

УДК 621.9:658.512

## ЗАДАЧА ВЫБОРА МАЛОСТАДИЙНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ КОМПАКТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

канд. техн. наук, доц. Д.Н. СВИРСКИЙ, А.Л. КЛИМЕНТЬЕВ  
(Витебский государственный технологический университет)

Проведен анализ существующих подходов к выбору технологического метода изготовления деталей при подготовке компактного (ресурсосберегающего) производства изделий машиностроения. Приведена структура технологического маршрута производства машиностроительной продукции. Определены основные требования, которым должно отвечать современное ресурсосберегающее производство. Уточнено содержание стадий макро- и микропроектирования технологических процессов. К стадии макропроектирования отнесен выбор технологического метода и технологической схемы изготовления детали. Установлена взаимосвязь параметров деталей и технологических методов их изготовления на основе сопоставления значений показателей, описывающих свойства деталей и технологических возможностей методов их изготовления. Определены показатели, служащие факторами формализованного выбора технологических методов. Представлена математическая модель, используемая для определения итогового показателя применимости технологических методов. Приведены информационные модели применяемых матриц соответствия и технологического метода. Определена структура информационного обеспечения формализованного выбора технологических методов. В качестве элементов информационного обеспечения рассмотрены примеры таблиц топологической классификации формы деталей машин и верификационной. Предложена методика формализованного выбора технологических методов на стадии макропроектирования технологических процессов на основе использования матриц соответствия. Разработан укрупненный алгоритм выбора технологического метода.

**Введение.** Одним из направлений повышения конкурентоспособности изделий машиностроения является обеспечение компактности (комплексного ресурсосбережения) при организации и функционировании их серийного производства. Компактный (минималистский) подход к организационно-техническому проектированию производственной системы предполагает разработку обобщенного технологического процесса (на основе унифицированных компонентов – «технологических инвариантов»), предназначенного прежде всего для изготовления предварительно выделенного «конструктивного инварианта» типажа продукции и реализуемого в свою очередь в «техническом инварианте» комплекса основного оборудования [1]. Таким образом, первоочередная задача технологов в компактном производстве – создание эффективного обобщенного технологического процесса (ТП), а цель авторов статьи – предложение рациональной методики решения этой задачи.

**Анализ существующих подходов.** В работе [2] впервые эксплицировалась принципиальная схема традиционной технологии производства деталей машин, состоящая из тринадцати этапов. Предельно обобщенная структура ТП производства машиностроительного изделия (рис. 1), показанная в работе [3], включает передель (этапы), связанные с получением заготовок деталей объемом  $V_3$ , их обработкой с уменьшением объема конструкционного материала до  $V_d$ , упрочнением, соединением (сборкой) и испытанием готовой продукции. Там же было отмечено, что «идеальный технологический процесс должен содержать только передель 1 и 5, обеспечивая тем самым наиболее короткий производственный цикл и безотходную технологию».

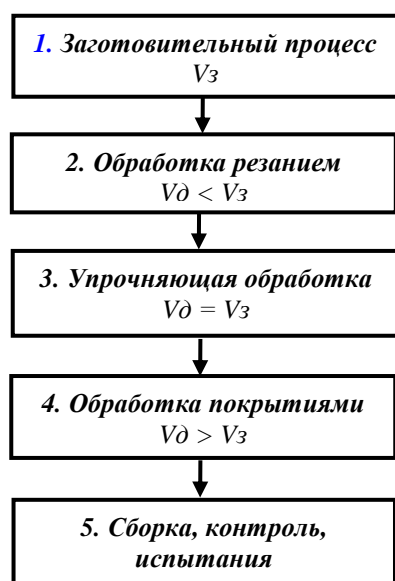


Рис. 1. Структура технологического маршрута производства машиностроительной продукции

В статье [4] понятие «технологический метод» (ТМ) трактуется вначале как «совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий по обработке относительно к типу изделия и производственной системы». Затем, выделяя на основе кибернетико-деятельностного подхода к анализу производства понятие «действие» в качестве базового, А.В. Мухин определяет технологический метод как морфологический класс действий, признаками которого являются их свойства или свойства их сочетаний, или интервалы значений этих свойств. Далее предлагается критерий эффективности производства – минимум вариативности дей-

ствий при изготовлении изделий. При обосновании целесообразности использования предложенного показателя вариативности действий для выбора эффективного ТМ автор приводит простейший пример изготовления гипотетической детали обработкой заготовки методом, допускающим разные последовательности действий по снятию припуска (рис. 2).

