

Информационно-технологические основы системы автоматизированного проектирования многоуровневой базовой групповой технологии

Часть I

Ю. П. Ракунов, В. В. Абрамов, А. Ю. Ракунов

Рассматриваются информационно-технологические принципы и методология системы многоуровневой базовой групповой технологии (МБГТ), использующие нисходящее и восходящее проектирование технологических процессов (ТП) методом «анализа-синтеза» конструкторско-технологической информации. Применение метода синтеза для решения задачи перебора технически возможных вариантов интегрируемых переходов, позиций и установов на профессиональных персональных компьютерах при правильном заполнении таблиц-матриц технологом средней квалификации дает возможность получения оптимального для существующего производства ТП механической групповой обработки высокоточных токарных деталей простой и сложной формы. Система МБГТ позволяет формализовать процесс принятия решения на оптимальном уровне по синтезу групповых инструментальных наладок, выбору модели унифицированного инструмента и режимов резания с реальным прогнозом стойкости резцов. Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются существенное повышение качества разработанной групповой технологии и резкое сокращение сроков технологической подготовки современного высокотехнологичного прецизионного производства.

Ключевые слова: многоуровневая базовая технология, нисходящее и восходящее проектирование, автоматизация проектирования, метод «дедукции-индукции», метод «анализа-синтеза», принципы разработки и типаж унифицированного инструмента, групповая прецизионная технология, оптимизация процессов механической обработки

УДК 621.9 | ВАК 2.5.5 DOI: 10.22184/2499-9407.2024.36.3.58.65

Введение

Система автоматизации проектирования групповых технологических процессов (САПР ГТП) включает методику как выбора схем базирования установочных приспособлений, режущего инструмента (РИ), так и синтеза групповых инструментальных наладок (ГИН), назначения режимов оптимального резания (РОР), разработки надежных ресурсосберегающих ГТП, обеспечивающих заданное качество деталей машин и приборов [1]. В работах [1–8] излагаются методические основы САПР ГТП, где основное внимание уделено процессам групповой механической обработки деталей на станках с ЧПУ и гибких производственных систем. Даны типовые структуры САПР ГТП и фрагменты автоматизации проектирования операций и переходов на отдельных этапах ГТП, но ни в одной из них уровни технологии не доводятся до проектирования оптимальных ГИН и выбора РОР для каждого РИ. Основные принципиальные недостатки существующих САПР приведены в работе [9].

Создание САПР ГТП на основе конструктивно-технологических параметров предмета производства (детали) является одной из наиболее актуальных и нерешенных пока проблем автоматизации проектирования. Главной причиной этого является отсутствие общего решения проблемы синтеза структур объектов проектирования, инвариантного их классу [3–6, 9–11].

Понятие «комплексная деталь», на котором построены все используемые САПР ГТП и разработанные в прошлом [1, 3–6], органично содержит в себе принцип смешения как уровней технологии, так и уровней информации, что приводит к принятию неоптимальных решений при синтезе ГИН наладок: ГИН получаются избыточными, трудоемкими в наладке и неуправляемыми. «Комплексная деталь» – не реальная деталь, а скомпонованный, а точнее скомпилированный контур, состоящий из типов (без указания диапазонов и точности размеров) обрабатываемых поверхностей (ОП) реальных деталей, которые по умозрительному мнению компоновщика должны войти в группу, изготавливаемую по одному технологическому маршруту и на одних типоразмерах станков. Таким образом, существующие САПР ГТП характеризуются недостаточной формализацией процесса принятия технологических решений в связи с отсутствием типажей унифицированных режущих инструментов (УРИ), специально спроектированных для ГИН и, следовательно, отсутствием конкретных рекомендаций по назначению или выбору РОР, а также данных по стойкости УРИ и минимально необходимому количеству проходов (рабочих ходов) для получения заданного качества ОП с учетом технологической наследственности.

