

УДК 621.9.025

Ю. П. Ракунов, к. т. н., доц., **В. В. Абрамов**, д.т.н., проф., **А. Ю. Ракунов**, инженер
НИУ Московский государственный строительный университет, Россия
Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: Rakunov1991@mail.ru

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ ПОДСИСТЕМ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Целью настоящей работы является формулирование задач и описание этапов развития компьютерной интеграции (синтеза) компонентов и подсистем многономенклатурного группового производства, повышающего его плановую организацию и четко регламентирующего его техническое содержание. Используется методология «анализа-синтеза» многоуровневой базовой групповой технологии. Распределение уровней информации по уровням технологии – основа организации и технологии принятия решений на всех стадиях группового производства. Синтез компонентов и систем автоматизированного проектирования (САПР) группового производства на современном предприятии осуществляется с использованием новой информационной технологии, так называемой компьютерной интегрированной производственной системы (КИПС). Эта система является информационной основой (базой знаний с банками данных) для реализации нового технологического уклада, третьей и четвертой версии промышленной революции – «Индустрия 3,0 и 4,0» (Industry 3.0;4.0). В статье приведены основные (базовые) компоненты КИПС, с помощью которой реализуется принцип сквозного конструкторско-технологического проектирования-изготовления изделий на основе групповой технологии. Рассмотрены две основные задачи создания КИПС. Разработан алгоритм проведения работ по технической подготовке группового автоматизированного производства. Рассмотрены этапы решения задач объединения САПР и АСТПП в единую ИСА ТПП, которая позволяет сократить цикл создания сложных изделий от начала постановки на серийное изготовление до первого серийного изделия в 3..4 раза, получить значительный экономический эффект.

Ключевые слова: компьютерная интегрированная производственная система, групповые технологические процессы, метод «анализа-синтеза», многоуровневая базовая групповая технология, автоматизация проектирования, типаж унифицированного режущего инструмента, групповая инструментальная наладка, автоматизированная технологическая подготовка производства. «Индустрия 3,0 и 4,0».

Y. P. Rakunov, V. V. Abramov, A. Y. Rakunov

PURPOSES AND TASKS OF COMPUTER INTEGRATION OF SUBSYSTEMS OF MULTIPLE GROUP PRODUCTION

The purpose of this work is to formulate tasks and describe the stages of development of computer integration (synthesis) of components and subsystems of multi-product group production, which increases its planned organization and clearly regulates its technical content. Here, the methodology of "analysis-synthesis" of a multi-level basic technology is used - as two main basic methods of scientific knowledge. The distribution of information levels by technology levels is the basis of organization and decision-making technology at all stages of group production. Reliable and timely information is the basis for managing the main flows in production: material and energy. Synthesis of components and computer-aided design (CAD) systems in a modern enterprise can be carried out using the latest information technology, the so-called computer integrated production system (CIPS). This system is an information basis (knowledge base with data banks) for the implementation of the new technological structure and the fourth version of the industrial revolution – Industry 3.0 & 4.0. In the article, the basic components of CIPS (or CIM) are presented, with the help of which it is possible to realize the principle of through design and technological design-manufacturing of products based on group technology. Two main tasks of creating CIPS are considered. The stages of solving the problems of combining CAD and ASTPT (subsystems) into a single SISA TPT are considered, which allows to shorten the cycle of creating complex products from the beginning of the production for serial production to the readiness of the first serial product in 3 ... 4 times, get a significant economic effect.

© Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.; 2023

Keywords: *computer integrated production system, group technological processes, "analysis-synthesis" method, multi-level basic group technology, design automation, type of cutters of unified structures, group instrumental adjustment, automated technological preparation of production, "Industry 3.0 &4.0".*

1. Введение

Решение задачи импортозамещения и перевода экономики с экстенсивного на интенсивный путь развития вызывает необходимость существенного совершенствования организации и управления производственными системами на всех уровнях [1].

Совершенствование организации и управления должно удовлетворять требованиям, направленным, во-первых, на повышение эффективности производства, во-вторых, на учёт всё возрастающей сложности его организации и технической подготовки и, в-третьих, на использование новых форм и методов решения взаимосвязанного комплекса задач развития техники, групповой технологии, организации и экономики производства [2,3].