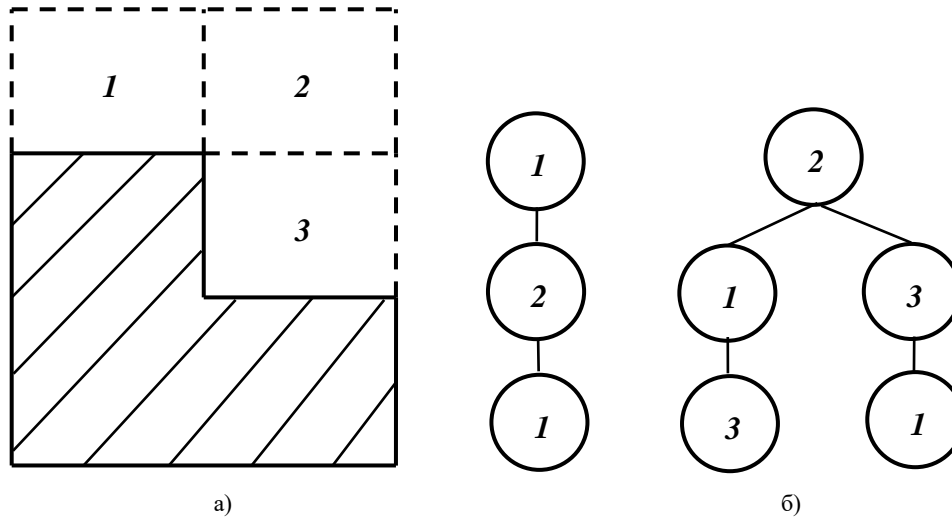


Рис. 2. Обработка снятием припуска: в зонах 1, 2 и 3 (а); в различной последовательности (б)

Анализ графа метода показывает, что наименьшей вариативностью обладает ветвь 1 – 2 – 3, поэтому именно этот метод (последовательность) обработки следует считать наиболее эффективным. Движение по ветвям 2 – 1 – 3 и 2 – 3 – 1 сопряжено с холостыми ходами, т.е. с дополнительными издержками.

Авторы работ [5, 6] выделяли по характеру процесса передачи технологической информации (управляющих сигналов) на сырье группы методов формообразования:

- 1) прямые (управляемые), например, лезвийная обработка методом следа или послыйный синтез;
- 2) опосредованные (неуправляемые), основанные на применении промежуточных носителей формы (пресс-форм, копиров и т.п.) – методы обработки давлением, литья и др.

Следует отметить, что методы каждой из выделенных двух групп уже нашли определенную область своего рационального использования в различных (по масштабу выпуска) типах машиностроительного производства.

Анализ результатов указанных и ряда других исследований позволил сделать следующие выводы:

- технология современного машиностроительного производства должна быть малостадийной;
- на каждой стадии (переделе) должна обеспечиваться минимальная вариативность действий или, другими словами, внутренняя однородность применяемого ТМ (в том числе за счет реализации совмещенного (комбинированного) физико-технологического воздействия на сырье);
- для производства единичных экземпляров конечной продукции и изготовления промежуточных носителей формы – формообразующей оснастки, как правило, сложной пространственной конфигурации необходимо использование *компьютерно управляемых* прямых («сканирующих» [7]) ТМ (действий), в то время как серийное производство (тиражирование) продукции требует применения высокопроизводительных опосредованных («оболочечных» [7]) методов, одновременно создающих всю поверхность (и тело) изделия.

В связи с высказанными утверждениями хочется отметить широкие возможности применения в заготовительном производстве компьютеризированных технологий, так называемых «Rapid Prototyping & Tooling», для (мелко)серийного изготовления деталей (заготовок), максимально приближенных по геометрии к соответствующим конечным изделиям [8, 9].

