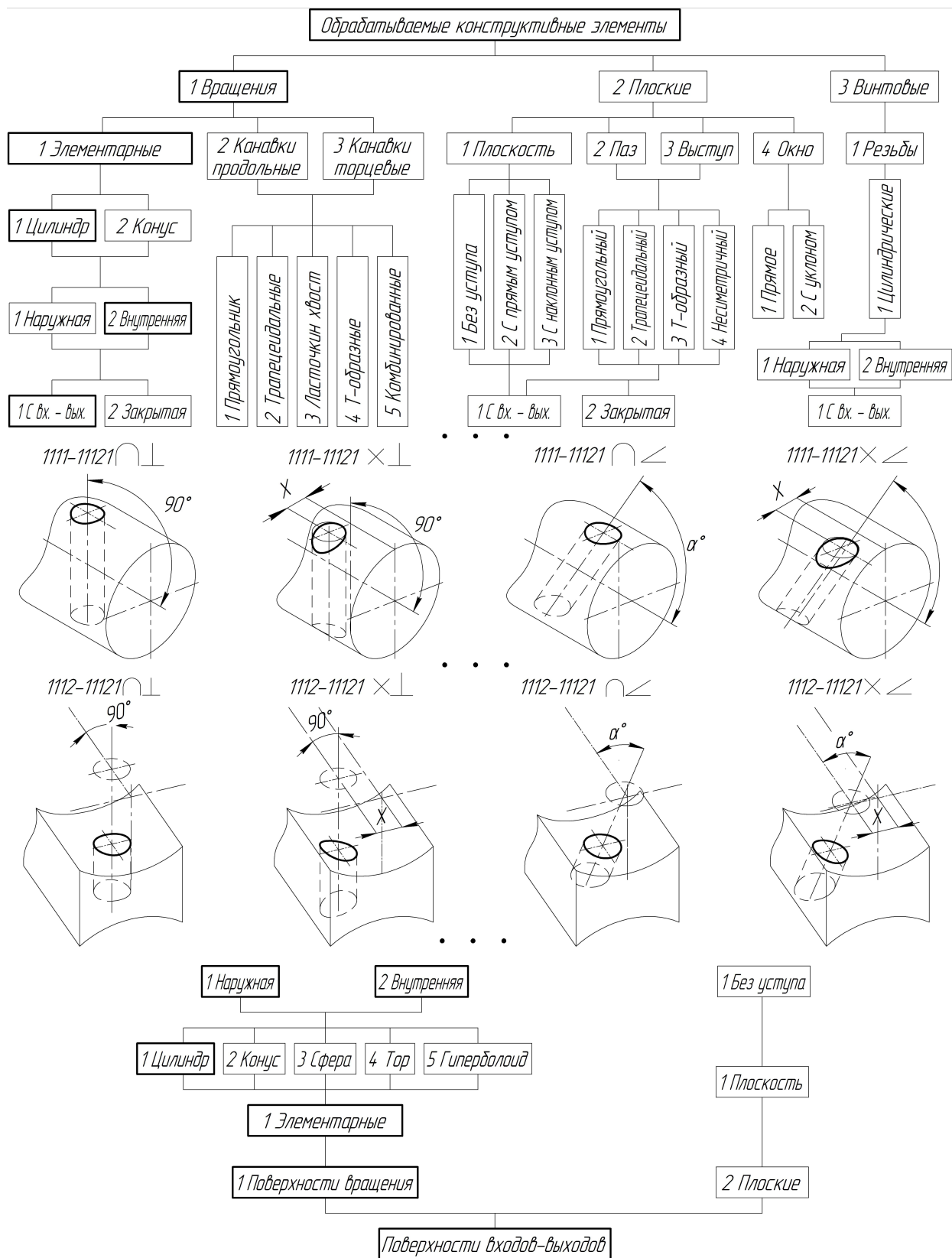


Рисунок 1. – Элементы системы классификации взаимных расположений обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей входов-выходов