Практика отечественного и зарубежного машиностроения показывает, что при создании перспективных изделий с технико-экономическими показателями, на уровне лучших мировых образцов, должна быть поставлена задача не только автоматизации и механизации всех видов групповых технологических процессов (ГТП) и применения передовых конструктивно-технологических решений, но и принципиально новой организации производства, т. е. существенное изменение его структуры в целях сокращения и удешевления процесса создания изделий. Без этого даже самые новые технологические решения, заложенные при проектировании изделий, могут оказаться устаревшими к моменту выпуска серийного образца, а сами изделия – неконкурентоспособными на мировом рынке [4, 12-16].

Совершенствование производственной структуры опытных и серийных предприятий особенно важно в условиях, когда на них производятся изделия различных типоразмеров (ТР) и моделей, т.е. в мелкосерийном многономенклатурном производстве

Применение современных методов организации и автоматизации мелкосерийного многономенклатурного группового производства позволяет использовать для выпуска новых конкурентоспособных изделий путь конструкторско-технологической гибкости, при котором обеспечивается высокая оперативность внесения изменений, возможность применения самых новых технических достижений, даже если они возникли в процессе производства изделия, способность быстро перестраиваться в соответствии с изменением условий планирования, финансирования, требований заказчика, конъюнктуры рынка и пр. [4,5].

2. Основное содержание и результаты работы

Один из путей достижения максимальной эффективности группового промышленного производства – объединение различных компонентов и систем производственного предприятия на основе новой информационной технологии, - компьютеризированной интеграций производственной системы (КИПС). КИПС представляет собой комбинацию программных, аппаратных и технических средств, предназначенных для проектирования изделий, планирования производства, управления производственными процессами, проектирования оборудования, оснастки и инструмента, а также для осуществления производственного процесса и обеспечения качества продукции [1]. На всех уровнях систем КИПС используются компьютеры: базы данных, системы управления базами данных, системы и алгоритмы автоматизированного проектирования, методы моделирования, программное управление оборудованием (рис. 1).

Т. о., представляется актуальным создание КИПС, с помощью которой возможно реализовать принцип сквозного конструкторско-технологического проектирования –

изготовления изделий с охватом как опытного, так и серийного производства на основе групповой технологии, обеспечивающей высокую гибкость процесса [6-11].