**Концептуализация задачи выбора.** Принятие инженерного решения по выбору ТМ изготовления деталей всегда представляло приоритетную задачу технологической подготовки производства (ТПП). Вплоть до настоящего времени выбор ТМ определяется опытом проектанта и преимущественно осуществляется на основе профессиональных предпочтений и ряда рекомендаций «рецептурного» характера, как следствие, недостаточно формализован (соответственно и не автоматизирован). В ряде случаев поле выбора настолько широко, что технологическое решение практически определяется лишь парком имеющегося на предприятии технологического оборудования, а зачастую решается ценой дорогостоящих производственных экспериментов. Кроме того, следует отметить, что многие современные автома-

тизированные системы ТПП не содержат формальных правил выбора технологического метода, оставляя это решение за проектантом.

Практика технологического проектирования в современном машиностроении предполагает осуществление процедуры выбора ТМ только на заготовительном этапе (переделе) при дальнейшем применении методов лезвийного и абразивного резания в основном формообразовании [10].

В настоящее время основой формализации технологического проектирования являются принципы типизации технических решений. Именно на них базируются метод *адресации (анализа)*, основанный на полных многоэлементных типовых решениях (типовых/групповых ТП), и метод *синтеза*, основанный на использовании локальных типовых решений. При этом метод синтеза, обладая большей универсальностью и позволяя учитывать индивидуальные особенности детали, содержит ряд эвристических, трудно формализуемых процедур, поэтому до сих пор менее автоматизирован.

Следует отметить, что в настоящее время не принято выделять различные стадии проектирования ТП, что вполне было оправдано при условии оперирования ограниченным множеством эффективных ТМ, тесным набором применяемых конструкционных материалов и весьма узким перечнем типов производимых деталей. Появление новых и развитие существующих ТМ, расширение перечня применяемых материалов (прежде всего за счет широкого применения в машиностроении различных пластмасс, керамических и композиционных материалов), а также увеличение номенклатуры производимых деталей увеличивает значимость рационального и оперативного выбора ТМ и технологической схемы изготовления деталей, особенно в условиях их единичного и мелкосерийного производства.

На основании общих положений системотехники [11] можно выделить две стадии проектирования ТП: стадию *макропроектирования* и *собственно проектирования*. Тогда к стадии макропроектирования ТП закономерно отнести выбор ТМ и разработку принципиальной схемы ТП изготовления детали, а к стадии микропроектирования – разработку маршрутного и операционного ТП. Значимость принятия рациональных решений на стадии макропроектирования чрезвычайно высока, так как они имеют стратегический характер и определяют общую эффективность изготовления.

Выбор ТМ (и принципиальной схемы ТП) изготовления конкретной детали основан на требовании обеспечения ее заданного качества, которое согласно основным положениям квалиметрии [12] характеризуется установленными показателями и обуславливается определенной совокупностью свойств. Эта совокупность может быть упорядочена в виде многоуровневой иерархической структуры «дерева свойств».

Важнейшим свойством, определяющим пригодность детали (и изделия в целом) к использованию, является ее способность к функционированию (потреблению), т.е. ее функциональность. При этом функциональность проявляется в различных периодах жизненного цикла детали: как при подготовке к использованию (в периоды хранения, транспортирования, ремонта и т.д.), так и при непосредственном применении детали. В каждом из этих периодов функциональность рассматривается в двух аспектах: во-первых, в смысле основной функции, характеризующей приспособленность детали выполнять свое основное назначение в соответствующий период жизненного цикла; во-вторых, в аспекте вспомогательной функции, характеризующей ее приспособленность к взаимодействию в системе «человек – среда – технический объект». Состав свойств назначения детали определяется ее главной функцией и для каждой функциональной группы деталей индивидуален. При этом определение свойств основано на выделении основной и вспомогательных функций и опирается на приведенную классификацию свойств объектов производства.

Таким образом, все свойства детали, определяющие ее функциональность, могут быть разбиты на следующие:

- свойства, определяющие функциональность детали при ее непосредственном использовании (характеризующие приспособленность детали к выполнению основной функции – свойства назначения – и характеризующие приспособленность детали к выполнению вспомогательных функций);

- свойства, определяющие функциональность детали при подготовке к ее использованию на различных этапах жизненного цикла (хранение, транспортирование, развертывание, ремонт и обслуживание, свертывание, ликвидация).

