

Зр.

НАУКОВА ДУМИ

Э. В. РЫЖОВ, В. И. АВЕРЧЕНКОВ

Э. В. РЫЖОВ, В. И. АВЕРЧЕНКОВ

**ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ**

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Э. В. РЫЖОВ
В. И. АВЕРЧЕНКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1989

риэ-
вра-
ова-
ства
ыми
асто
еко-
из-
ило,
нан-
ение
емы,
уще-
на

иной
если
ива-
аль-
гике
рым
тво-
пти-
мен-
на-
збе-
жит
ных
елей
али-
спе-

мо-
вре-
тан-
амм-
тиж

621.7
УДК 621.9: 681.3

Оптимизация технологических процессов механической обработки / Рыжов Э. В., Аверченков В. И.; Отв. ред. Гавриш А. П.; АН УССР. Ин-т сверхтвердых материалов. — Киев: Наук. думка, 1989. — 192 с. — ISBN 5-12-000920-4.

В монографии приведены результаты теоретических исследований с использованием системного подхода процессов механической обработки с целью построения их математических моделей. Особое внимание уделено разработке методов структурной и параметрической оптимизации технологических процессов (ТП). Применительно к структурной оптимизации описаны методы выбора вида заготовки, маршрута обработки, структуры технологической операции, рациональной системы станочных приспособлений и др. Особенности параметрической оптимизации ТП рассмотрены на примерах многокритериальной и многопараметрической оптимизации режимов механической обработки. Показана возможность выбора прогрессивных технологий с использованием автоматизированных банков данных.

Для научных и технических работников, занимающихся созданием и внедрением САПР ТП; может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

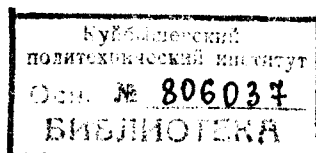
Ил. 49. Табл. 30. Библиогр.: с. 183—190 (59 назв.).

Ответственный редактор
Гавриш А. П.

Утверждено к печати ученым советом
Института сверхтвердых материалов АН УССР

Редакция технической литературы

Редактор З. А. Майдан, А. Н. Шадрина



Р 2704040000-322 453-89
М221(04)-86

ISBN 5-12-000920-4

© Издательство «Наукова думка», 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс связан с усилением значения технологии производства при создании новых изделий. Особенно эта тенденция проявляется при разработке и функционировании гибких автоматизированных производств. Проектирование технологических процессов в этих условиях требует учета большого количества факторов, характеризующих множество элементов со сложными и разнообразными связями между ними и изменяющихся во времени и пространстве. При этом часто возникает задача выбора среди множества вариантов наиболее рационального по некоторому критерию и обеспечивающего заданные параметры качества изготовления изделий. В условиях ручного проектирования технологических процессов, как правило, не представляется возможным разрабатывать и анализировать большое число вариантов, что связано со значительной трудоемкостью выполнения этих работ. Решение этой задачи становится возможным при создании систем САПР ТП [3, 6, 7]. Эти системы, наряду со значительным сокращением сроков проектирования, позволяют существенно повысить качество проектных решений за счет оптимизации процессов на всех этапах технологического проектирования.

Оптимизация — это процесс нахождения экстремума некоторой количественной величины (параметра) проектируемого объекта, представляемой в виде функции. Если эта функция характеризует положительное свойство объекта, которым в рассматриваемой работе является технологический процесс или его элемент, то ищется максимальное ее значение, если отрицательное — минимальное. Обычно в инженерной практике используется термин «оптимальное решение» или «оптимальный проект», под которым в этом случае понимается наилучшее из некоторого множества решение, удовлетворяющее всем требованиям, предъявляемым к проектируемому объекту. Теория оптимизации в современном представлении [40] включает в себя совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценки возможных вариантов. Процесс оптимизации лежит в основе деятельности, направленной на проектирование новых, более эффективных и менее дорогостоящих технических объектов. Достижение этих двух главных целей любого процесса проектирования сопряжено с синтезом различных элементов, анализом множества их состояний и выбором из них такого состояния, при котором обеспечиваются наилучшие показатели функционирования технического объекта.

Большинство используемых методов оптимизации по своей сути инвариантны и могут использоваться при решении различных проектных задач. Поэтому в настоящее время разработаны десятки численных методов оптимизации, оформленных в виде стандартных процедур (алгоритмов) и хранящихся в библиотеках прикладных программ вычислительных центров, открытых для доступа различным пользователям. В этих

условиях перед проектировщиком встает задача правильного выбора метода и соответствующих наборов программ. Так, при расчете оптимальных режимов резания могут использоваться стандартные программы симплекс-метода или других методов линейного программирования. Однако при этом достаточно сложной задачей может быть стыковка принятой математической модели объекта и ее вида с соответствующими программами оптимизации.

Применительно к технологии машиностроения вопросы оптимизации технических решений усложнены трудностью построения математических моделей рассматриваемых объектов, что связано с низким уровнем формализации существующих методов проектирования технологических процессов. При этом главным недостатком существующих методов оптимизации технологических процессов, как отмечается во многих работах, является то, что для функции цели и технических ограничений не установлены зависимости, которые учитывали бы все факторы и охватывали все возможные случаи. Даже с введением упрощений пока не удается получить общие математические модели технологических процессов изготовления любого типа деталей для различных производственных условий.

В предлагаемой работе разработан комплексный подход к решению задачи оптимизации технологических процессов. С этой целью на основе системно-структурного анализа исследованы методы математического моделирования технологических процессов, разработаны наиболее важные критерии оптимальности, выбраны виды технических ограничений и предложены математические модели различных технологических объектов.

Под основной целью технологического процесса или его элемента обычно понимается обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах. Отсюда вытекает необходимость в построении двух главных критериев оптимальности: максимальной производительности и минимальной себестоимости. В зависимости от вида и уровня оптимизации технологического процесса могут использоваться и другие критерии, объединенные в группы экономических, технико-экономических, технологических и эксплуатационных критериев.

Важной задачей при построении математических моделей технологических процессов является выбор и описание технических ограничений, учитывающих действие различных факторов описываемого процесса и связанных с влиянием на него различных характеристик заготовки, параметров станка, приспособления и инструмента и других условий обработки.

Вопросы оптимизации технологических процессов в большинстве случаев рассматривались при решении локальных задач и затрагивали главным образом оптимизацию режимов резания [42]. При комплексном подходе следует различать два вида оптимизации: структурную и параметрическую. Применительно к первому виду оптимизации в монографии рассмотрены вопросы выбора вида заготовок, маршрута и отдельных операций обработки, а также припусков и операционных размеров, оптимальной структуры технологической операции, определения рациональных систем станочных приспособлений и др. Предложена модель оптимизации выбора технологических решений при конструкторско-технологическом обеспечении износостойкости деталей машин, что позволяет прогнозировать качество изделий на этапе изготовления и эксплуатации. Для второго вида оптимизации, наряду с описанием известных подходов к расчету режимов резания методом линейного программирования, предлагается ряд новых методов с учетом технологической наследственности, многокритериальной и многопараметрической оптимизации режимов механической обработки с использованием детерминированного и стохастического подходов.

Особую роль с развитием и широким использованием вычислительной техники приобретает выбор оптимальных технологических решений с использованием АБД. В этом случае ставится задача выбора наиболее прогрессивных методов обработки, характеризующихся малооперационностью и обеспечивающих материало-, энерго- и трудовые сбережения. На основе описания различных технологий в виде двух подсистем — энергетической и информационной — могут быть созданы методы анализа и синтеза новых методов обработки.