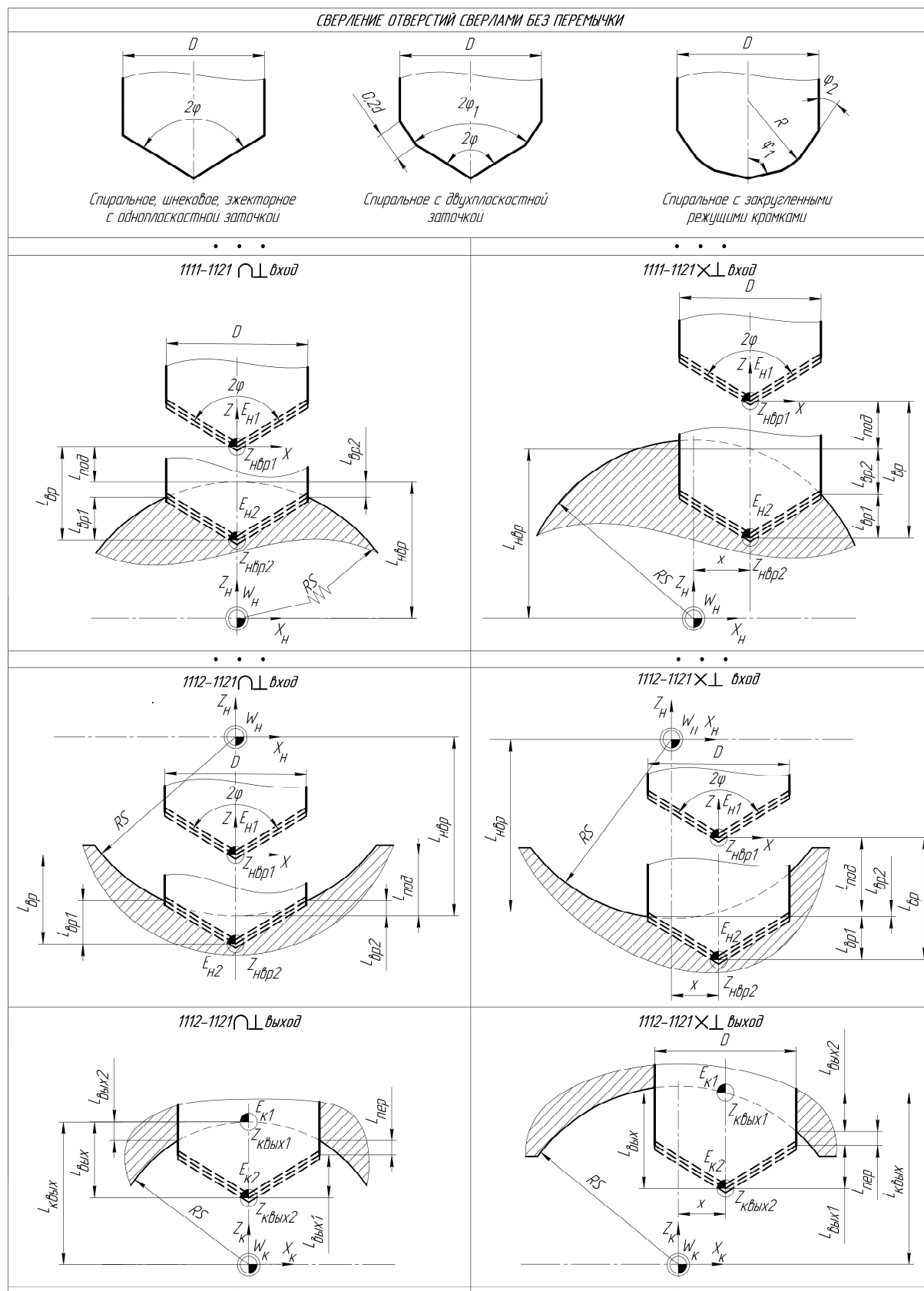


Рисунок 2. – Фрагменты каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов (сверление сверлами без перемычки)