Оценка свойств деталей проводится путем определения конкретных значений показателей, характеризующих эти свойства. При этом ряд параметров имеет количественную оценку, а некоторые показатели – только качественную. Заданная совокупность свойств детали, определяемая ее функциональным назначением, обеспечивается рядом факторов, таких как применяемый материал, геометрическая форма и пр. Указанные факторы в сопоставлении с технологическими возможностями различных ТМ [13] являются факторами и основным инструментом формализации выбора ТМ.

Таким образом, формализация выбора технологических методов опирается на следующую схему: *изделие/деталь* → его/ее функции → свойства, обеспечивающие выполнение функций → показатели, характеризующие свойства изделия/детали → *факторы выбора методов* → технологические возможности методов → *технологический метод*. Полная реализация этой схемы характерна для сквозного (интегрированного) процесса автоматизированного конструирования изделия и АСТПП. При решении задач

только ТПП может использоваться сокращенный вариант указанной схемы: изделие/деталь → показатели → факторы выбора методов → технологические возможности методов → технологический метод.

В качестве факторов выбора методов выступают определенные показатели, которые могут быть разделены на три группы (рис. 3):

- 1) *определяющие* – определяющие принципиальную применимость метода;
- 2) *ограничивающие* – ограничивающие применимость метода по достижимым значениям показателей качества и некоторым другим признакам;
- 3) *дополняющие* – характеризующие эффективность применения метода.

К определяющим факторам можно отнести материал детали и ее геометрическую форму, точнее, ее ключевые особенности: топологию, полостность и другие параметры; к ограничивающим – точность детали, шероховатость поверхности, массу и габаритные размеры; к дополняющим – затраты на изготовление (себестоимость) детали и др.

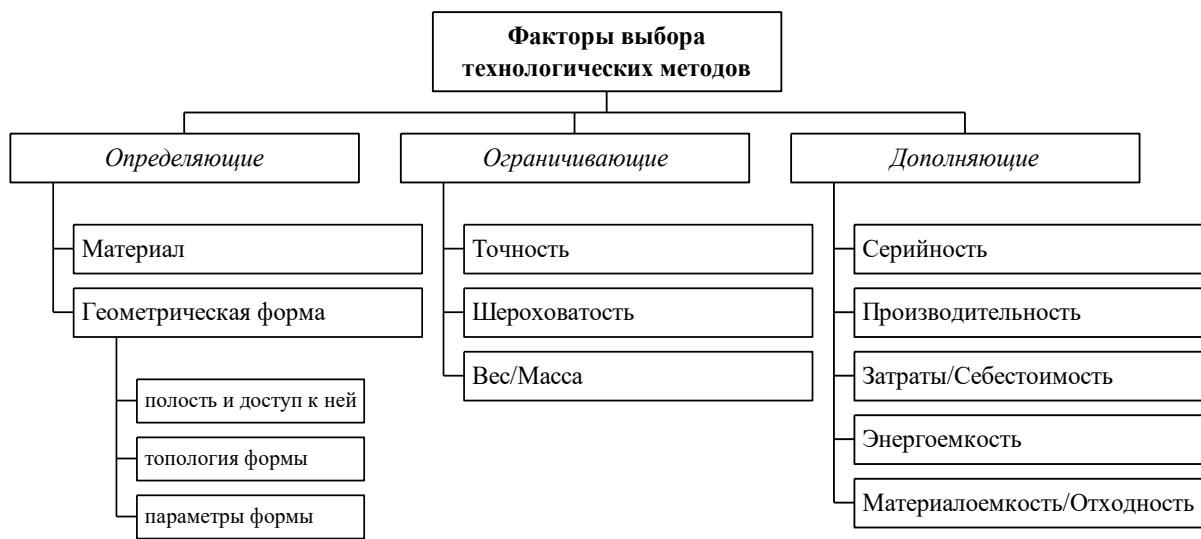


Рис. 3. Факторы выбора технологических методов

**Формализация задачи выбора.** В ходе процесса определения факторов выбора ТМ ряд показателей, может быть использован в своем естественном виде, а другие должны быть подвергнуты предварительной квантификации, позволяющей сформировать квалификационные группы с близкими технологическими характеристиками. Взаимосвязь указанных факторов выбора и ТМ формализуется с помощью специальных таблиц – матриц соответствия, связывающих конкретные квалификационные группы по каждому из факторов выбора с конкретными технологическими методами, позволяющими получить требуемые значения показателей данной квалификационной группы. Выбор конкретного ТМ (или набора ТМ) осуществляется путем определения метода, имеющего наибольший итоговый показатель применимости для данной группы по всем факторам выбора, т.е. получившего наибольшее число соответствий по всем факторам выбора.