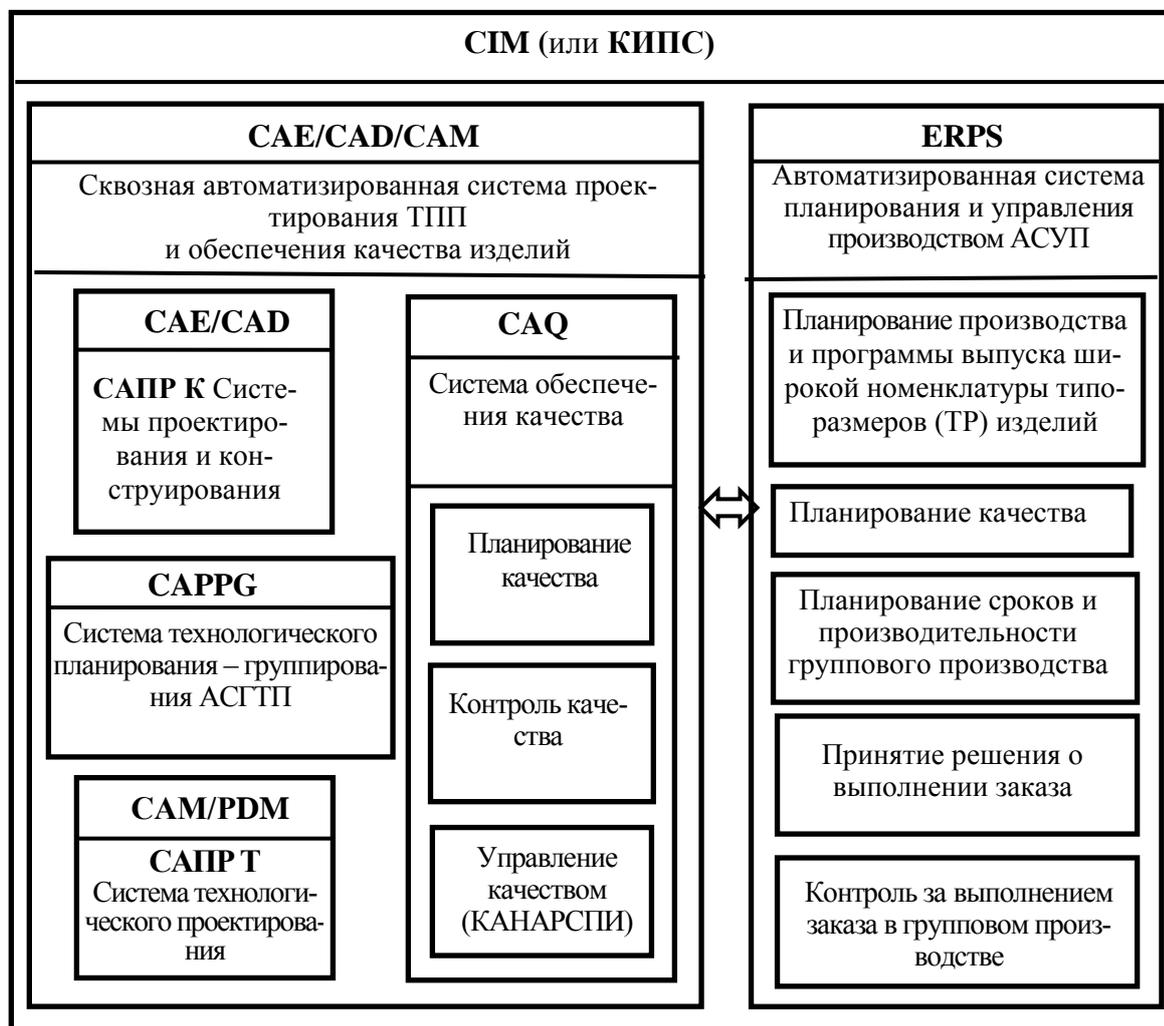


Рисунок 1. Основные компоненты компьютеризованной системы (СИМ или КИПС)

Разработка КИПС представляет собой сложную многоаспектную и многоступенчатую задачу. Однако на большинстве предприятий ряда передовых отраслей машиностроения есть достаточно серьёзные предпосылки для её успешного решения: программно-управляемое технологическое оборудование (станки с ЧПУ), программно-перестраиваемые средства автоматизации вспомогательных операций (промышленные роботы, автоматизированные склады, транспорт), современные технические средства автоматизации управления (ЭВМ и микропроцессоры), автоматизированные системы проектирования и конструирования (САПР), управления производством (АСУП) и технологической подготовки производства (АСТПП), управления групповыми технологическими процессами (АСУГТП) или их компонентами [1,2].

Для таких предприятий создание КИПС станет организующим фактором, который позволит подчинить данное оборудование, технические средства и системы единой задаче – ускорению группового производства, увеличить эффективность их использования [2-4]. На рис. 2 показан порядок проведения работ по технической подготовке

производства на основе методов групповой обработки в условиях функционирования КИПС. При создании нового изделия на авиационном объединении указанные выше предпосылки, имеющийся опыт и проведённые поисковые разработки дали возможность сформулировать основную идею и определить этапы создания КИПС изделий совместными усилиями ОКБ, опытного предприятия, серийного завода и отраслевого НИИ. В отличие от разработки ГТП на основе «комплексной» детали, предлагается методика группирования деталей, проходящих через «сетку» групповых инструментальных наладок (ГИН), составленных из унифицированных режущих инструментов (УРИ), спроектированных специально для реализации ГТП (см. рис 3) Такая прогрессивная методика и типаж УРИ с примерами синтеза ГИН представлена в ряде работ [5 -11].