Главной и типичной методической ошибкой многих исследователей является то, что содержание процесса, в том числе технологического, подменяется формой его

представления, а конструктивно-технологическая информация заменяется и маскируется присвоением ее атрибутам отвлеченных от содержания формальных кодов, якобы понятных машинным языком (и хранящихся в базах данных памяти машины). То же самое явление происходит, когда на различных блок-схемах технологические действия заменяются и изображаются квадратами или кружочками с цифрами (обычно порядковыми), а логические правила принятия решений искажаются или вовсе пропадают, то есть причинно-следственные связи подменяются формальными связями между этими квадратами или кружочками. В этих случаях алгоритм решения задачи не выявляется, а запутывается в пересекающихся сетях этих беспорядочных, порой нелогичных связей. Примерами таких блок-схем могут служить:

- «Схема информационных связей и последовательность проектирования процесса обработки» на рис. 1 [5, с. 27];
- «Схема проектирования сложных дискретных систем» на рис. 2 [5, с. 28];
- «Схема определения вариантов последовательности обработки поверхностей детали» на рис. 3 [5, с. 29].

Эти недостатки не дают возможности разрабатывать рациональные инструментальные групповые наладки для конкретных установов (деталеопераций) и оптимизировать ГТП, например, токарной обработки конкретных деталей или групп деталей (заготовок) [1, 3, 4–8].

При проектировании сложных систем, к которым относятся и технологические процессы (ТП) изготовления деталей, широко используется принцип дедукции (анализа или декомпозиции), позволяющий представить рассматриваемую задачу в виде некоторой иерархической структуры со сложной соподчиненностью частей. Анализ различных методов дедукции задачи проектирования ТП:

- на основе структуры процесса (включающей в себя маршрут, этапы, установки, позиции, переходы);
- на основе выделения функциональных задач процесса (обеспечения формы в поперечном и продольном сечении, размеров и взаимного расположения поверхностей);
- на основе информационной обеспеченности отдельных задач проектирования

показал, что наиболее приемлемым является последний из перечисленных методов. Согласно этому методу, проектирование ТП следует начинать с решения тех задач, для которых необходим меньший объем информации, то есть с задач, находящихся на нижних уровнях иерархии. Чем больший объем информации необходим для решения задачи, тем более высокий уровень занимает она в иерархической структуре. При решении

задач высокого уровня используется информация как исходная, так и полученная в процессе проектирования. Реализация такой схемы позволила создать САПР единичных ТП [5, 6].

Основой маршрутного ТП является последовательность обработки поверхностей детали. Информацией, необходимой для выбора этой последовательности, служат сведения о конфигурации детали и требуемой точности взаимного расположения ее поверхностей, а также объемы обработки по стадиям или этапам (частный ТП), то есть при черновой, чистовой и других видах обработки [1, 3–6] и планы обработки каждой поверхности.

Целью создания системы **многоуровневой базовой групповой технологии** (МБГТ) является развитие технологии как науки путем выявления закономерностей и установления качественных и количественных взаимосвязей по различным направлениям, предметам и объектам исследования.

Материалы и методы исследований

Предметом исследования является автоматизация разработки МБГТ на примере групповой токарной обработки преимущественно прецизионных деталей простой и сложной формы.

Объектом исследования является технологическая (физическая) модель группы изделий (деталей) на основе единой системы признаков, описывающих типоразмеры (ТР) деталей, технологические методы и средства производства, обеспечивающие номенклатуру, диапазоны и точность формируемых свойств обрабатываемых поверхностей [9–11].

Согласно предложенному информационному методу «анализа-синтеза», или объектно-структурному подходу, проектирование ГТП следует начинать с наименее информативных задач [2]. При решении задач следующего (нижнего) уровня используют строго дозированную информацию (принадлежащую только к этому уровню технологии) и информацию более высокого уровня, необходимую и достаточную для решения задачи на этом уровне (например, типоразмера), то есть состава позиций и переходов в структуре ГТП. В этом процессе (итерации) смешение уровней информации на уровнях индивидуальной и групповой технологии недопустимо [2, 9, 10].