Приведены алгоритмы оптимизации различных технологических задач, представленные в виде блок-схем, на основе которых разработаны и прошли опытную проверку ППП. Приведенные методы проектирования, математические модели и алгоритмы могут быть рекомендованы для создания различных подсистем САПР ТП.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

P — штучная производительность, шт./мин
 B — ширина детали (заготовки), мм
 B_d — ширина державки резца, мм
 B_ϕ — ширина фрезерования, мм
 C_3 — себестоимость изготовления заготовки, руб.
 $C_{оп}$ — себестоимость технологической операции, руб.
 C_v, C_z — постоянные коэффициенты, характеризующие нормативные условия обработки
 D — диаметр детали (заготовки), мм
 E — модуль упругости материала, МПа
 H — высота детали (заготовки), мм
 H_d — высота державки резца, мм
 HB — твердость по Бринеллю
 H_μ — величина микротвердости, МПа
 h — толщина слоя металла, удаляемого на операции механической обработки, мм
 i — индекс перехода (операции) технологического процесса (число переходов, операций)
 K_v, K_z — поправочные коэффициенты, учитывающие качество обрабатываемого материала, состояние поверхности заготовки, характеристику режущего инструмента
 L — длина детали (заготовки), мм
 $L_{p.x}$ — длина рабочего хода, мм
 M — инструментальные расходы, приведенные к одному периоду стойкости, руб.
 m — показатель относительной стойкости
 N — число деталей в партии
 N_r — годовая программа выпуска деталей
 N_n — мощность электродвигателя главного привода станка, кВт
 n — частота вращения, мин⁻¹
 R_a — среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности, мм
 R_z — высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм

R_{max} — наибольшая высота неровностей профиля, мкм
 s — подача, мм/об
 T — период стойкости, мин
 $T_{ц}$ — длительность рабочего цикла, мин
 $T_{п.з}$ — подготовительно-заключительное время, мин
 $T_{кв}$ — точность обработки в квалитетах
 t — глубина резания, мм
 t_v — вспомогательное время, мин
 t_o — основное время, мин
 $t_{обс}$ — время обслуживания рабочего места, мин
 t_p — время резания, мин
 $t_{см}$ — время на смену и подналадку инструмента, мин
 $t_{шт}$ — штучное время, мин
 $t_{шт.о.к}$ — штучно-калькуляционное время, мин
 v — скорость резания, м/мин
 z — число зубьев режущего инструмента
 Z_i — припуск на обработку поверхности на i -й операции, мм
 Z_{pi} — расчетный припуск на обработку поверхности на i -й операции, мм
 Z_0 — общий припуск на обрабатываемую поверхность, мм
 x_v, y_v, u_v, r_v, z_v — показатели степени при переменных в формуле скорости резания
 x_z, y_z, n_z, u_z, r_z — показатели степени при переменных в формуле для определения эффективной мощности процесса резания
 x_y, y_y, n_y, u_y, z_y — показатели степени при переменных в формулах для определения силы резания P_y
 x_s, y_s, n_s, u_s, r_s — показатели степени при переменных в формулах для определения силы резания P_s
 η — коэффициент полезного действия (КПД)
 λ — коэффициент резания
 АБД — автоматизированный банк данных
 АСНИ — автоматизированная система научных исследований
 БД — база данных
 БИТМ — Брянский институт транспортного машиностроения
 ВПИ — Волгоградский политехнический институт
 ЕС ЭВМ — единая система электронно-вычислительных машин
 МО — метод обработки
 ПО — процесс обработки
 ППП — пакет прикладных программ
 САПР — система автоматизированного проектирования
 САПР ТП — система автоматизированного проектирования технологических процессов
 СМ ЭВМ — семейство системы малых ЭВМ

СОЖ — смазочно-охлаждающая жидкость
 СПИД — станок — приспособление — инструмент — деталь
 СПЭ — способ подвода энергии
 ССП — системы станочных приспособлений
 СФО — схема движения формообразования
 ТП — технологический процесс
 ТПИ — Томский политехнический институт
 ТуПИ — Тульский политехнический институт
 ТПП — технологическая подготовка производства
 ФО — процесс формообразования
 ФТЭ — физико-технологический эффект
 ФХМ — физико-химический механизм
 ЭМО — электромеханическая обработка

Глава первая

СИСТЕМНО-СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1. Системный анализ процессов механической обработки

При разработке технологических процессов или отдельных операций, расчете режимов резания и выполнении других технологических задач возникает множество возможных решений. При «ручном» проектировании обычно отдельные решения выбираются на основе опыта технолога. Такой подход не может быть использован при создании САПР ТП, в основу которых должны быть положены математические модели процессов обработки.

Любой ТП изготовления изделия можно рассматривать как последовательное изменение состояния объекта производства — заготовки — от ее исходного состояния к конечному. При этом ТП представляется как сложная система, в которой можно выделить входные параметры $V_1, V_2, \dots, V_p$ (характеристики заготовки), выходные $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ (характеристики детали) и управляющие технологические $X_1, X_2, \dots, X_n$ (режимы обработки, виды операций и др.).

Известное понятие «система» приобрело в последние годы в связи с развитием кибернетики и информатики особый смысл. В применении к САПР ТП под термином «система» понимается комплекс элементов E и существующих между ними соотношений R , образующих единую совокупность, действующую в рамках более сложной системы, в которую она входит, т. е. $S = \{E, R\}$ [43]. Данное определение системы отражает ее иерархическую структуру, из которой следует, что каждую систему можно разделить на подсистемы, сохраняя при этом имеющиеся связи с системой в целом, и рассматривать их в отдельности. Характерной особенностью системного анализа является то, что при изучении части совокупности необходимо принимать во внимание всю совокупность.

Рассмотрев в наиболее общем виде системную модель технологии (рис. 1), выделим три входных потока: материя, энергия, информация. Под материей примечательно к машиностроению будут пониматься материалы в жидком и твердом состоянии, предварительно прошедшие или не прошедшие какую-либо обработку. Поток материалов под воздействием потоков энергии и информации преобразуется в готовое изделие — результат, получаемый на выходе технологии и отличающийся от суммы входных потоков массой (часть материалов уходит в отходы), физико-химическим состоянием и энергией (после обработки в изделии возникают внутренние напряжения и др.), а также количеством содержащейся в нем геометрической информации, выраженной в изме-

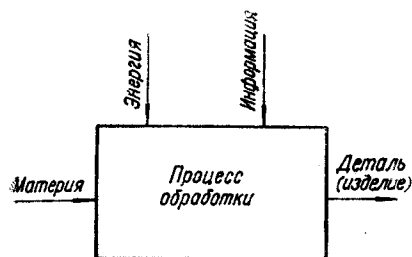


Рис. 1. Системная модель технологии.

са формообразования, рассматриваемого в столь общих категориях. Потoki материалов и энергии являются неотъемлемыми составляющими процесса формообразования, причем первый отражает объект воздействия, а второй — средство воздействия. При этом сущность процесса состоит в передаче информации на объект (материал) с помощью энергии. Процесс перенесения информации о готовом изделии или его отдельных элементах может представляться в виде схемы (рис. 2), состоящей из стадий подготовки информации на этапе ТПП, передачи информации посредством подготовки операционных карт ТП, оснастки, инструмента и управляющих программ в случае использования станков с ЧПУ.

Если принять, что производственная деятельность предприятия является особой системой, то необходимо учесть, что в ней действуют два типа процессов — материальный и информационный. Производственный процесс или процесс изготовления относится к группе материальных и заключается в преобразовании исходного материала в состоянии заготовки в состояние готового изделия. В этом случае преобразование происходит в соответствии с технологическим процессом, который относится к группе информационных и является в некотором смысле алгоритмом производственного процесса.

С точки зрения описанной классификации разница между производственным и технологическим процессами заключается в том, что первый из них является физической реализацией второго.

Технологические системы как сложные объекты определяются следующими основными характеристиками: многомерностью, т. е. большим числом достаточно сложных составных частей; иерархичностью строения (в общем случае любой технологический процесс можно представить совокупностью ряда подсистем, каждая из которых подразделяется на еще более простые подсистемы); многосвязностью, выражающейся в большом количестве взаимосвязанных и взаимодействующих между собой подсистем на одном уровне и между равными иерархическими уровнями системы и с внешней средой; многокритериальностью (для ряда подсистем характерно принятие решений на основе нескольких критериев оптимальности и глобальных критериев для исследуемой системы в целом); наличием управления, разветвленной информационной сети и интенсивных потоков информации; сложностью функций, выполняемых системами, и направленными на достижение заданной цели функционирования.