Основная идея КИПС заключается в том, чтобы, создав силами ОКБ и опытного предприятия систему сквозного проектирования – изготовления опытных изделий, транслировать ее через единую вычислительную интернет-сеть на серийный завод (заводы), где должно быть организовано параллельное изготовление серийных изделий по управляющим программам на оборудовании с ЧПУ, отработанном в опытном производстве. Главным условием для реализации этой цели является аппаратная и программная совместимость базовых программных и технических средств систем (САПР, АСУП, АСТПП, АСУТП и др.) как в опытном, так и в серийном производстве и идентичность основного технологического оборудования с ЧПУ, используемого для опытного и серийного группового изготовления изделий. Система является информационной базой знаний с банками данных для реализации нового технологического уклада 3-ей и 4-ой промышленной революции «Индустрия 3,0 и 4,0» (Industry 4.0) [11-18]. В последнее время эволюции искусственного интеллекта посвящено множество работ [12-18]. **В процессе создания КИПС решаются две основные задачи.** Первая – интеграция процессов управления, конструирования, технологической подготовки производства, автоматизированного изготовления, контроля и испытания изделий в единую интегрированную систему сквозного проектирования и изготовления изделий в опытном производстве.

Вторая – создание аналогичной системы на принципах групповой технологии на серийном заводе. Подобная производственная система была создана и функционировала при изготовлении формообразующих конструктивных элементов теплозащиты многоразового космического корабля «Буран».[1]. Первым этапом решения задач является объединение САПР и АСТПП в единую интегрированную систему автоматизированной технической подготовки производства (ИСА ТПП) на базе общих банков конструкторско-технологических данных. Достижимая цель – совмещение решений конструкторских и технологических задач на самой ранней стадии проектирования, достижение высокой технологичности, оптимальность принимаемых конструкторско-технологических решений; одновременное получение конструкторских и технологических выходных данных (КТД) в памяти ЭВМ. Результат – сокращение цикла проектирования в 2 раза. Второй этап – объединение ИСА ТПП и АСУТП (ГПС обработки) опытного производства в единую интегрированную производственную систему сквозного проектирования и изготовления деталей опытных изделий на базе общей локальной информационно-вычислительной сети (ЛИВС). Достижимая цель – совмещение в пространстве и времени этапов выхода КТД с началом обработки деталей в производственном цехе путём прямого машинного управления технологическим оборудованием с ЧПУ от ЭВМ, упразднение чертежа как носителя исходных данных для подготовки управляющих программ (УП), достижение абсолютной гибкости при внесении конструкторских изменений.