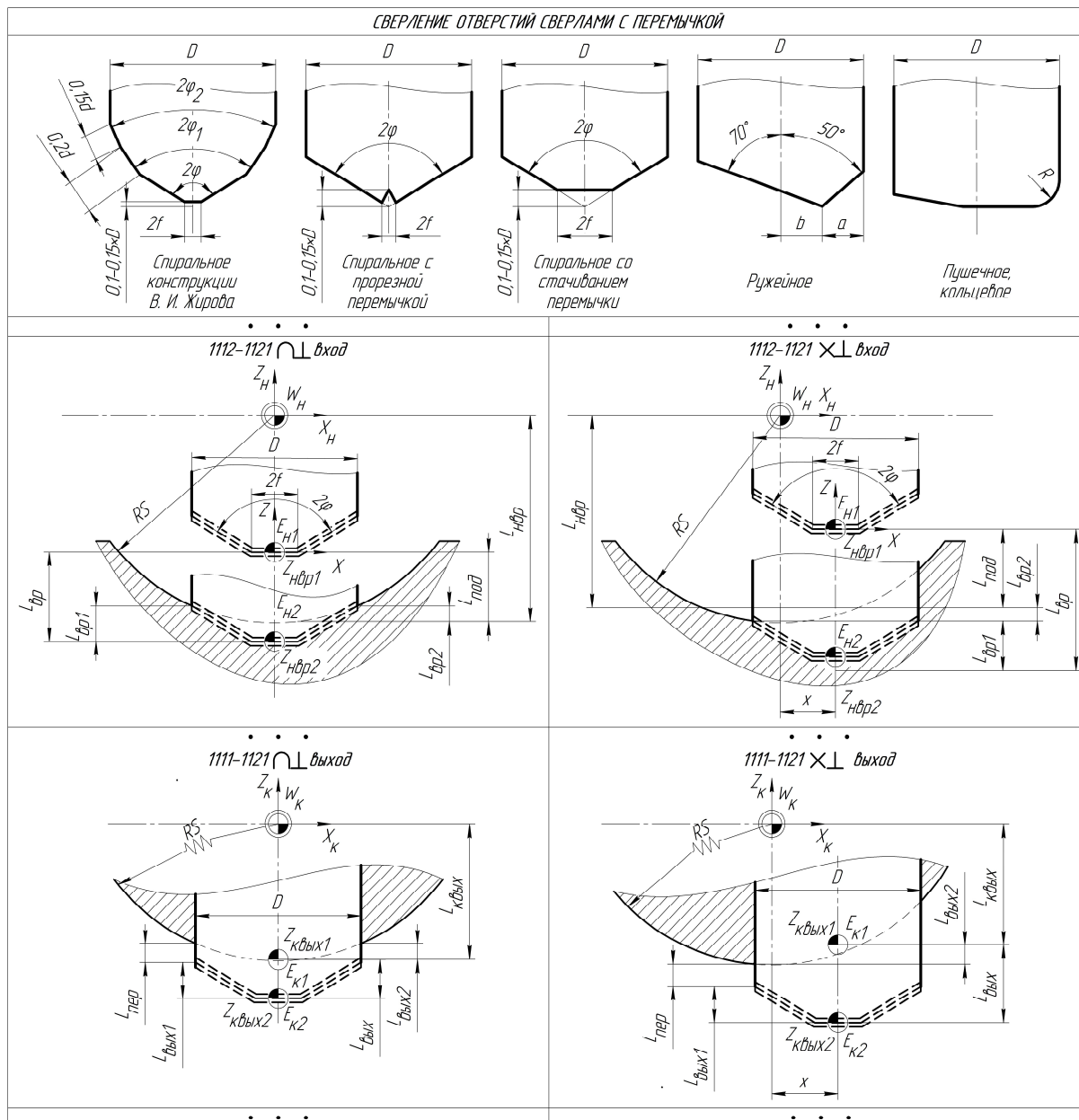


Рисунок 3. – Фрагменты каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов (сверление сверлами с перемычкой, а также ружейным, пушечным и кольцевым)

Составлены модели для расчета указанных параметров. Так, например, для варианта «1111-1121 $\cap \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{нр} = RS, \quad L_{нр2} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad L_{нр} = L_{под} + L_{нр1} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{нр1} = RS + L_{под}, \quad Z_{нр2} = RS - \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{нр1}.$$