Результаты

Разработку вариантов ГТП ведут в двух противоположных направлениях (нисходящем – восходящем): маршруты дифференцируют до уровня базовых установов (типоразмеров деталиеопераций), а затем техническое содержание конкретного исполнения (моделей) установов синтезируют из технологических элементов нижних уровней: позиций, переходов и рабочих ходов

(проходов) [9, 10]. Блок-схема структуры ГТП представлена на рис. 1. В исследованиях ([1, 3–8] и др.) убедительно показано, что сложность автоматизации проектирования (синтеза) структуры ГТП объясняется большой совокупностью правил проектирования, слабой их формализацией, динамичностью схем их применения, определяемых конкретными производственными условиями. Современные системы проектирования технологии характеризуются применением эвристических алгоритмов формирования структур, строго ориентированных на ограниченное число производственных ситуаций, поэтому системы плохо тиражируемы и не адаптивны. Решения, формируемые системой, часто требуют глубокой корректировки. При проектировании структуры ГТП требуется ввести большой объем необходимых исходных данных об изделии и производственной среде. Для корректировки решений, облегчения процесса кодирования и ввода исходных данных об изделии применяют диалог пользователя с системой. Даже диалог не позволяет повысить эффективность проектирования структуры ГТП, если алгоритмы не были рассчитаны на конкретную производственную ситуацию. Оперативно изменить или дополнить алгоритмическое и программное обеспечение не представляется возможным [1, 3–7, 13–16].

Процесс варьирования параметров (параметрической настройки) значительно более формализован и менее зависим от производственной ситуации, поэтому в последнее время появилось много систем, в которых автоматически (или автоматизированно) выполняется параметрическая настройка, а структура ТП формируется вручную, и информация о ней вводится в систему как исходные данные. Параметрические системы легче адаптируются к производственным условиям, требуют введения относительно небольшого объема исходных данных и легко воспринимаются специалистами при их внедрении. Однако, эффективность решений в таких системах [3] определяется квалификацией технолога, отсутствует возможность оптимизировать структуру объекта проектирования [1–6, 8].

За последние 15–25 лет состояние автоматизации синтеза структур ТП изменилось мало. Проблема автоматизированной разработки методом синтеза единичных и групповых ТП остается нерешенной, важнейшей и наиболее актуальной задачей САПР ТП [3–16].

В наиболее часто встречающихся в настоящее время оценках состояния автоматизированного синтеза ТП указывается, что при его реализации маршрутная и операционная технологии должны создаваться на основе общих закономерностей проектирования или эвристик, справедливых для ограниченного класса деталей и определенных видов и типов производств. Во многих работах утверждается, что сформировать закономерности

проектирования и критерии ТП, с помощью которых можно было бы разрабатывать весь процесс изготовления деталей, на сегодняшний день не представляется возможным [1–6]. Теория синтеза структур групповых технологических объектов, несмотря на усилия исследователей, разработана недостаточно [1, 3–6, 11–16].

Структура САПР ГТП и состав ее подсистем (прежде всего проектирующих) определяются реализуемой в ней методологией проектирования. Существуют две основные методологии проектирования ТП изготовления изделий машиностроения:

- на базе использования ТП-аналогов;
- на основе метода синтеза единичных ТП.

При использовании метода синтеза ключевым вопросом построения САПР ГТП является вопрос о том, как в данной системе осуществляется синтез структуры объектов проектирования: рабочих ходов (проходов), переходов, позиций, установов и технологических этапов в маршруте [3–7, 10].

Существуют принципиально различные подходы к построению САПР ТП. Известны несколько классификаций методов проектирования ГТП, положенных в основу создания соответствующих систем [3–10].

САПР деталиоперационной технологии механической обработки действует на основе типовых технологических процессов-аналогов, что вполне оправдано только при наличии достаточно представительных групп деталей, объединенных конструктивной и технологической общностью. Однако такой подход сейчас уже представляется рутинным [1, 3–8, 11].

В случае разработки технологии производства новых видов изделий при отсутствии готовых унифицированных (типовых и групповых) ТП, эффективным методом оптимального решения задачи является метод синтеза, то есть интегрирования по определенным правилам

более высоких уровней ТП из их составляющих: переходов из проходов (рабочих ходов), установов и позиций из переходов, этапов из установов, маршрутов из этапов (рис. 1) [1, 7, 8]. Для реализации метода синтеза разработана структура документов МБТ в виде таблиц-матриц [9, 10, 15], что позволяет формализовать процесс синтеза различных уровней ГТП: автоматизированного выбора комплекта позиционных инструментальных наладок (ПИН), условий осуществления проходов, переходов, позиций и установов. Алгоритм оптимизации групповых инструментальных наладок (ГИН) и режимов оптимального резания (РОР) изображен на рис. 2.