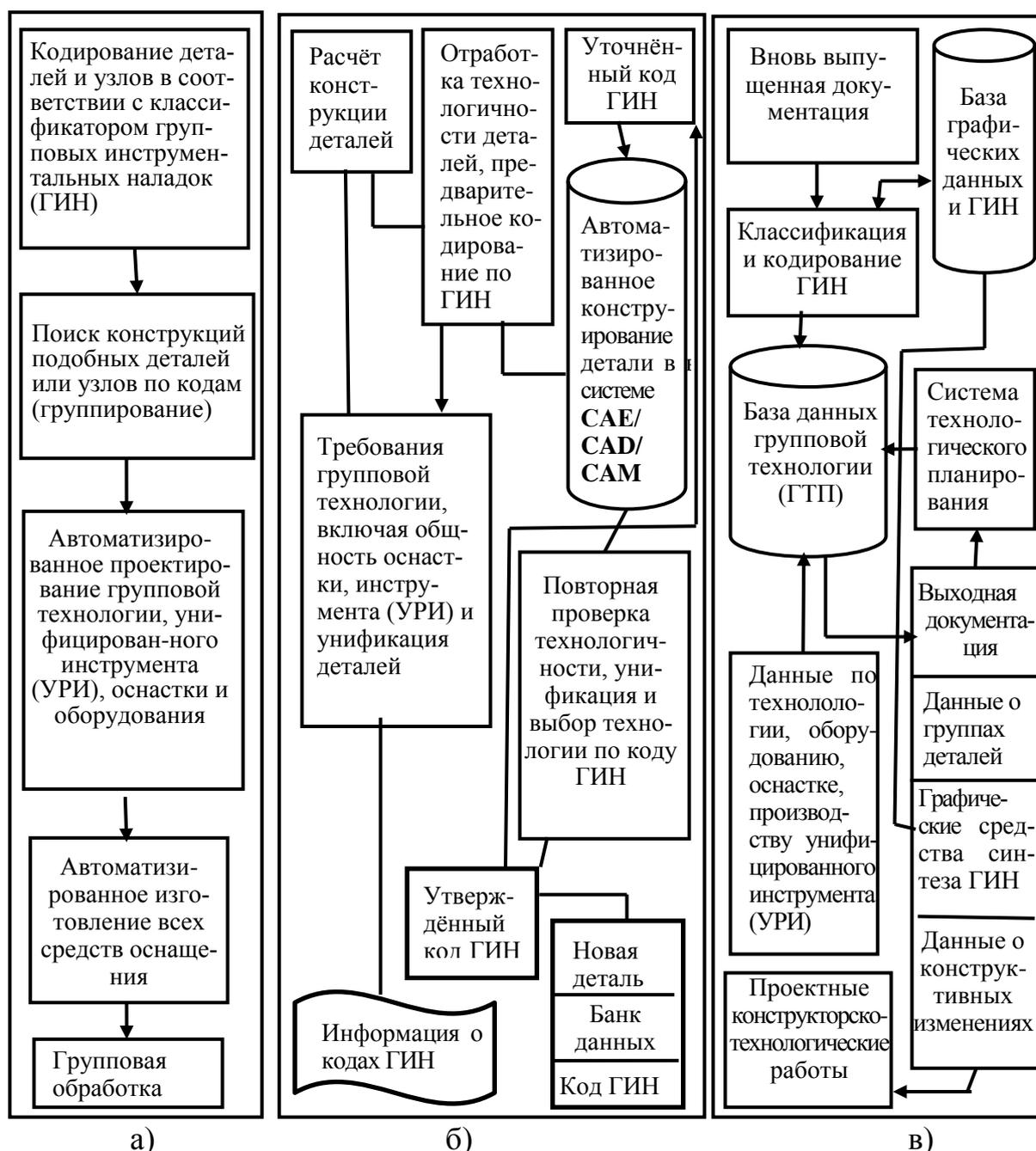


Рисунок 2. Порядок проведения работ по технической подготовке производства в групповом автоматизированном производстве: а – порядок выполнения работ при групповой обработке в системе CAE/CAD/CAM; б – порядок присвоения кода и группирование деталей в процессе проектирования; в – формирование базы данных ГТП и синтеза групповых инструментальных наладок (ГИН)

Третий этап – присоединение к КИПС производственных систем сборки агрегатов и узлов, испытаний готовых узлов и превращение её в единую интегрированную систему сквозного проектирования и изготовления агрегатов и узлов опытных изделий. Достигаемая цель – организация программно-управляемой поточной сборки агрегатов на базе поточно-групповых методов автоматизированного изготовления деталей, иду-

щих на сборку агрегатов; постановка агрегатов на сборку по графику. Результат – сокращение цикла сборки, уменьшение времени ожидания (пролёживания на складе) деталей, сокращение межоперационных заделов.

Четвёртый этап – присоединение к КИПС производственных систем окончательной сборки и испытаний готовых изделий и превращение её в единую интегрированную систему сквозного проектирования и изготовления опытных изделий. Достижимая цель – организация программно-управляемой поточной сборки изделий на базе поставляемых по графику узлов и агрегатов. Результатом второго - четвёртого этапов является сокращение цикла изготовления опытного изделия в 2...2,5 раза.

Вторая задача создания КИПС включает: передачу на серийное предприятие общего и специального программного обеспечения (СПО), необходимого и достаточного для генерации единой компьютеризированной интегрированной производственной системы (ЕКИПС) автоматизированного изготовления изделий в серийном производстве; передачу пакетов УП, по которым в опытном производстве осуществлялась обработка деталей и узловая, агрегатная и окончательная сборка. Достижимая цель – автоматизированное изготовление изделий, начиная с первой машины по УП, обработанным в опытном производстве; возможность внесения изменений на машинном уровне; возможность быстрого перехода на изготовление нового изделия путём замены только специального ПО. Результат – сокращение цикла запуска и изготовления серийного изделия в 3 раза.