Для варианта «1111-1121 $\times \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{нр} = \sqrt{RS^2 - x^2}, \quad L_{нр2} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2},$$

$$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} + \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2}, \quad Z_{\text{вп1}} = \sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{нод}},$$

$$Z_{\text{вп2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \left(\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\cap \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{вп}} = RS, \quad L_{\text{вп2}} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} - RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{вп1}} = -RS + L_{\text{нод}}, \quad Z_{\text{вп2}} = -RS + \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\times \perp$ вход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{вп}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, \quad L_{\text{вп2}} = \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2}, \quad L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} + \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2},$$

$$Z_{\text{вп1}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{нод}}, \quad Z_{\text{вп2}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} - \left(\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\cap \perp$ выход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{квых}} = RS, \quad L_{\text{квых2}} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad L_{\text{квых}} = L_{\text{вп}} + L_{\text{квых1}} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{квых1}} = RS, \quad Z_{\text{квых2}} = -RS + \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\times \perp$ выход» (см. рисунок 2):

$$L_{\text{квых}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, \quad L_{\text{квых2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2}, \quad L_{\text{квых}} = L_{\text{вп}} + L_{\text{квых1}} + \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2},$$

$$Z_{\text{квых1}} = \sqrt{RS^2 - x^2}, \quad L_{\text{квых2}} = \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$Z_{\text{квых2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \left(\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right) - L_{\text{квых1}} - L_{\text{вп}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\times \perp$ вход» (см. рисунок 3):

$$L_{\text{вп}} = \sqrt{RS^2 - (x + f)^2}, \quad L_{\text{вп2}} = \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - (x + f)^2},$$

$$L_{\text{вп}} = L_{\text{нод}} + L_{\text{вп1}} + \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - (x + f)^2}, \quad Z_{\text{вп1}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{нод}},$$

$$Z_{\text{вп2}} = -\sqrt{RS^2 - (x + f)^2} - \left(\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - (x + f)^2} \right) - L_{\text{вп1}}.$$

Для варианта «1112-1121 $\cap \perp$ выход» (см. рисунок 3):

$$L_{\text{квых}} = \sqrt{RS^2 - f^2}, \quad L_{\text{квых2}} = BC = \sqrt{DE^2 - BE^2} - \sqrt{AD^2 - AC^2} = \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$L_{\text{квых}} = L_{\text{квых1}} + L_{\text{вп}} - \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad Z_{\text{квых1}} = -\sqrt{RS^2 - f^2},$$

$$Z_{квых2} = -\sqrt{RS^2 - f^2} - L_{вых1} - L_{пер} + \left(\sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right).$$

Для варианта «1112-1121 × ⊥ выход» (см. рисунок 3):

$$L_{квых} = \sqrt{RS^2 - f^2}, L_{вых} = L_{вых1} + L_{пер} - \sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, Z_{квых1} = -\sqrt{RS^2 - f^2},$$

$$Z_{квых2} = -\sqrt{RS^2 - f^2} - L_{вых1} - L_{пер} + \left(\sqrt{RS^2 - f^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right).$$

Для спирального, шнекового и эжекторного сверл с одноплоскостной заточкой

$$L_{сп1} = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \phi};$$

для спирального сверла с двухплоскостной заточкой

$$L_{сп1} = \frac{D - 0,2D \cdot \sin \phi_1}{2 \operatorname{tg} \phi} + 0,2D \cdot \cos \phi_1;$$

для сверла с закругленной режущей кромкой

$$L_{сп1} = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}};$$

для спирального сверла конструкции В.И. Жирова

$$L_{сп1} = \left(\frac{D}{2} - f - 0,2D \cdot \sin \phi_1 - 0,15D \cdot \sin \phi_2 \right) \cdot \operatorname{ctg} \phi + 0,2D \cdot \sin \phi_1 \cdot \operatorname{ctg} \phi_1 + 0,15D \cdot \sin \phi_2 \cdot \operatorname{ctg} \phi_2;$$

для спирального сверла с прорезной перемычкой

$$L_{сп1} = \left(\frac{D}{2} - f \right) \cdot \operatorname{ctg} \phi;$$

для спирального сверла со стачиваемой перемычкой

$$L_{сп1} = \left(\frac{D}{2} - f \right) \cdot \operatorname{ctg} \phi;$$

для ружейного сверла

$$L_{сп1} = a \cdot \operatorname{ctg} \phi_1;$$

для пушечного, кольцевого, со сменными пластинками

$$L_{сп1} = R.$$

Заключение. Разбор современных тенденций в управлении металлорежущими станками с ЧПУ позволил предложить направление в развитии подготовки управляющих программ для обработки деталей на основе типизации параметров зон переходных процессов.