Рабочие таблицы-матрицы первичной подсистемы по горизонтали начинаются с характеристик технологических видов ОП: их геометрической формы, взаимного положения и сопряжения.

Добавляя соотношения параметров ОП и технологических признаков метода обработки получаем характеристику типов, определяющих номенклатуру ОП, формирование которых возможно данным методом. Дальнейшее дополнение таблиц-матриц информацией о диапазонах всех геометрических параметров и физических свойств, а также точности их выполнения на уровне отдельных проходов и их совокупности, т. е. переходов, даёт полную характеристику типоразмеров ОП групп деталей [9, 10, 11, 17].

Первичная подсистема МБТ представлена на примере прецизионного точения [9] и предусматривает по входным данным о виде и типе поверхностей вращения, их взаимном положении и сопряжении, размерах и требуемых качественных свойствах (типоразмерах поверхностей) получение следующей выходной информации:

- тип, типоразмер (ТР) и модель УРИ [9, 10];
- материал, геометрия активной части и режущего клина УРИ;

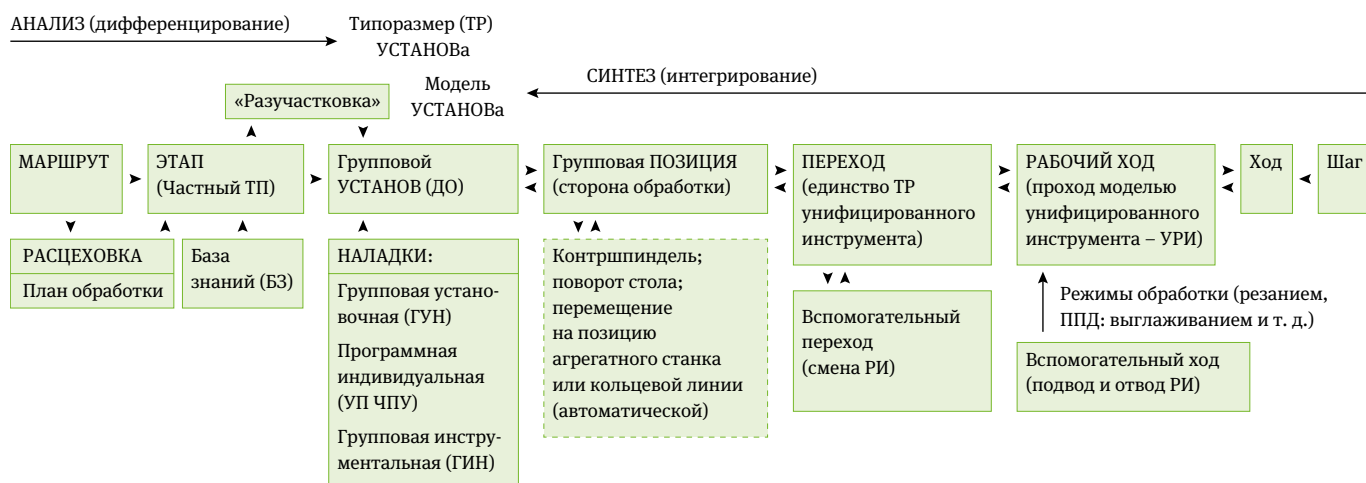


Рис. 1. Блок-схема структуры ГТП и основные технологические мероприятия (приемы)