Для успешной реализации технологии групповой обработки ответственных деталей летательных и космических аппаратов (ЛиКА) на станках с ЧПУ в НИАТе совместно с Московским филиалом НИТИ были разработаны методики проектирования типажей унифицированного режущего инструмента (УРИ), режимов оптимального резания (РОР), синтеза групповых инструментальных наладок (ГИН), оптимизации их применения и внедрения на приборных и агрегатных заводах авиационно-космической отрасли (рис. 3).

Любая групповая или индивидуальная ИН синтезируется из ТР РИ.

Режущий инструмент в конструктивном исполнении является элементом оснащения с наименьшей «гибкостью» использования его технологических возможностей [6-9]. **Основные компоненты гибкости РИ следующие:**

- возможность реализации групповой обработки заготовок;
- быстрая наладка, переналадка и регулировка на размер;
- возможность автоматической замены изношенных РИ;
- точность базирования РИ-дублёров по координатам: осевой – x , вертикальной – z без выполнения пробных проходов;
- использование режимов оптимального резания (РОР), обеспечивающих максимальную удельную размерную стойкость [$\text{дм}^2/\text{мкм}$] на финишных проходах и заданную производительность [$\text{см}^3/\text{мин}$] на предварительной обработке;
- предотвращение работы с предельным износом (прогноз) во избежание поломки РИ.

Для решения поставленных задач были разработаны и реализованы основные принципы конструирования унифицированных универсальных, специализированных и специальных резов 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 счёт унификации и стандартизации РЭ переходных втулок и державок;
- расположение узла крепления РЭ в державке вне рабочей зоны и надёжность их закрепления для наибольшей жёсткости РИ;
- обеспечение быстродействия закрепления при замене изношенного РЭ;
- технологичность конструкции РЭ для их централизованной заточки, доводки в многоместных приспособлениях и многократности их переточки;
- создание рациональных схем многократной переточки РЭ для повышения общего ресурса РИ и коэффициента использования инструментальных материалов.



Рисунок 3. Структура ГТП и основные организационно-технологические мероприятия (приёмы) при разработке высокотехнологичных групповых процессов.

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), расчётов и, руководствуясь сформулированными принципами, был создан типаж унифицированных универсальных и специализированных резцов, предназначенных для синтеза, как групповых, так и индивидуальных ИН. Цилиндрическая форма многократно перетачиваемых РЭ наиболее техно-

логична, т. к. позволяет использовать высокопроизводительные методы обработки. Открытые плоские или винтовые передние поверхности РЭ обеспечивают возможность их переточки и доводки после допустимого износа только по задним граням. Это позволяет механизировать процесс при использовании многоместных кассетных приспособлений. При этом максимально используется тело РЭ, т.е. уменьшается расход твёрдого сплава и трудоёмкость обработки при увеличении количества переточек и снижении стоимости периода стойкости РИ. **Типаж обеспечивает:**

- 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 групповых инструментальных наладок (ГИН) максимальной жёсткости 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.

Пример конструктивного исполнения резца унифицированного универсального расточного контурного для обработки диапазона диаметров (от 6 до 10 мм) показан на рис. 4.

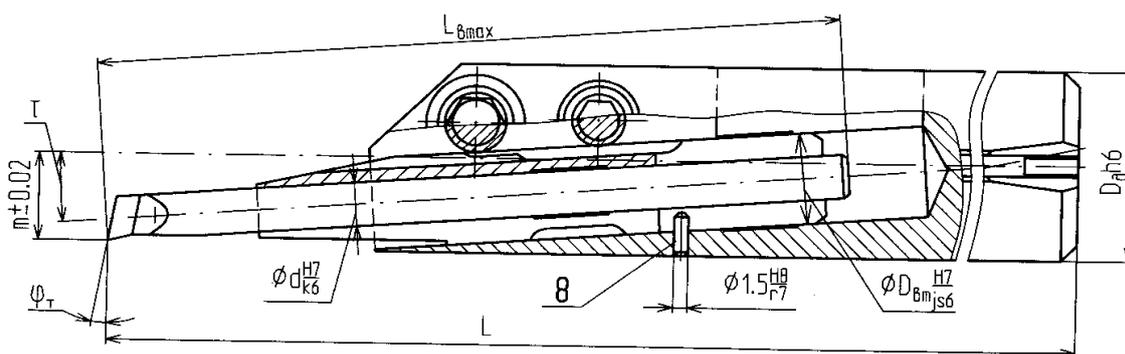


Рисунок 4. Резец унифицированный универсальный расточной контурный для обработки диапазона диаметров и подрезки торцевой поверхности глухого отверстия.