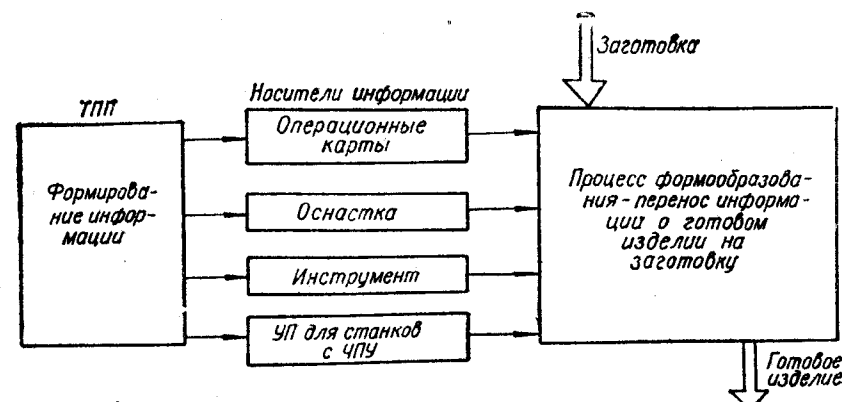


Рис. 2. Информационная модель процесса формообразования.

Технологический процесс механической обработки может рассматриваться как относительно обособленная часть производственного процесса, связанная с другими его частями; как функция — это процесс качественного и количественного преобразования объектов производства из состояния заготовок S_0 в состояние готовых деталей S_k . Как структурная система технологический процесс представляет собой совокупность взаимосвязанных этапов, операций и переходов. Процессы, обладающие указанными свойствами, могут рассматриваться как системные. Это дает возможность при разработке методов анализа технологических процессов использовать аппарат кибернетики и системотехники [53].

При осуществлении технологических процессов изменяются качественные и количественные характеристики объектов производства. В результате функция технологического процесса может быть описана отображением $S_0 \rightarrow S_k$. В соответствии с разделением технологического процесса на операции общая функция расчленяется на ряд операционных функций φ . Функция каждой φ_i операции характеризует промежуточное изменение качественного состояния заготовки $S_{i-1} \rightarrow S_i$. Состояние заготовки S_i характеризуется формой, межоперационными размерами, их точностью, шероховатостью и физико-механическими свойствами поверхностей, полученных в результате выполнения i -й операции.

Трудности проектирования ТП, особенно в условиях САПР, обусловлены главным образом тем, что эти задачи не имеют в настоящее время формальных методов решения. Так, выбор маршрутного ТП при его описательном изложении не содержит данных о методах проектирования процессов изготовления сложных деталей, которые могли бы быть представлены математическими операциями. Кроме того, выбор последовательности действий и средств для изготовления детали не может быть получен математическим путем на основании исходных данных.

Для современной технологии машиностроения и ее использования на практике характерно [37]: отсутствие строгих аналитических зависи-

мостей; сложная логика суждений, сложная взаимосвязь и взаимное влияние отдельных задач; большая роль эмпирики и наличие скрытых объективных законов; наличие огромных информационных потоков и большого числа составных элементов технологий (станков, приспособлений, инструментов, режимов обработки и др.).

Применение системного анализа в таких условиях проектирования технологических процессов позволяет систематизировать всю исходную информацию и наметить основные пути получения наиболее рациональных решений.

Процесс «ручного» проектирования технологии механической обработки представляет собой ряд действий, с помощью которых инженер-технолог производит выбор элементов из рассматриваемых массивов различных технологических предметов, устанавливает между ними соответствие, формируя переходы и технологические операции. Выбор оптимального процесса проводится путем сравнения нескольких вариантов процессов при введении оценок на элементы, составляющие его.

Решение любой задачи на ЭВМ требует наличия аналитических или других видов зависимостей, отражающих количественную, а не качественную сторону процесса проектирования. Поэтому для осуществления автоматизации технологического проектирования с помощью ЭВМ необходимо провести формализацию технологии (или ее части), т. е. провести замену (преобразование) содержательных предложений формулами. Этот процесс, называемый формализацией, обеспечивает возможность создания универсальных алгоритмов и программ относительно начальных и конечных условий, т. е. относительно формы и размеров детали, характера производства, характеристик оборудования и оснастки, тем самым обеспечивается эффективное применение ЭВМ в проектировании различных ТП для деталей различных классов и любой сложности — корпусов, валов, рычагов и т. п. Формализация задачи превращает процесс технологического проектирования из процесса рассуждений и построения аналогий в процесс строгого расчета. При этом форма образования ТП и его составных элементов может быть выражена с помощью аппарата математической логики; содержание ТП, характеризуемое рядом свойств объектов технологии, может быть выражено средствами теории множеств, а качественные отношения — количественными зависимостями с помощью логических функций.

Следует отметить, что одной из трудностей процесса формализации является то, что существующие в технологии машиностроения эмпирические зависимости количественных отношений выражаются громоздкими таблицами, имеющими большое число значений, либо формулами, не учитывающими различных условий производства. Основываясь на математическом анализе и статистическом исследовании, таблицы и эмпирические формулы можно заменить математическими выражениями, которые исключают эти недостатки. В этом случае повышаются эффективность и точность расчета многих параметров и уменьшается нагрузка памяти ЭВМ.

Системы, отражающие технологические процессы механической обработки, как отмечалось ранее, отличаются целостностью входящих в нее взаимосвязанных элементов, определенностью структуры, допу-

скающей многоуровневое построение элементов, возможностью взаимодействия с другими системами, что делает ее, в свою очередь, элементом систем более высокого уровня иерархии. При исследовании таких систем приходится учитывать большое число переменных и выбирать из них те, которые оказывают наиболее сильное влияние. Системный анализ дает возможность наметить

необходимую последовательность действий по формулированию общей проблемы, ее решения и реализации этого решения. Решение любой системной задачи при технологическом проектировании может быть представлено в виде последовательности определенных операций, под которыми понимается совокупность действий, направленных на достижение некоторой цели. Виды и последовательность этих операций показаны на рис. 3.

При решении задач оптимизации ТП необходимо учитывать ряд принципов, используемых при системном подходе. Основными из этих принципов являются следующие [33].

1. Система, состоящая из оптимальных частей, не является в общем случае оптимальной, поэтому система должна оптимизироваться в целом как единый объект с заданным целевым назначением.

2. Система должна оптимизироваться по количественному определенному критерию, отражающему в математической форме цель оптимизации. Этот критерий, представленный в виде функции оптимизируемых параметров, является целевой функцией.

3. Система оптимизируется в условиях количественно определенных ограничений на оптимизируемые параметры. Это означает, что оптимальность системы всегда относительна, условна. Достаточно изменить условия оптимизации, математически определяемые системой функциональных равенств и неравенств, чтобы изменить как оптимальный проект системы, так и экстремальную величину исследуемой функции.

2. Особенности построения структуры математических моделей технологических процессов

Процесс моделирования различных объектов, являющихся сложными системами, может характеризоваться некоторыми общими подходами. При этом принято выделять следующие уровни детализации: 1) выбор принципов построения проектируемого объекта; 2) разработку его структурной схемы; 3) определение характеристик процессов функционирования объекта; 4) разработку функциональных блоков; 5) проектирование элементов блоков.

Нетрудно заметить, что все эти уровни характерны и для проектирования ТП. Так, 1 и 2 уровни можно сопоставить с выбором общей

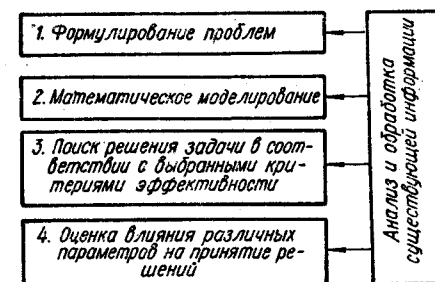


Рис. 3. Схема решения системной задачи.