Технологическая характеристика поверхности

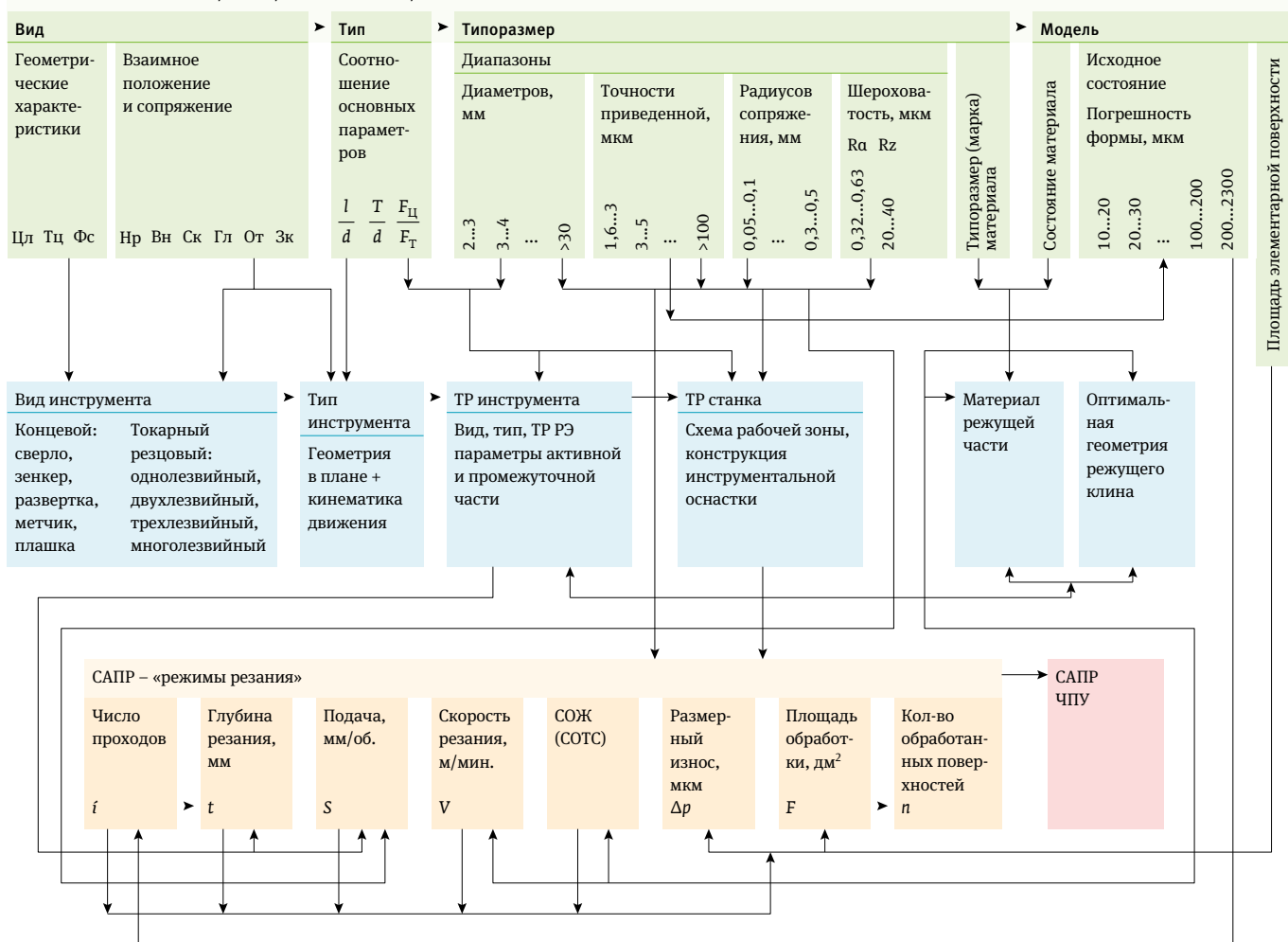


Рис. 2. Алгоритм оптимизации унифицированных групповых инструментальных наладок и режимов оптимального резания для обеспечения качества деталей тел вращения

- модель УРИ и параметры ПИН для выбранного ТР станка [10];
- режимы оптимального резания (РОР) проходов: глубина, подача, скорость резания, СОЖ;
- необходимое исходное состояние поверхности по каждому проходу;
- номенклатура и последовательность проходов, т. е. состав перехода;
- прогнозируемый ресурс ПИН, инструментоёмкость, станкоёмкость и другие технико-экономические показатели каждого технологического перехода [9, 10, 15, 19].