Проведенный анализ форм обрабатываемых конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, переходов их обработки, а также поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей дает возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов. Приводятся фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением, а также соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ зон переходных процессов.

Классификация и типизация зон входов-выходов инструментов при программировании обработки деталей на станках с ЧПУ создает условия для сокращения затрат машинного времени за счет уменьшения длин рабочих ходов, а также для теоретико-эмпирического имитационного моделирования процессов резания в зонах переходных процессов, обеспечивающего максимальную производительность обработки и стойкость инструментов с учетом воздействия различных факторов.

Разработки могут использоваться: в IT-компаниях для совершенствования САМ-систем при создании фичеров и макросов, а также развития стандартных циклов обработки; в технологических бюро предприятий

для программирования оборудования с ЧПУ и проектировании наладок станков; в учебном процессе для подготовки специалистов в области машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодков В.А., Карчаидзе А.А. Особенности единичного цикла процесса прерывистого резания // Вопросы науки и образования. – 2020. – № 20(104). – С. 4–10.
2. Козочкин М.П., Порватов А.Н., Дуйсенгали А. Система адаптивного управления станочным оборудованием по сигналам вибрации и активной мощности // Автоматизация и управление в машиностроении. – 2016. – № 1(23). – С. 17–25.
3. Мустафаев Г.А., Сидорчик Е.В. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станке с ЧПУ // Молодой ученый. – 2013. – № 9(56). – С. 60–62.
4. Каштальян И.А., Шелег В.К., Орукари Б. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 115–126.
5. Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape / P. Vavruska, M. Pesice, P. Zeman et al. // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 16. – 100762. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100762
6. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Параметрическое управление подачей при фрезеровании сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. – 2017. – № 8-1. – С. 59–64.
7. Цветков В.Д., Ящерицын П.И. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. – Минск: Наука и техника, 1979. – 261 с.
8. Лелюхин В.Е. Классификация методов формообразования поверхностей при изготовлении детали // Вестн. инженер. школы ДВФУ. – 2012. – № 1(10). – С. 14–17.
9. Базров Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства. – М.: КУРС, 2023. – 324 с.
10. Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 4(45). – С. 3–8.
11. Волчкевич И.Л., Галий В.В. О задачах классификации деталей на ранних этапах проектирования технологических комплексов // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. – 2015. – № 10. – С. 100–107.
12. Нгуен Ш.Х. О классификации поверхностей свободной формы: обзор // Новая наука: Современное состояние и пути развития. – 2016. – № 12-4. – С. 99–105.
13. Беляков Н.В., Попок Н.Н. Основы автоматизированного проектного базирования в субтрактивном и аддитивном машиностроительных производствах. – Витебск: Витеб. гос. технол. ун-т, 2023. – 183 с.
14. Попок Н.Н., Беляков Н.В., Селезнёв С.К. Система поддержки принятия решений по определению параметров размерной настройки сверл для программирования обработки отверстий на станках с ЧПУ // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2023. – № 2(14) – С. 50–63.