схемы и маршрута обработки, 4 — с проектированием технологической операции, а 5 — с определением режимов резания. Качество проектирования объекта зависит от принимаемых решений на всех уровнях проектирования. Однако наибольшее влияние оказывают первые уровни и особенно выбор принципов построения проектируемого объекта и разработка его структурной схемы.

В зависимости от проектных задач и требований, предъявляемых к их решению, возможны различные способы моделирования этих задач. Наибольшее распространение при оптимизации ТП получили методы математического моделирования, связанные с построением так называемых математических (операционных) моделей, в которых, наряду с множеством проектных ситуаций и множеством решений, возникающих в рассматриваемых ситуациях, находят отражение требования, предъявляемые к искомому решению, и факторы, которые должны быть учтены при его выборе. Выработка рекомендаций относительно проектируемого объекта заключается в отыскании решения из множества возможных решений, наиболее полно удовлетворяющего этим требованиям. Для этого используются различные методы исследования операций, математического программирования и других разделов вычислительной математики. Появление ЭВМ и внедрение машинных методов проектирования открыли большие возможности в замене физических методов моделирования математическими.

Математическая модель — это совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов, множеств и т. п.) и отношений между ними, которая адекватно отображает некоторые свойства проектируемого технического объекта. Например, большой и важный класс математических моделей составляют системы уравнений. В процессе проектирования применяют те математические модели, которые отображают существенные с позиций инженера-проектировщика свойства объекта. Главным требованием к математическим моделям является адекватность отражения в них моделируемого объекта.

Анализ возможностей математических моделей оценивается с помощью формального описания основных компонентов, участвующих в процессе принятия проектных решений. К таким компонентам относятся: множество проектных решений, которые могут быть приняты на данном этапе проектирования; требования, предъявляемые к проектному решению; цели, преследуемые при его выборе; условия, влияющие на степень достижения поставленных целей при выборе тех или иных проектных решений; соответствие между различными проектными решениями и степенью достижения целей в заданных условиях; способ оценки проектных решений.

Несмотря на многообразие математических моделей, используемых при проектировании различных технических объектов, они имеют общую структуру. Так, все переменные в математических моделях делятся на три группы: управляемые, неуправляемые и производные.

Под управляемыми переменными понимаются такие, выбор конкретных значений которых и определяют выбор того или иного проектного решения. Неуправляемые переменные характеризуют ситуацию, в ко-

торой должно быть принято решение. Эти переменные описывают внешние факторы, не зависящие от оптимизируемых проектных решений, но влияющие на последствия принятия того или иного решения. Производные переменные, зависящие от управляемых и неуправляемых переменных, являются результатами принятия того или иного проектного решения. К таким переменным относятся в проектных задачах технико-экономические характеристики проектируемого объекта.

В основе процесса выбора проектных решений на различных этапах лежит достижение некоторых целей, которые можно подразделить на качественные и количественные.

Под качественными подразумеваются цели, которым соответствуют лишь два исхода — цель достигнута или не достигнута. Примером качественной цели является стремление обеспечить получение той или иной технико-экономической характеристики проектируемого объекта в заданных пределах. Соотношения, описывающие условие выполнения качественных целей, обычно называют ограничениями модели (техническими ограничениями), а решения, удовлетворяющие этим условиям, — допустимыми, поэтому этот тип критериев называют критериями допустимости.

Под количественными целями подразумевают такие, которые заключаются в стремлении увеличить (или уменьшить) некоторые характеристики (например технико-экономические) проектируемого объекта, зависящие от принимаемых решений. С точки зрения количественной цели решение будет тем лучше, чем больше (или меньше) при этом значение соответствующего критерия. Критерии, служащие для выражения количественных целей, называют критериями эффективности или частными критериями эффективности. Если среди вариантов проектируемого объекта отыскивается не любой приемлемый лучший вариант, а наилучший в некотором смысле, то критерий эффективности в этом случае чаще называют критерием оптимальности.

В реальных проектных задачах возникает необходимость при выборе некоторого решения учитывать возможность достижения нескольких количественных целей и подчас противоречивых. В этих ситуациях приходится учитывать несколько частных критериев эффективности. Наиболее простой способ решения этой проблемы — построение обобщенного критерия, который является в общем случае скалярной суммой частных критериев. Зависимость между обобщенным критерием или частным критерием эффективности (оптимальности) и подлежащими оптимизации параметрами называют целевой функцией. Таким образом, качество проектного решения будет тем лучше (по совокупности цели), чем больше (или меньше) соответствующее ему значение целевой функции.

Целевая функция должна удовлетворять ряду требований: достаточно полно описывать объект; иметь определенный физический смысл; просто описываться в математическом виде; определяться с допустимой точностью.

Построение математических моделей различных технических объектов — достаточно сложный творческий процесс, требующий от разработчика знания предметной области, к которой относится проектиру-

емый объект, методов математического моделирования и определенной изобретательности.

Процесс операционного моделирования включает следующие этапы: постановку задачи; построение модели и ее анализ; разработку методов получения проектных решений на модели; экспериментальную проверку и корректировку модели и методов.

Качество создаваемых математических моделей во многом зависит от правильной постановки задачи. На этом этапе необходимо определить технико-экономические цели решаемой задачи, провести сбор и анализ всей исходной информации, определить технические ограничения. В процессе построения моделей необходимо использовать методы системного анализа. При этом процесс моделирования, как правило, носит итерационный характер, который предусматривает на каждом последующем шаге уточнения предыдущих решений, принятых на предшествующих этапах разработки моделей.

Рассмотрим особенности построения структуры математических моделей ТП изготовления деталей и определим основные пути решения задач оптимизации этих видов объектов. В общем случае ТП можно представить как упорядоченное множество элементов структурной модели, каждый элемент которой выполняет определенную функцию (работу) и находится в конструктивной, функциональной, информационной связи с другими элементами.

В зависимости от поставленной задачи структурная модель процесса может быть выполнена с той или иной степенью подробности (детализации). Например, в ТП, выполняемом на поточной линии, при решении вопроса распределения припусков на пооперационную обработку, элементами структуры могут быть сами станки. Если исследуется качество, точность деталей на отдельных операциях, то в такой постановке станок расчленяется на соответствующие узлы, и структурная модель будет состоять из этих узлов (элементов). Итак, структурная модель в целом соответствует характеру поставленной задачи и определяет общее строение рассматриваемого объекта или его части.

ТП как сложная система функционирует в пространстве и во времени, т. е. в каждом элементе системы происходят определенные кинематические преобразования, физические, химические, кинетические и другие процессы, обусловленные назначением каждого элемента в структуре и их взаимодействием. Построение модели функционирования системы сводится к построению математических моделей процессов, которые в конечном счете выражаются дифференциальными, интегральными, алгебраическими и другими типами уравнений или какой-либо логической зависимостью [55]. В то же время процесс обработки заготовки является физическим процессом реализации технологии изготовления детали. Если отбросить влияние случайных факторов и помех (не учтенных факторов), которые встречаются в каждом реальном процессе, то математические модели процесса обработки и ТП должны быть адекватными [43].

Математическая модель процесса обработки предназначена для управления процессом обработки, а математическая модель ТП необходима для определения методов обработки. Следовательно, кроме общих

для обеих моделей факторов и ограничений, должны быть рассмотрены переменные величины и способы записи, которые обуславливают различие этих моделей.

Формоизменение заготовки происходит в процессе выполнения операций и переходов. Главная функция цели ТП, как отмечалось ранее, может быть выражена в виде [53] $\Phi: S_0 \rightarrow S_k = C_0$, где Φ — оператор формоизменения; S_0 — исходное состояние заготовки; S_k — конечное состояние готовой детали; C_0 — критерий оптимизации.

Пользуясь таким подходом, ТП можно описать математически, в виде функционала Φ формоизменения и параметров обрабатываемой детали S , т. е. $F(\Phi, S) = C_0$. Весь процесс формообразования может представляться переходом из состояния заготовки S_0 в состояние детали S_k посредством выполнения совокупности некоторой последовательности операций. В этом случае можно показать, что $F(\Phi, S) = \Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \dots \rightarrow \Phi_k$, $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \dots \rightarrow S_k$. Главным требованием, предъявляемым к математической модели любого объекта, и ТП в частности, является адекватность отражения модели реальным свойствам объекта.