В основе модели для определения итогового показателя применимости ТМ лежит традиционная конъюнктивно-дизъюнктивная модель, которой требуется определенная модификация. Для того чтобы учесть различную значимость определяющих и ограничивающих факторов, показатели применимости по этим факторам должны входить в модель со знаками дизъюнкции и конъюнкции соответственно. Показатели, являющиеся дополняющими факторами выбора, служат для сравнительного анализа нескольких альтернативных вариантов, имеют количественную оценку и в указанную модель не включаются.

Таким образом, модель определения итогового показателя применимости технологических методов имеет вид:

$$P = \prod_{i=1} p_{опр\ i} \cdot \sum_{k=1} p_{огр\ k},$$

где  $p_{опр\ i}$  – показатель применимости ТМ по  $i$ -тому определяющему фактору выбора;  $p_{огр\ k}$  – показатель применимости ТМ по  $k$ -тому ограничивающему фактору выбора.

Кроме описанной простой формы конъюнктивно-дизъюнктивной модели может быть использована ее нормированная форма, имеющая вид:

$$P = \prod_{i=1}^N P_{onpi} \cdot \frac{\sum_{k=1}^N P_{ozpk}}{N}.$$

Данная форма модели позволяет ограничить диапазон значений итогового показателя применимости  $P$ , что несколько упрощает математическую формулировку правил отбора ТМ.

Показатели применимости ТМ представляют собой безразмерные коэффициенты, имеющие значения в диапазоне от 0 до 1, в простейшем случае могут принимать значения 0 и 1 (0 – метод для данной квалификационной группы деталей неприменим; 1 – метод применим).

Указанные весовые коэффициенты сводятся в матрицу соответствия, т.е. таблицу, сопоставляющую  $i$ -тый ТМ ( $M_i$ ) в  $k$ -той квалификационной группе  $G_k$ . Тогда матрицы соответствия, позволяющие определять показатели применимости технологических методов, имеют вид:

$$P_{i,k} = K_{i,k}(M_i, G_k).$$

Для ряда факторов выбора матрицы соответствия будут 2-х мерными, т.е. связывающими один фактор с конкретным ТМ, а для других факторов – 3-х мерными, т.е. связывающими два зависимых фактора с конкретным ТМ. Зависимыми факторами являются те, значения показателей которых зависят от значения другого фактора. Так, ограничивающие факторы зависят от материала, из которого изготавливается деталь. Следовательно, матрицы соответствия по этим факторам будут содержать собственно один из ограничивающих факторов выбора (как зависимый фактор) и материал (как основной фактор).

Таким образом, основными элементами информационного обеспечения выбора ТМ является массив их описаний, максимально приближенный к фреймовой форме, и массив упомянутых матриц соответствия. Еще одним из видов компонентов информационного обеспечения являются квалификационные таблицы, позволяющие определить в процессе выбора ТМ принадлежность детали к конкретной квалификационной группе.

Квалификационные группы по каждому из факторов выбора являются результатом группирования деталей по определенным признакам либо результатом квантификации непрерывных показателей заранее установленных свойств. При этом группирование деталей в квалификационные группы производится по известным методикам [14], например, в основу выделения квалификационных групп материалов используется их общепринятая классификация [15].

Квалификационные группы по каждому из факторов выбора являются результатом группирования деталей по определенным признакам либо результатом квантификации непрерывных показателей. При этом группирование деталей в квалификационные группы максимально возможно опирается на общеизвестные методики и классификации.

Количество квалификационных групп по каждому из факторов выбора определяется из условий достаточности и однозначности выбора и с учетом его автоматизации может быть достаточно большим, например, составлять число до нескольких десятков.

В ряде случаев помимо квалификационных таблиц для показателей, описываемых параметрами, имеющими численную характеристику, необходимы «верификационные» (проверочные) таблицы, которые обеспечивают адекватность конкретного численного значения параметра одной размерности другой или определяют взаимосвязь значений параметров различных размерностей.