Сначала происходит определение номенклатуры проходов по каждой поверхности в их обратной последовательности, то есть от конечного (финишного) прохода до начального.

Таким образом устанавливается полная номенклатура проходов при выполнении переходов в ТР установа. Затем идет установление хронологически неразрывной последовательности проходов по поверхностям контуров обработки, которые обходит каждая модель УРИ.

Проход (рабочий ход) – одноразовое неразрывное (хронологически и технологически) взаимодействие зоны формирования свойств с определенными условиями формообразования элементарных геометрических и физических параметров ОП.

Переход – номенклатура и последовательность (состав) проходов, выполняемых одной моделью позиционной инструментальной наладки при неизменной позиции (степенях свободы) заготовки относительно векторов инструмента в координатах оборудования.

В отдельных случаях переход состоит из одного прохода: точение канавки врезанием, отрезка заготовок, центрование, сверление (без вывода сверла), рассверливание, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, нарезание внутренней (метчиком) и наружной (плашкой) резьбы. На переходах контурного точения (особенно при финишной обработке) технологическая последовательность проходов образует контур детали – наружный или внутренний. Ресурс работы ПИН на таком переходе определяется методом прямого счета как сумма работы износа УРИ на всех проходах, входящих в переход [9, 10].

Режущий инструмент в конструктивном исполнении оказался элементом оснащения с наименьшей «гибкостью» использования его технологических возможностей [1–4, 6–11].

Основные компоненты гибкости РИ:

- возможность реализации групповой обработки заготовок;
- быстрая наладка, переналадка и регулировка на размер;
- возможность автоматической замены изношенных РИ;
- точность базирования РИ-дублеров по координатам: осевой – x , вертикальной – z без выполнения пробных проходов;
- РР, обеспечивающих максимальную удельную размерную стойкость [$\text{дм}^2 / \text{мкм}$] на финишных (окончательных) проходах и заданную производительность [$\text{см}^3 / \text{мин}$] на предварительной обработке;
- предотвращение работы с предельным износом во избежание поломки РИ;
- затруднительность или даже невозможность централизованной переточки изношенного РИ, тем более наблюдаемая техническая сложность реализации переточки и доводки РИ с использованием многоместных приспособлений, обеспечивающих стабильность качества режущих свойств по геометрическим параметрам и стойкостным характеристикам;
- при использовании РИ со сменными многогранными пластинами (СМП), обладающими завышенными параметрами радиуса скругления режущих кромок (особенно имеющими покрытия, которые нарушаются в первые секунды или минуты работы) и неоптимальной геометрией режущего клина, вследствие чего стойкость их явно недостаточна,

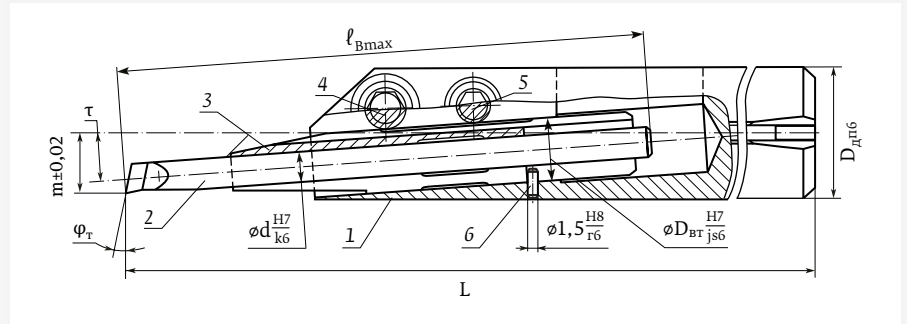


Рис. 3. Резец унифицированный расточной контурный для обработки диапазона диаметров (от 2 до 3; от 3 до 4; от 4 до 6; от 6 до 10 мм и т. д.) с подрезкой торца глухого отверстия: 1 – державка, 2 – МПРЭ, 3 – втулка, 4, 5 – зажимные винты, 6 – ориентирующий штифт

особенно при обработке труднообрабатываемых материалов.