Математическая модель выражается математическими зависимостями, представляющими собой определенные соотношения между отдельными параметрами, описывающими данный объект, а также множеством ограничений, накладываемых на эти параметры и выражаемых в виде уравнений и неравенств. Совпадения математической модели процесса с фактическим зависит от уровня знания процесса и умения его описывать в виде математической модели.

Процедура оптимизации ТП может быть разбита на следующие этапы [21].

1. Формулировка качественной модели рассматриваемого процесса — выделение наиболее важных факторов и закономерностей, которым они подчиняются, определение основных целей и ограничений.

2. Построение математической модели рассматриваемого процесса — представление в математических терминах качественной модели. На этом этапе формируются искомые переменные, устанавливаются математические соотношения между переменными и критериями качества, характеризующими процесс. На основании критериев качества вводятся ограничения на изменение переменных, а также строится целевая функция от переменных, т. е. такая числовая характеристика, большему (максимизация) или меньшему (минимизация) значению которой соответствует лучшее течение оптимизируемого процесса.

3. Анализ и решение соответствующей задачи. Теория построения и методы решения таких задач составляют содержание математического программирования. Объем решения рассматриваемых задач, как правило, достаточно большой и требует применения современных ЭВМ.

При решении задач оптимизации, возникающих на различных этапах технологического проектирования, используются различные виды математических моделей и методы оптимизации, которые могут быть классифицированы по следующим признакам [43].

1. По структуре математические модели делятся на две группы: с ограничениями, без ограничений.

Ограничения, в свою очередь, делятся на два вида: линейные, нелинейные.

Функции цели делятся на четыре группы: линейные, квадратичные, разомкнутые, нелинейные.

2. По виду переменных математических моделей различают следующие группы: с непрерывными значениями переменных; с дискретными значениями переменных. В последней группе различают дискретные целочисленные и нецелочисленные.

Для отыскания оптимума оценочной функции используются различные методы оптимизации: классический метод дифференцирования, линейное, квадратичное и динамическое программирование.

С точки зрения стратегии поиска оптимума можно выделить четыре группы методов: аналитические, рекурсивные, итерационные, стохастические. Последняя классификация имеет особое значение при выборе метода решения рассматриваемых задач.

Аналитические методы находят применение при решении классических задач и задач с ограничениями в виде уравнений. Для решения задач без ограничений используют методы исследования производной функции. Путем приравнивания производной нулю отыскиваются точки экстремума. Эти точки с помощью второй производной исследуются для отыскания максимума. Этот метод широко используется при решении наиболее простых технологических задач, например при расчете режимов резания, выборе параметров режущего инструмента и др.

Рекурсивные методы относятся к методам, позволяющим определять одну переменную за одну расчетную операцию. Это — их характерная особенность [43]. Решение всей задачи осуществляется путем поочередного определения переменных. Наиболее распространено среди этих методов динамическое программирование. Этот метод можно использовать при анализе многостадийных процессов принятия решения. Например, при оптимизации маршрутных технологических процессов. Однако метод динамического программирования, как показывает опыт его использования, эффективен при небольшом числе ограничений, вводимых в математическую модель. Поэтому он пока не получил широкого распространения при решении технологических задач.

Итерационные методы объединяют наибольшую группу методов поиска оптимумов, к которым относятся способы расчета функции цели в одной или нескольких вероятностных точках для определения «лучшей» точки. Расчет выполняют до тех пор, пока не приблизятся к назначенному критерию на расстояние, меньшее определенного значения. Эти методы позволяют устанавливать только локальные оптимумы. Однако подобные методы могут быть применены в случаях, когда оптимизацию проводят в различных исходных точках. Оптимумы, определяемые этим способом, представляют собой достаточно точное решение относительно абсолютного оптимума.

Различают два итерационных метода: линейное и нелинейное программирование. Линейное программирование применяют для решения линейных задач, когда функция цели и ограничения являются линейными, а все переменные — непрерывными функциями. В основу этого программирования положено утверждение, что точка оптимума целевой

функции находится в одной из вершин многоугольника, определяющего область возможных решений. Наиболее известный итерационный метод — симплексный. Для методов нелинейного программирования характерно непосредственное отыскание оптимума. Они разделяются на две группы: методы, базирующиеся на расчетах градиента, и методы, в которых не требуется расчета градиента. К первой группе относится метод наиболее быстрого убывания, а ко второй, например, метод Фибоначчи [43], основанный на отыскании оптимума вдоль произвольно выбранного направления.

Все методы непосредственного поиска оптимума включают операции выбора направления поиска и длины шага. Отдельные методы имеют разные критерии выбора этих двух параметров. Большинство методов непосредственного отыскания оптимума не может быть применено к математическим моделям с ограничениями. Поэтому в таком случае предварительно необходимо привести математическую модель с ограничениями к модели, в которой не требуются ограничения. Для этой цели используются специальные математические методы [21, 43].

Стохастические методы или методы случайного поиска решений включают процедуры накопления и обработки информации в целях оптимизации, в которые сознательно вводится элемент случайности. Их преимущества заключаются в простоте, большой надежности, достаточно хорошем совпадении расчетных результатов с действительностью и в легкости программирования. В результате этих преимуществ методы случайного поиска стали одними из наиболее эффективных и универсальных методов оптимизации. Особенно это относится к оптимизации в многомерных пространствах. Эти методы позволяют создавать на их основе алгоритмы с самообучением. Применение этого метода имеет особое значение при оптимизации различных задач технологического проектирования процессов изготовления деталей при множестве случайных факторов, которые описать в математической модели традиционными способами не представляется возможным.

3. Обоснование и выбор критериев оптимизации

Центральным вопросом при разработке оптимального технологического процесса является обоснование цели и оценка эффективности выполнения технологических операций или ее отдельных элементов, например режимов резания. Под основной целью ТП или операции в машиностроении обычно понимается обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах. В этом случае оптимальность операции можно определить как меру ее соответствия поставленной цели: чем эффективнее операция, тем она производительнее и экономичнее. То же можно сказать и в отношении ТП в целом.

В задачах, которые встречаются в условиях оптимизации ТП, вид критериев оптимальности может быть различным, однако все они должны удовлетворять вполне определенным требованиям: обладать достаточной полнотой описания объекта; иметь определенный физический смысл; быть количественными и выражаться однозначно некоторым

числом; просто описываться в математическом виде; должны определяться с допустимой точностью.

В зависимости от вида и уровня оптимизации (расчет режимов резания, проектирование операции, ТП или оценка работы предприятия в целом) основные виды используемых критериев оптимальности можно объединить в следующие группы.

1. Экономические: минимальная себестоимость; наименьшие народнохозяйственные приведенные затраты; наименьшие приведенные хозяйственные затраты; наибольшая прибыль; рентабельность; минимальный уровень затрат на производство (минимальные затраты на электрическую и другие виды энергии, на основные и вспомогательные материалы, минимальные затраты на фонд заработной платы и др.).

2. Техничко-экономические: максимальная производительность; наименьшее штучное, основное и вспомогательное время; коэффициент полезного действия оборудования; надежность работы системы оборудования или отдельных ее элементов; станкоемкость изделия; стабильность технологического процесса обработки.

3. Технологические: точность изготовления изделия; показатели качества поверхности изделия (шероховатость, волнистость, микротвердость, остаточные напряжения и др.); физико-химические свойства изделий; стойкость инструмента.

4. Эксплуатационные: износостойкость; усталостная прочность; контактная жесткость и другие показатели долговечности изделий.

5. Прочие: психологические; эстетические; экологические.