Использование разработанного типажа 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 РИ. Появляется возможность оптимизации методом «прямого счёта» периодов стойкости отдельных РИ в групповых или индивидуальных ИН. Это даёт возможность смены РИ одновременно или с кратным интервалом от машинного времени обработки расчётной партии запусков заготовок [6-10]. Оптимизация синтеза ГИН для токарных станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР инструментов в групповом производстве, добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены инструментов при достижении максимально допустимого износа каждого из них [6-9]. Работа по синтезу (интегрированию) **модели установка** начинается с первичной подсистемы МБГТ, разработанной в таблично-матричной форме и определяющей комплекс условий технологической наследственности и коэффициента уточнения на каждом проходе для обеспечения параметров формируемых свойств обрабатываемых поверхностей [7-11]. 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 РИ, станкоёмкость и технологическую себестоимость.

УСТАНОВ – состав позиций, переходов и проходов, выполняемых деталие-операционным комплектом позиционных инструментальных наладок (КПИН) при одноразовом базировании и закреплении заготовки(ок) в приспособлении на оборудовании. *Модель установка* указывает точный адрес рабочего места с его атрибутами, то есть наладками: - установочной; - инструментальной и программной (см. рис. 3). *Модель установка* определяет технико-экономические показатели: инструментоёмкость, трудоёмкость, станкоёмкость и технологическую себестоимость по сравнению с альтернативными вариантами установов или ТП, так как позволяет применять к определению перечисленных показателей метод «прямого счета» [6-11].

Известен ряд концептуальных подходов к решению проблемы синтеза структур ГТП. Однако каждый из них обладает рядом недостатков, в том числе и принципиальных, которые делают невозможным создание эффективно работающих САПР ГТП на их основе [1-5,9-18]. Метод синтеза хотя бы один раз требует формирования внешних связей между элементами для создания из них элементов более высокого уровня. Этот метод предполагает определение состава элементов, построение новых связей, проверку их достоверности и параметрическую настройку с использованием логических правил и аналитических зависимостей. Проектирование можно вести, как с использованием аналогов, так и без них. При использовании аналогов необходимо включать в аналог новые элементы или существенно изменять их последовательность [1-4,9,18].

3. Выводы

Подсистема синтеза конкретизирует содержание и дополняет номенклатуру деталие-операций последовательным синтезированием номенклатуры и последовательности (состава) входящих технологических событий уровней: установов, позиций и переходов из первичных элементов технологических процессов, с учетом конкретных моделей оборудования, возможностей групповых и индивидуальных (специальных), позиционных и деталие-операционных (установочных) групповых инструментальных наладок, а также управляющих программных наладок [7-11]. Метод синтеза может быть эффективно использован как при индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и при групповой обработке деталей на современном мелкосерийном многономенклатурном производстве. Рассмотренный в работе [8] алгоритм и блок-схемы являются логической и методической основой подсистемы оптимизации принятия технологических решений в системе МБГТ. 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 даёт возможность получения оптимального для существующего производства ГТП механической обработки высокоточных токарных деталей простой и сложной формы. Единая система технологических признаков, учитывающих номенклатуру, диапазон и точность свойств деталей позволяет обеспечить сопоставление, подбор и необходимую эффективность технологии при использовании компьютерной техники [6-12]. Практическое использование системы МБГТ даёт возможность создания базы знаний и баз данных системы автоматизированного сквозного проектирования изделий точного машиностроения, т.е. интегрированных САПР: САЕ/САР/САМ/САРР. Это особенно важно для разработки пол-

ноценной системы САМ/САРР (автоматизированная технологическая подготовка группового производства и проектирование детали-операций ТП) [6-12]. Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются существенное повышение качества разработанной технологии и резкое сокращение сроков технологической подготовки группового многономенклатурного мелкосерийного производства.