Для решения поставленных задач были разработаны и реализованы основные принципы конструирования унифицированных универсальных, специализированных и специальных резцов для осуществления токарной групповой обработки.

Суть принципов конструирования УРИ в следующем:

- механическое крепление режущих элементов (РЭ) в державке;
- наибольший охват номенклатуры обрабатываемых поверхностей деталей;
- уменьшение номенклатуры резцов за счет унификации и стандартизации многократно перетачиваемых РЭ (МПРЭ), переходных втулок и державок;
- расположение узла крепления МПРЭ в державке вне рабочей зоны и надежность его закрепления для наибольшей жесткости РИ;
- обеспечение быстрого действия закрепления при замене изношенного МПРЭ;
- технологичность конструкции МПРЭ для их централизованной многократной заточки и доводки в многоместных приспособлениях на станках;
- создание рациональных схем многократной переточки МПРЭ для повышения общего ресурса РИ и коэффициента использования инструментальных материалов.

На основе анализа производственной статистики диаметров, длин и сочетаний обрабатываемых поверхностей деталей и ограничения соотношений размеров внутренних поверхностей (соотношения l_p/d_p , T/d_p) и, руководствуясь сформулированными принципами, были созданы типы, рабочие чертежи и технология производства унифицированных универсальных и специализированных резцов, предназначенных

для синтеза и компоновки, как ГИН, так и индивидуальных ПИН [10, 11, 17, 22].

Цилиндрическая форма МПРЭ наиболее технологична, так как позволяет использовать высокопроизводительные методы обработки. Открытые плоские или винтовые передние поверхности МПРЭ обеспечивают возможность их переточки и доводки после допустимого износа только по задним граням, что позволяет механизировать процесс на многоместных кассетных приспособлениях. При этом максимально используется тело (ИМ) МПРЭ, то есть уменьшается расход твердого сплава и трудоемкость обработки при увеличении количества переточек и снижении стоимости периода стойкости УРИ (рис. 3) [22]. Перечисленными преимуществами в наибольшей степени обладают МПРЭ с винтовыми передними поверхностями, защищенные патентом РФ № 2170160. Указанные МПРЭ выдерживают до 40 переточек только по задним поверхностям, таким образом заменяя целые наборы импортных РЭ.

Типажи универсальных и специализированных резцов обеспечивают:

- возможность групповой обработки «токарных» деталей в условиях многономенклатурного мелкосерийного, опытного и даже единичного производства;
- растачивание отверстий (сквозных и глухих) и/или обтачивание открытых и закрытых наружных поверхностей;
- комплектование (синтезирование) ГИН максимально возможной жесткости при обработке диапазона диаметров внутренних поверхностей с указанным отношением l_p/d_p , T/d_p ; технологичность изготовления и переточки РЭ;
- полную взаимозаменяемость быстросменных РЭ.

Использование разработанных типажей УУР с указанием их технологических возможностей позволяет технологам синтезировать оптимальные групповые и индивидуальные ИН, разрабатывать технически обоснованные управляющие программы (УП) системы ЧПУ (программные наладки); прогнозировать количество обработанных деталей этими наладками до смены каждого УРИ.

Появляется возможность оптимизации методом «прямого счета» периодов стойкости отдельных УРИ в групповых или индивидуальных ИН. Это дает возможность смены УРИ одновременно или с кратным интервалом от машинного времени обработки расчетной партии запуска заготовок [9, 10].

Оптимизация процесса синтеза ГИН для токарных станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР УРИ в групповом и индивидуальном производстве, добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены УРИ при

достижении максимально допустимого износа каждого из них [9, 10–12].

Работа по синтезу (интегрированию) модели установка начинается с первичной подсистемы МБГТ, разработанной в таблично-матричной форме и определяющей комплекс условий учета технологической наследственности на каждом проходе для обеспечения параметров формируемых свойств обрабатываемых поверхностей. Это позволяет сопоставлять технологические модели групп деталей с моделями технологических методов, формирующих свойства на всех этапах производства и подбирать оптимальный метод и минимизировать количество типоразмеров унифицированных инструментов, станкоемкость и технологическую себестоимость [9, 10].