Основные при решении задач оптимизации технологического проектирования — экономические и технико-экономические критерии оптимальности [13, 22, 24, 32]. Это связано с тем, что в основе разработки любого ТП или решения более частной задачи, например, расчета режимов резания, лежат два принципа: технический и экономический. В соответствии с первым принципом ТП должен обеспечить выполнение всех требований на изготовление изделия, а второй определяет условия, обеспечивающие минимальные затраты труда и наименьшие издержки производства. Наиболее часто в качестве экономического критерия принимают минимальную себестоимость, а в качестве технико-экономического критерия — максимальную производительность. Группы технологических и эксплуатационных критериев оптимальности используются при обеспечении требуемого качества наиболее ответственных изделий (точности, качества поверхности, физико-химических свойств и др.), а также эксплуатационных свойств отдельных деталей, определяющих надежность и долговечность машин.

Критерий максимальной производительности и наименьшего штучного времени. Одним из главных целевых назначений новой техники и внедряемых ТП является повышение производительности и облегчение условий труда. Поэтому одним из широко применяемых критериев оптимальности для решения технологических задач и определения режимов резания, в частности, является максимальная производительность. Производительностью рабочей машины называется количество обрабатываемого продукта в единицу времени. Штучная производительность на операции может быть определена величиной, обратной штучно-кальку-

ляционному времени на эту операцию:

$$П = \frac{1}{t_{шт.к}}, \text{ шт./мин.} \quad (1.1)$$

Как известно, время выполнения операции $t_{шт.к}$ состоит из $t_{шт}$ и $T_{п.з}$ на всю партию деталей N :

$$t_{шт.к} = t_{шт} + T_{п.з}/N. \quad (1.2)$$

Составными элементами штучного времени являются: основное t_o и вспомогательное время t_a , время перерывов на отдых и естественные надобности $t_{отд}$ и время обслуживания рабочего места $t_{обс}$.

Анализ элементов $t_{шт}$ показывает, что от режимов резания зависят t_o (или можно принять машинное t_m) и часть времени $t_{обс}$, затрачиваемого на смену и подналадку инструмента:

$$t_{обс} = t'_{обс} + t_{см} \quad (1.3)$$

($t'_{обс}$ не зависит от режимов резания).

Тогда формула (1.1) примет вид

$$П = \frac{1}{(t_m + t_{см}) + (t_a + t'_{обс} + t_{отд} + T_{п.з}/N)} = \frac{1}{t_{шт.р} + t_{шт.к.н}}, \quad (1.4)$$

где $t_{шт.р}$ и $t_{шт.к.н}$ — часть штучно-калькуляционного времени, соответственно зависящего и не зависящего от режимов резания.

Таким образом, штучная производительность, зависящая от режимов резания, определяется только величиной

$$t_{шт.р} = t_m + t_{см}. \quad (1.5)$$

Машинное время в общем виде запишется

$$t_m = t_p + t_x. \quad (1.6)$$

Для наиболее распространенных методов обработки металлов резанием (точение, сверление, фрезерование) величина t_p может быть найдена по формуле

$$t_p = Li/ns = Lh/nst. \quad (1.7)$$

Время смены и подналадки инструмента, приведенное к одной детали:

$$t_{см} = T_{см}t_p/T, \quad (1.8)$$

где $T_{см}$ — время, затрачиваемое на каждую смену инструмента, мин.

Рассмотрим случай, когда $t_x = 0$, а часть штучно-калькуляционного времени, зависящая от режимов резания

$$t_{шт.р} = t_p + t_p \frac{T_{см}}{T} = \frac{Lh}{nst} (1 + T_{см}/T). \quad (1.9)$$

Делаем подстановки в формулу (1.9), используя известные зависимости для скорости резания

$$v = \frac{\pi Dn}{1000}, \quad v = \frac{C_v}{T^{m_1} x_v^{p_1} y_v^{q_1}} k_v. \quad (1.10)$$

$$t_{шт.р} = \frac{\pi D L h t^x v s^y v T^m}{1000 s t C_v k_v} + \frac{\pi D L h t^x v}{1} \times \frac{s^y v T_{см} T^m}{1000 s t C_v k_v T} = C_1 T^m + C_1 T_{см} T^{m-1}, \quad (1.11)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{\pi D L h t^x v s^y v}{1000 s t C_v k_v}.$$

Величина C_1 непостоянна, так как зависит от величины подачи s и глубины резания t , которые влияют на время обработки. Поэтому для определения оптимального значения периода стойкости инструмента в зависимости (1.9) может использоваться частная производная по T :

$$\frac{\partial t_{шт.р}}{\partial T} = C_1 m T^{m-1} + C_1 T_{см} (m-1) T^{m-2}. \quad (1.12)$$

Приравнявая это выражение нулю и делая преобразования, получаем

$$T + T_{см} \left(\frac{m-1}{m} \right) = 0.$$

Тогда оптимальное значение стойкости будет

$$T_{опт} = (1/m - 1) T_{см}. \quad (1.13)$$

Из этого выражения следует, что величину v следует выбирать при фиксированных s и t так, чтобы стойкость равнялась $\left(\frac{1}{m} - 1 \right) T_{см}$.

Делаем подстановку зависимости (1.13) в ранее полученную формулу (1.9):

$$t_{шт.р} = \frac{Lh}{nst} \left(1 + \frac{T_{см}}{(1/m - 1) T_{см}} \right) = \frac{Lh}{nst} \left(1 + \frac{m}{1-m} \right) = \frac{Lh}{nst} \frac{1}{(1-m)}. \quad (1.14)$$

Таким образом, критерий оптимальности «минимальное штучное время» можно выразить в виде зависимости

$$t_{шт.мин} = \frac{1}{nst} Lh \left(\frac{1}{1-m} \right), \text{ мин}, \quad (1.15)$$

в которую управляемые переменные n , s , t представлены в явном виде и которая может достаточно просто быть использована при построении математической модели.

Подставляя выражение (1.15) в (1.4), получаем зависимость для критерия оптимальности «максимальная производительность»

$$\Pi = \frac{1}{\frac{1}{nst} Lh \left(\frac{1}{1-m} \right) + t_{шт.к.в}}, \text{ шт./мин.} \quad (1.16)$$

Критерий оптимальности «минимальное штучное время» и «наибольшая производительность труда» аналогичны по своему виду и имеют достаточно простой физический смысл. Однако эти показатели ограниченно отражают расход и экономию затрат общественного труда, т. е. представляют только затраты живого труда и не учитывают затраты овеществленного (прошлого) труда.

Критерий минимальной себестоимости. Этот показатель охватывает более широкий круг затрат общественного труда и, наряду с затратами

живого труда, учитывает затраты прошлого овеществленного в средствах производства (амортизация и ремонт оборудования, энергия, вспомогательные материалы, мерительный инструмент, помещения).

Цеховая себестоимость технологической операции без учета затрат на заготовку определяется известным выражением

$$C_{оп} = C_{з.с} + C_a + C_{рем} + C_{эн} + C_v + C_{пр} + C_{ин} + C_{п}, \quad (1.17)$$

где $C_{з.с}$ — заработная плата станочников (с начислением в фонд соцстраха); C_a — амортизационные отчисления на замену станка; $C_{рем}$, $C_{эн}$, C_v , $C_{пр}$, $C_{ин}$, $C_{п}$ — затраты на ремонт станка; силовую электроэнергию; вспомогательные материалы; амортизацию и ремонт универсальных приспособлений; амортизацию, ремонт и заточку универсальных режущих инструментов; затраты по эксплуатации помещения.

Процесс обработки заготовок резанием характеризуется двумя факторами: требуемым для обработки времени $t_{шт.к}$ и зависящей от него себестоимости. С изменением режимов обработки эти факторы изменяются, однако простой зависимости между ними не существует. Это связано с тем, что изменение каждого фактора зависит от различных влияющих параметров и в первую очередь — от процесса износа инструмента.

Изменение условий обработки в направлении повышения производительности может привести к настолько большому инструментальным расходам, что их увеличение превысит сокращение расходов, пропорциональных времени обработки. Возможна и обратная картина, когда недостаточное использование режущих способностей инструмента, снижающее инструментальные расходы, может резко повысить общие расходы (суммарную себестоимость обработки), связанные с временным фактором.