Процедура выбора ТМ на каждой стадии ТП может быть представлена как поиск технологического метода в процессе рекурсивного формирования плана изготовления детали на основе заданных значений параметров ее окончательного состояния. Следовательно, план изготовления детали представляет собой смену состояний предмета производства (заготовки), характеризуемых некоторым набором входных (до обработки) и выходных (после обработки) параметров, который составляется поэтапно на основе известных значений выходных параметров [15]. При этом выбор ТМ осуществляется путем поиска такого метода, который максимально удовлетворяет выходным параметрам состояния детали на каждом из этапов обработки. Используемая при этом формальная модель ТМ имеет вид:

$$M_i = \langle C_{i-1}, C_i, V_i \rangle,$$

где  $C_{i-1}$ ,  $C_i$  – векторы свойств, представляющие состояние до и после применения  $i$ -того технологического метода соответственно;  $V_i$  – вектор условий применения  $i$ -того технологического метода.

Для представления плана изготовления детали используется технологическая схема, которая является одной из форм отображения ТП и представляет собой графическую схему, отражающую состав и последовательность выполнения этапов ТП, которые в свою очередь состоят из отдельных операций. Узлами в технологической схеме являются названия этапов без подробного объяснения способа их реализации. Особо следует подчеркнуть, что технологическая схема отражает последовательность этапов ТП и указывает все возможные варианты реализации этой последовательности на определенном уровне общности. В основу разработки технологической схемы может быть положена принципиальная схема ТП [2].

В качестве критериев предпочтения при условии обеспечения сопоставимого качества изделия для сравнения и выбора конкретных технологических схем его изготовления могут быть предложены различные критерии эффективности, которые наиболее полно соответствуют поставленной задаче и конкретным условиям производства. Часто в качестве основного критерия предпочтения используются критерии, характеризующие экономическую эффективность, например, технологическая себестоимость или приведенные затраты.

Помимо деления технологических схем по уровню общности они могут быть разделены по количеству этапов формообразования в схеме. Технологические схемы с одним этапом формообразования (т.е. *деталеобразования* [16]) называются одноэтапными, а технологические схемы с несколькими этапами формообразования и деталеобразования – многоэтапными. Это деление косвенно связано с количеством используемых для изготовления детали технологических способов и их видом. С этой точки зрения идеальной технологической схемой является одноэтапная технологическая схема, когда сразу формируется готовое изделие. В общем же случае технологическая схема изготовления машиностроительных деталей предполагает использование двух-трех технологических способов (например, литье, лезвийное резание, абразивное резание), т.е. комбинации способов деталеобразования и формообразования. Соответственно и технологическая схема в этих случаях будет включать два и более соответствующих этапов. В некоторых случаях при условии использования в качестве заготовок предварительно сформированного материала (например, сортового проката) способы деталеобразования из технологической схемы исключаются, но при этом само формообразование обычно ведется в несколько этапов.

**Алгоритм решения задачи выбора.** Схематично укрупненный алгоритм выбора технологического метода состоит из следующих действий (рис. 4).