REFERENCES

1. Solodkov, V.A. & Karchaidze, A.A. (2020). Osobennosti edinichnogo tsikla protsessa preryvistogo rezaniya. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 20(104), 4–10. (In Russ.).
2. Kozochkin, M.P., Porvatov, A.N. & Duisengali, A. (2016). Sistema adaptivnogo upravleniya stanochnym oborudovaniem po signalam vibratsii i aktivnoi moshchnosti. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii*, 1(23), 17–25. (In Russ.).
3. Mustafae, G.A. & Sidorchik, E.V. (2013). Ispolzovanie datchikov adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya kachestva obrabotki detalei na stanke s ChPU. *Molodoi uchenyi*, 9(56), 60–62. (In Russ.).
4. Kashtal'yan, I.A., Sheleg, V.K. & Orukari, B. (2015). Diskretnoe upravlenie protsessami rezaniya na tokarnykh stankakh s chislovyim programmym upravleniem [Discrete control of cutting processes on lathes with numerical control]. *Vesti NAN Belarusi. Seriya fizika- tekhnicheskikh nauk [News of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Technology Series. Sci.]*, (4), 115–126. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Vavruska, P., Pesice, M., Zeman, P. & Kozlok, T. (2022). Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape. *Results in Engineering*, (16), 100762. DOI 10.1016/j.rineng.2022.100762 (In Engl.).
6. Kozlov, A.M. & Malutin, G.E. (2017). Parametricheskoe upravlenie podachei pri frezerovanii slozhnykh poverkhnostei na stankakh s ChPU [Parametric feed control when milling complex surfaces on CNC machines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical science]*, (8-1), 59–64. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Tsvetkov, V.D. & Yashcheritsyn, P.I. (1979) *Sistemno-strukturnoe modelirovanie i avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (In Russ.).
8. Lelyukhin, V.E. (2012). Klassifikatsiya metodov formoobrazovaniya poverkhnostei pri izgotovlenii detali [Classification of methods for shaping surfaces in the manufacture of parts]. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU [Vestnik of the FEPU engineering school]*, 1(10), 14–17. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Bazrov, B.M. (2023). *Bazis tekhnologicheskoi podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Moscow: KURS. (In Russ.).
10. Kudryashov, E.A., Altukhov, A.Yu & Lunin, D.Yu (2009). Tekhnologicheskii klassifikator detalei i poverkhnostei, podlezhashchikh obrabotke rezaniem [Technological classifier of parts and surfaces subject to cutting] *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) [Metal processing (technology, equipment, tools)]*, 4(45), 3-8. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Volchkevich, I.L. & Galii, V.V. (2015). O zadachakh klassifikatsii detalei na rannikh etapakh proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov [On the tasks of classifying parts at the early stages of designing technological complexes]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical science]*, (10), 100–107. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Nguen, Sh. Kh. (2016). O klassifikatsii poverkhnostei svobodnoi formy. *Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya*, (12-4), 99–105. (In Russ.).

13. Belyakov, N.V., & Popok, N.N (2023) *Osnovy avtomatizirovannogo proektnogo bazirovaniya v subtraktivnom i additivnom mashinostroitel'nykh proizvodstvakh* [Fundamentals of automated design basing in subtractive and additive engineering industries]. Vitebsk: Vitebsk State Technological University. (In Russ.).
14. Popok N.N., Belyakov N.V. & Seleznev S.K. (2023) Sistema podderzhki prinyatiya reshenii po opredeleniyu parametrov razmernoï nastroiки sverl dlya programmirovaniya obrabotki otverstii na stankakh s ChPU [Decision support system for determining the parameters of dimensional adjustment of drills for programming the processing of holes on CNC machines]. *Vestnik BarGU. Seriya Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of BarSU. Series Technical science], 2(14), 50–63. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 26.11.2024

**CLASSIFIER OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL ELEMENTS
WITH BOUNDARIES OF TRANSITION ZONES FOR PROCESSING PROGRAMMING
ORIGINAL NON-ROUND PARTS ON CNC MACHINES**

N. POPOK

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

N. BELYAKOV, S. SELEZNEV

(Vitebsk State Technological University)

B. BAZROV

(Mechanical Engineering Research Institute

of the Russian Academy of Sciences, Moscow)

A direction in the development of the preparation of control programs for machining parts on CNC metal-cutting machines based on the typification of parameters of transient zones is proposed. The possibility of creating a catalog of typical parameterized structural and technological elements of original non-circular parts of complex shape with boundaries of transition zones based on the analysis of shapes of processed structural elements, transitions of their processing, as well as surfaces of inputs and outputs of tools and their cutting parts is shown. Fragments of such a catalog are given for processing elementary cylindrical internal structural elements by drilling. Appropriate mathematical models are proposed to determine the parameters of dimensional adjustment of equipment, taking into account the boundaries of transient zones. This approach creates conditions for theoretical and empirical simulation of cutting processes in transition zones, ensuring maximum processing performance and tool durability, taking into account the effects of various factors, as well as reducing the length of working strokes.

Keywords: work surface, structural element, classifier, cutting tool, CNC, CAM system, transient process, adaptive systems, control program, mechanical engineering.