Характер влияния различных затрат на себестоимость операции показан на рис. 4. Суммарная себестоимость обработки (кривая 4) определяется тремя видами затрат: 1) затратами, не зависящими от режимов резания (это затраты на вспомогательное время и приходящаяся на заготовку часть подготовительно-заключительного времени $T_{п.з}/N$); 2) затратами, пропорциональными времени обработки, которые уменьшаются с сокращением машинного времени (к ним относятся все затраты, снижающиеся с уменьшением t_0 , за исключением затрат на инструмент); 3) затратами, пропорциональными производительности обработки (это инструментальные затраты, зависящие от скорости, подачи, глубины резания, а также от инструментального и обрабатываемого материалов).

Кривая суммарной себестоимости обработки имеет минимум, положение которого зависит от характера кривых 2 и 3. В большинстве случаев эта кривая имеет характер гиперболы, зависящей от стоимости станко-минуты и стоимости амортизации рабочего места.

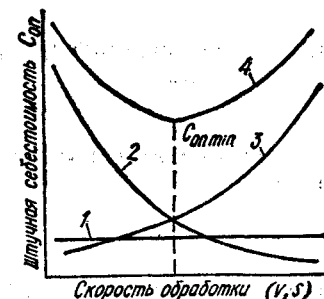


Рис. 4. Зависимость себестоимости обработки от скорости резания v или подачи s .

При определении технологической себестоимости операции может использоваться бухгалтерский метод расчета, метод определения себестоимости станко-часа и метод поэлементарного расчета. Последний наиболее точный и используется в дальнейшем.

Элементы технологической себестоимости можно условно разделить на две группы, одна из которых не зависит ($C_{рем}$, C_a), вторая зависит от режимов резания ($C_{з.с}$, C_a , $C_{эн}$, $C_{пр}$, $C_{ин}$, $C_{п}$). Вторая группа элементов себестоимости операции пропорциональна штучному времени, поэтому ее целесообразно привести к 1 мин работы оборудования ($C'_{з.с}$, C'_a , $C'_{пр}$, $C'_{ин}$, $C'_п$).

Так, затраты на заработную плату станочника можно определить по формуле $C_{з.с} = 3_{мин} k_t t_{шт.р.}$, где $3_{мин}$ — тарифная ставка 1-го разряда данной категории рабочих, коп./мин; k_t — тарифный коэффициент; $t_{шт.р.}$ — часть штучно-калькуляционного времени, зависящая от режимов резания, мин.

Делая замену в формуле, можно получить $C_{з.с} = C'_{з.с} t_{шт.р.}$.

Аналогично могут быть найдены затраты, определяющие элементы себестоимости по амортизации станка C_a , по эксплуатации приспособлений $C_{пр}$ и амортизации помещений $C_{п}$, приведенных к 1 мин работы оборудования: $C_a = C'_a t_{шт.р.}$, $C_{пр} = C'_{пр} t_{шт.р.}$, $C_{п} = C'_п t_{шт.р.}$, $C_{эн} = C'_{эн} t_{шт.р.}$.

В этом случае себестоимость операции, зависящая от режимов резания может быть определена по зависимости

$$C_{оп.пер} = C'_{з.с} t_{шт.р.} + C'_a t_{шт.р.} + C'_{пр} t_{шт.р.} + C'_{эн} t_{шт.р.} + C'_п t_{шт.р.} + C_{ин}, \quad (1.18)$$

где $C_{ин}$ — инструментальные расходы, приведенные к одной заготовке.

Введя обозначение $R = C'_{з.с} + C'_a + C'_{пр} + C'_{эн} + C'_п$, определим положение минимума кривой штучной себестоимости $C_{оп.мин}$ (рис. 4) расчетным путем, используя выражение

$$C_{оп.мин} = R t_{шт.р.} + C_{ин}. \quad (1.19)$$

Инструментальные расходы на одну деталь можно определить по формуле

$$C_{ин} = M/q, \quad (1.20)$$

где q — число деталей, обработанных за период стойкости.

При этом

$$q = T/t_p. \quad (1.21)$$

Инструментальные расходы, приведенные к одному периоду стойкости,

$$M = \frac{S_{ин}}{n_T} + C_{пер} + C_{зам.ин}, \quad (1.22)$$

где $S_{ин}$ — покупная (начальная) стоимость инструмента; $C_{пер}$ — стоимость переточки инструмента, приведенная к одному периоду стойкости; n_T — количество периодов стойкости; $C_{зам.ин}$ — стоимость замены затупившегося инструмента, приведенного к одному периоду стойкости.

После подстановки в (1.18) всех зависимостей может быть получено

$$C_{оп.пер} = R t_{шт.р.} + \frac{t_p}{T} M. \quad (1.23)$$

Учитывая, что $t_{шт.р.} = t_m + t_{см}$, в данном случае целесообразно машинное время выражать в виде

$$t_m = t_p/\lambda, \text{ где } \lambda = L/L_{p.x}. \quad (1.24)$$

После подстановок зависимостей (1.7), (1.23) и (1.24) получим

$$C_{оп.пер} = \frac{Lh}{nsl\lambda} R + \frac{Lh}{nst} R T_{см}/T + M \frac{Lh}{nst} 1/T. \quad (1.25)$$

Делая преобразования с учетом зависимостей (1.10) и вводя обозначение $C_1 = \frac{\pi D L h t_v^{-1} s_v^{-1}}{1000 C_v k_v}$, получаем

$$C_{оп.пер} = \frac{C_1 T^m}{\lambda} R + \frac{T_{см}}{T} C_1 T^m R + \frac{M}{T} C_1 T^m. \quad (1.26)$$

Если принять условие, что s и t зафиксированы, то представляется возможным определить выражение для стойкости инструмента, при котором достигается оптимальное значение скорости. Для этой цели вычислим частную производную по T для выражения (1.26)

$$\frac{\partial C_{оп.пер}}{\partial T} = \frac{C_1 R}{\lambda} m T^{m-1} + R T_{см} C_1 (m-1) T^{m-2} + M C_1 (m-1) T^{m-2} = 0,$$

$$\frac{R}{\lambda} m + R T_{см} (m-1) T^{-1} + M (m-1) T^{-1} = 0, \quad (1.27)$$

$$1/T (m-1) (R T_{см} + M) = -R/\lambda m,$$

$$T = \frac{(1-m)}{m} \frac{(R T_{см} + M)}{R} \lambda.$$

После подстановки полученной зависимости для оптимальной величины стойкости в зависимость (1.25) и некоторых преобразований получим выражение для определения критерия оптимальности «минимальная себестоимость»

$$C_{оп.мин} = \frac{Lh}{nst} \left[\frac{R}{\lambda} + \frac{1}{T} (T_{см} R + M) \right] = \frac{Lh}{nst} \frac{R}{\lambda} \left(\frac{1}{1-m} \right). \quad (1.28)$$

Критерий максимальной технологической надежности. Под надежностью понимают свойство системы, характеризующее безотказностью и долговечностью и обеспечивающее нормальное выполнение заданных функций системы [38]. При рассмотрении процессов обработки заготовок основными заданными функциями системы является выпуск изделий необходимого количества и заданного качества.

Один из важных показателей процесса изготовления изделий — технологическая надежность, которая связана с потерей качества обработки (точности, шероховатости, физико-химических параметров поверхностного слоя и др.), что приводит к необходимости остановки станка, хотя все его рабочие элементы способны выполнять заданный цикл работы. Особое значение этот критерий приобретает в условиях

автоматизированного производства, где отклонение от заданных требований, связанное чаще всего с выходом из строя режущего инструмента, приводит к прерыванию технологического процесса.

Нарушение стабильности свойств изделий обычно происходит вследствие износа режущего инструмента, колебаний температуры и тепловых деформаций, изменения припусков на обработку и твердости заготовки, жесткости элементов системы СПИД и многих факторов. Такое состояние технологической системы называют отказом параметра [38].