Литература

1. **Акулович Л. М., Шелег В. М.** Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. Минск: Новое знание; М: ИНФРА-М, 2012. 488 с.
2. **Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2001. 384 с.
3. **Кондаков А. И.** САПР технологических процессов: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2007. 272 с.
4. **Норенков И. П.** Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. 450 с.
5. **Старостин В. Г., Лелюхин В. Е.** Формализация проектирования технологических процессов механической обработки резанием. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
6. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / Под ред. С. Н. Корчака. М.: Машиностроение, 1988. 349 с.
7. Управление технологическими процессами в машиностроении / Под общ. ред. В. Ц. Зориктуева. Старый Оскол – М.: ТНТ, 2010. 512 с.
8. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.
9. **Ракунов Ю. П.** Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 3. С. 23–31.
10. **Ракунов Ю. П.** Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 10. С. 36–46.
11. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В.** Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ // Справочник. Инженерный журнал 2015. № 7. С. 1–29.
12. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.

13. **Henderson-Kelly D.L., Grayson R. L.** Group technology in the Australian Aircraft industry. Austral. Conf. Manuf., Eng., 1977, August.
14. **Peters J., Dumond W., Van Dyck F.** Group technology at work. Amer. Machinist, 1974. No. 19.
15. **Ракунов Ю. П.** Применение метода анализа-синтеза для проектирования многоуровневой базовой групповой технологии // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2022. № 12. С. 65–72.
16. **Teti R., Kumara S. R. T.** Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems. CIRP Ann-Manuf. Technol., vol. 46, pp. 629–652, 1997.
17. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.** Методика синтеза установочных групповых инструментальных наладок. Ч. 1 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. № 4. С. 68–75; Ч. 2 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 1. С. 70–79.
18. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.** Критерии обрабатываемости труднообрабатываемых материалов, оптимизация инструмента и режимов резания в прецизионном групповом производстве // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 4. С. 62–72.
19. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.** Взаимодействие подсистем: первичной и синтезирования в системе многоуровневой базовой групповой технологии. Ч. 1 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2023. № 3. С. 58–64; Ч. 2 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2024. № 1. С. 50–59.
20. **Wang L. H., Tornngren M., and Onori M.** Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing, J. Manuf. Syst., 2015, vol. 37, pp. 517–527.
21. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.** Номенклатура выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов // Magyar Tudományos Journal, Budapest, Hungary, 2019, no. 33, pp. 10–15.
22. **Резец: Патент РФ № 2170160** Калмыков В. И., Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Петровская Т. М., Золотова Н. А., Борисенко Н. Н. Бюл. № 19, 2001.

Авторы

Ракунов Юрий Павлович – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

Абрамов Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

Памяти Германа Фукс-Рабиновича

3 июля 2024 года ушел из жизни известный российский ученый Герман Симонович Фукс-Рабинович (08.08.1949 – 03.07.2024). Основные научные достижения д. т. н. Г. С. Фукс-Рабиновича были связаны с разработкой износостойких покрытий для широкого класса металлообрабатывающих инструментов. Его творческий путь начинался с должности мастера-технолога на заводе «Фрезер» (1972–1982), затем он трудился ведущим специалистом завода «Динамо» (1983–1984). После защиты диссертации на степень доктора технических наук в 1993 году он учредил и возглавил научно-производственные предприятия ООО «Римет», «Интек». Был членом редакционного совета журнала «Вестник ВНИИЖТ». В последние годы рабо-

тал в должности старшего научного сотрудника в McMaster University в Канаде. Автор 141-й научной публикации, трех монографий и ряда патентов, Герман Симонович активно руководил работой многочисленных аспирантов из ряда стран мира. Он всегда сохранял крепкую и плодотворную связь с родиной и российскими учеными, обеспечивая им доступ к самым передовым инструментальным исследованиям. В последние годы в тесном сотрудничестве с российскими учеными он успешно развивал новое научное направление по разработке «умных» ионно-плазменных покрытий, которые повышают износостойкость металлообрабатывающих инструментов в экстремально нагруженных условиях сухого высокоскоростного реза-



ния. Светлая память о надежном высокоэрудированном человеке останется в памяти его многочисленных коллег.