Благосостояние нации висит на кончике резца» - это высказывание классиков трудно переоценить [1-5,10-12]. **Технический отечественный прорыв** в следующий технологический уклад возможен только посредством широкого использования типажей и конструкций качественного ресурсосберегающего инструмента XXI века - УРИ (патенты РФ) в совокупности с первичной подсистемой и подсистемой синтеза многоуровневой базовой групповой технологии (МБГТ) машиностроения – отечественной разработкой, позволяющей осуществлять групповую технологию и поднять качество обработки, производительность и эффективность опытного, серийного многономенклатурного и массового производства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Митрофанов, С. П. Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч. 1 Основы технологической подготовки группового производства // С. П. Митрофанов, А. Г. Братухин, О. С. Сироткин и др. – М.: Машиностроение. 1992. – 480 с.
2. Митрофанов, С. П. Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч. 2 Организация группового производства // С. П. Митрофанов, А. Г. Братухин, О. С. Сироткин и др. – М.: Машиностроение. 1992. – 425 с.
3. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х т. Т.1 Организация группового производства. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1983. – 407 с.
4. Синго, С. Быстрая переналадка: Революционная технология производства / Сигео Синго; пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. –384 с.
5. Ракунов, Ю. П. Методология построения подсистемы синтеза многоуровневой базовой технологии в групповом производстве / Ю. П. Ракунов, Н. А. Золотова / Сб. материалов науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004. – С. 210-214.
6. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 2. – 2013. – С. 36-48.
7. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С.23-31.
8. Ракунов, Ю. П. Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – №10, 2012. – С.36-46.
9. Ракунов, Ю. П. Разработка комплексной САПР групповых технологических процессов / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Боровских А. В. // Механизация строительства. – 2014. – №11. – С.56-60.
10. Ракунов, Ю. П. Методика проектирования групповых инструментальных наладок / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Богацкая И. Г. // Механизация строительства. – 2015. – №2. – С. 56-60.

11. Ракунов, Ю. П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. Приложение к № 7. – 2015. – С. 1-29.
12. Гладышева, И. В. Роль автоматизации операционных процессов в развитии производственной системы предприятий // Цифровая экономика и «Индустрия-4,0»: проблемы и перспективы: труды науч.-практ. конференция с междунар. участием /под ред. д.э.н. проф. А.В. Бабкина – СПб:Изд-во Политех. Ун-та, 2017. – С.279-287.
13. J. Hendler, “Avoiding Another AI Winter”, *IEEE. Intell, Syst.* – vol. 23. – pp. 2-4. – 2008.
14. Бондаренко, А. В. Факторы обеспечения устойчивого развития предприятий авиационной промышленности / А. В. Бондаренко // Цифровая экономика и «Индустрия-4,0»: проблемы и перспективы: труды науч.-практ. конф. с междунар. участием/под ред. д.э.н. проф. А.В. Бабкина. – СПб: Изд-во Политех. Ун-та, 2017. – С.617-627.
15. Скоробогатов, А. С. Подход к решению задачи обоснования технологии изготовления готовой продукции промышленного предприятия / А. С. Скоробогатов, В. В. Кобзев – С.662-667.
16. P. J. Mosterman and J. Zander, “Industry 4.0 as a Cyber-Physical Systems study”, *Software and Systems Modeling*, vol. 15, pp. 17-29, Feb 2016.
17. Ракунов, Ю. П. Основные научные принципы разработки и реализации системы многоуровневой базовой групповой технологии / Ракунов Ю. П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю // Международный сборник научных трудов «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ». – 2020. – №3(70). – С. 45-56.
18. Ракунов, Ю. П. Применение метода анализа-синтеза для проектирования многоуровневой базовой групповой технологии / Ракунов Ю. П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю // «Автоматизированное проектирование в машиностроении». – СПб: НИЦ МС, 2022. – №12. – С. 65-72.

Поступила в редколлегию 21.02.2023 г.