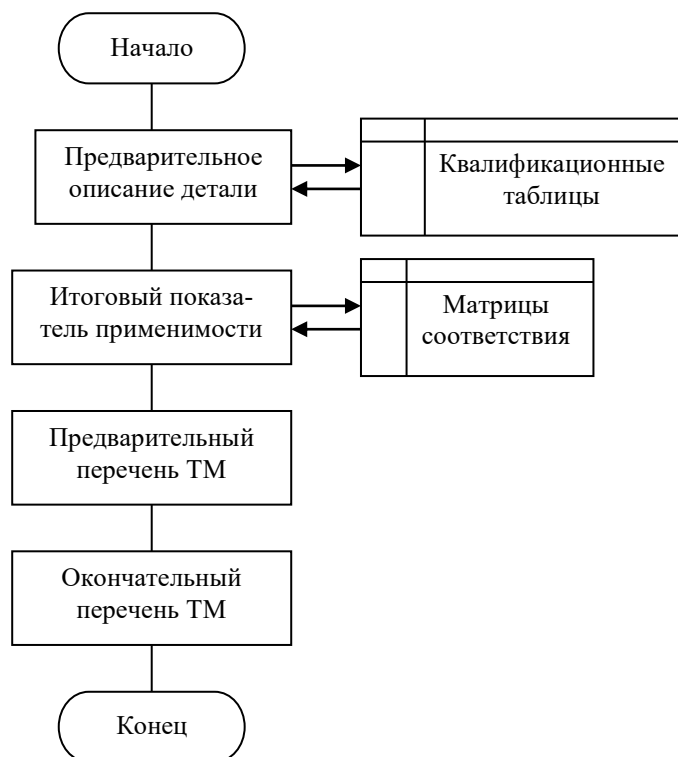


Рис. 4. Укрупненный алгоритм выбора ТМ

На первом этапе составляется предварительное описание детали в соответствии с установленным перечнем признаков. При составлении описания используются квалификационные таблицы, которые позволяют определить принадлежность детали к конкретным квалификационным группам по каждому из при-

знаков. На втором этапе определяется итоговый показатель применимости для всех методов с помощью матриц соответствия по каждому из факторов выбора с помощью конъюнктивно-дизъюнктивной модели. На третьем этапе осуществляется отбор того технологического метода (тех технологических методов), который (-ые) получил максимальное значение итогового показателя применимости. Также могут быть отобраны и те методы, значения итогового показателя применимости которых близко к максимальному. На четвертом этапе осуществляется окончательный выбор технологического метода из нескольких альтернативных вариантов на основе сравнительного анализа экономической эффективности их применения. Как правило, сравнительный анализ эффективности проводится на основе определения минимальных приведенных затрат или минимальной себестоимости изготовления детали.

**Заключение.** Установлена взаимосвязь параметров деталей машин и технологических методов их изготовления в компактном производстве исходя из сопоставления значений параметров свойств деталей и технологических возможностей методов. Предложена методика формализованного выбора ТМ на стадии макропроектирования технологических процессов на основе использования матриц соответствия. Описана математическая модель, используемая для определения итогового показателя применимости ТМ. После необходимой детализации предложенный алгоритм будет реализован в специально разработанном программном обеспечении САПР ТП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Свирский, Д.Н. Организационно-технологическое проектирование компактного производства машиностроительной продукции / Д.Н. Свирский // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 56 – 61.
2. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении: в 2-х т. Т. 2 / под общ. ред. О.И. Семенкова. – Минск: Выш. шк., 1977. – С. 27.
3. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 7.
4. Мухин, А.В. Выбор технологического метода подготовки производства в машиностроении / А.В. Мухин // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 45 – 51.
5. Горюшкин, В.И. Основы гибкого производства деталей машин и приборов / В.И. Горюшкин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 222 с.
6. Смирнов, А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИМаш, 1982. – 49 с.
7. Svirsky, D. «Rapid production» concept realisation on the laser machining base / D. Svirsky // Proc. 2<sup>nd</sup> Int. conf. on Advances in Production Engineering, part 2, Warsaw, TU, 2001. – P. 119 – 128.
8. Скородумов, С.В. Технологии послойного синтеза при создании моделей для заготовительного производства / С.В. Скородумов // Вестн. машиностроения. – 1998. – № 1. – С. 20 – 28.
9. Свирский, Д.Н. Ослабление «диктата» технологичности формы изделия при подготовке современного машиностроительного производства / Д.Н. Свирский // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте. – Киев: АТМУ, 2007. – С. 166 – 167.
10. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 1 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
11. Дружинин, В.В. Системотехника / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М.: Радио и связь, 1985. – 200 с.
12. Азгальдов, Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) / Г.Г. Азгальдов. – М.: Экономика, 1982. – 256 с.
13. Хлыстов, М.В. Таблица технологических возможностей видов обработки / М.В. Хлыстов // СТИН. – 2006. – № 6. – С. 26 – 29.
14. Шашкин, А.Г. Формообразование технологических поверхностей / А.Г. Шашкин // Проблемы развития технологии машиностроения / под ред. Э.А. Сателя. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 414 – 431.
15. Васильев, А.С. Формирование качества изделий в многосвязных технологических средах / А.С. Васильев // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2003. – № 3. – С. 14 – 23.
16. Климентьев, А.Л. Формализация выбора методов формообразования для деталей широкой номенклатуры / А.Л. Климентьев, В.С. Мисевич // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 17 / Белорус. гос. политех. акад. – Минск: Технопринт, 2001. – С. 27 – 31.

Поступила 14.06.2007