Технологическая надежность характеризуется процессами средней скорости. Их длительность измеряется обычно в минутах или часах. Причины, вызывающие нестабильность работы механизмов, носят случайный и закономерный характер. Одной из главных причин нестабильности процессов обработки является изменение режимов резания, которое приводит к увеличению числа отказов из-за износа инструмента, изменения количества тепла в зоне резания, вибраций и т. д.

Надежность работы системы принято характеризовать параметром потока отказов ω — условной плотности вероятности возникновения отказа восстанавливаемых изделий для рассматриваемого момента времени (ГОСТ 13377—75), т. е. среднее число отказов в единицу времени после момента t'

$$\omega(t') = \frac{\partial M(t')}{\partial t'}, \quad (1.29)$$

где $M(t')$ — математическое ожидание числа отказов за время t' .

Среднее число отказов M за время t' для сложного потока равно сумме этих характеристик для каждого из простых потоков, т. е.

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_n. \quad (1.30)$$

Дифференцируя равенство (1.29), получаем

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i. \quad (1.31)$$

Таким образом, параметр сложного потока отказов системы равен сумме параметров потоков его составляющих.

Величина, обратная параметру потока отказов для восстанавливаемых систем многократного действия, к которым относятся металлорежущие станки, автоматические линии и другие, представляет собой среднее время безотказной работы машины между двумя ее отказами или, как принято называть, среднюю наработку на отказ

$$m_{cp} = 1/\omega. \quad (1.32)$$

Величина параметра потока отказов является вероятностной характеристикой и определяется на основе некоторого количества наблюдений в течение периода, для которого величину ω считают постоянной ($\omega = \text{const}$). При этом функция надежности работы станка имеет экспоненциальный характер и определяется вероятностью безотказной работы по формуле

$$P(t') = e^{-\omega(t')}. \quad (1.33)$$

Среднее количество рабочих циклов между двумя отказами

$$r_n = m_{cp}/T_u. \quad (1.34)$$

Определение оптимальных режимов резания по критерию максимальной технологической надежности особенно важно при разработке технологических процессов изготовления изделий на автоматических линиях, где отдельные отказы приводят к значительным потерям штучного времени обработки.

Рассмотрим период эксплуатации автоматической линии, в течение которого зарегистрировано p отказов и p простоев. Если средняя длительность единичного простоя равна Θ_{cp} , то суммарное время собственных простоев автоматической линии за данный период

$$\Sigma \Theta_c = p \Theta_{cp}. \quad (1.35)$$

За этот же период было выполнено изделий

$$z = p r_n. \quad (1.36)$$

Простои, отнесенные к одному рабочему циклу, являются внецикловыми потерями и равны

$$\Sigma t_n = \frac{\Sigma \Theta_c}{z} = \frac{p \Theta_{cp}}{p r_n} = \frac{\Theta_{cp}}{r_n} = \omega \Theta_{cp}. \quad (1.37)$$

На основании полученных данных представляется возможным определить зависимость штучной производительности автоматической линии или отдельного станка в зависимости от технологической надежности

$$\Pi = \frac{1}{T_u + \Sigma t_n} = \frac{1}{t_p + t_x + \Sigma t_n}. \quad (1.38)$$

После подстановки получим

$$\Pi = \frac{1}{t_p + t_x + \omega \Theta_{cp}}. \quad (1.39)$$

Экспериментальные исследования показали, что для конкретных условий обработки можно найти зависимость параметра потока отказов от режимов резания в виде

$$\omega_i = a_i v^{x_{1i}} s^{x_{2i}} t^{x_{3i}}. \quad (1.40)$$

После подстановки в (1.39) значения времени t_p и зависимости (1.40) получим

$$\Pi = \frac{1}{\frac{Lh\pi D}{1000vst} + t_x + a_i v^{x_{1i}} s^{x_{2i}} t^{x_{3i}} \Theta_{cp}}. \quad (1.41)$$

Величина штучной производительности операции будет наибольшей при минимальном значении знаменателя, который обозначим

$$P = C_1 \frac{1}{vst} + t_x + C_2 v^{x_{1i}} s^{x_{2i}} t^{x_{3i}}, \quad (1.42)$$

где $C_1 = \frac{Lh\pi D}{1000}$; $C_2 = a_i \Theta_{cp}$.

В целях упрощения при решении рассматриваемой задачи будем считать, что глубина резания выбирается заранее и может считаться постоянной. Значение подачи может приниматься с учетом ряда технических условий функционирования и в целях упрощения может считаться фиксированным. Тогда для определения оптимальной скорости обработки, обеспечивающей наибольшую величину штучной производительности P , продифференцируем выражение (1.42) и приравняем его нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial v} &= -(C_1/s) v^{-2} + (C_2 s^{x_{2i}} t^{x_{3i}}) x_{1i} v^{x_{1i}-1} = 0, \\ v^{x_{1i}+1} &= \frac{C_1}{x_{1i} C_2 s^{x_{2i}} t^{x_{3i}}}, \\ v_{\text{опт}} &= \left(\frac{C_1}{x_{1i} C_2} \right)^{\frac{1}{x_{1i}+1}} \frac{1}{s^{1+x_{2i}} t^{1+x_{3i}}}. \end{aligned} \quad (1.43)$$

Критерий наименьших приведенных народнохозяйственных затрат. Важным показателем работы предприятия является величина производственных фондов и новых капитальных вложений, при которых достигается снижение себестоимости изделий. Показатель себестоимости включает в виде амортизации элемент затрат, отражающий величину стоимости средств, перенесенных на продукцию. Однако, как отмечается в работе [12], он не отражает полностью все затраты общественного труда, обусловленные использованием фондов и капитальных вложений.

Более высокому уровню общественной производительности труда соответствует при максимуме результатов не минимум текущих затрат, выраженных себестоимостью работ, а минимум приведенных затрат, полнее отражающих использование фондов производства [12]. Применительно к расчету оптимальных режимов резания некоторой i -й операции показатель народнохозяйственных затрат может быть определен по формуле

$$C_{\text{ит}} = C_{\text{он}} + \epsilon_n K_i, \text{ руб./дет. опер.}, \quad (1.44)$$

где K_i — удельные капитальные вложения, обусловленные выполнением i -й операции; ϵ_n — норма народнохозяйственной эффективности дополнительных капитальных вложений ($\epsilon = 0,12$); $C_{\text{он}}$ — полная себестоимость i -й операции.

Особенность показателя приведенных затрат состоит в том, что он объединяет два наиболее важных показателя: себестоимость и капиталоемкость продукции. Удельные капитальные вложения при некотором упрощении могут быть представлены в следующем виде [12]:

$$K_i = K_{ci} + K_{si} + K_{c,zi} + K_{s,zi},$$

где K_{ci} — удельные капиталовложения в станок, приходящиеся на i -ю операцию (включая энергетическое и подъемно-транспортное оборудование, обслуживающее этот станок); K_{si} — то же для заточного станка; $K_{c,zi}$ — удельные капиталовложения в здание, где установлен

станок, приходящиеся на i -ю операцию; $K_{s,zi}$ — то же для заточного станка;

$$\begin{aligned} K_{ci} &= \frac{100 K_c}{60 F_d k_c} \frac{t_{\text{шт.кл}}}{k_{vi}}; \\ K_{c,zi} &= \frac{100 K_{c,z} t_{\text{пер}} n_{\text{пер}}}{60 F_{d,z} k_{c,z} k_{v,z} (n_{\text{пер}} + 1) N}; \\ K_{s,zi} &= \frac{100 S_c k_{fz} h_{\text{ц},z} t_{\text{пер}} n_{\text{пер}}}{60 F_{d,z} k_{c,z} k_{v,z} (n_{\text{пер}} + 1) N}; \\ K_{si} &= \frac{100 S_c k_f h_{\text{ц}} t_{\text{шт.кл}}}{60 F_d k_c k_v} \end{aligned}$$

(K_c , $K_{c,z}$ — балансовая стоимость технологического оборудования (станка) станочника и заточника, занятых выполнением i -й операции в руб/ед; k_c , $k_{c,z}$ — коэффициенты загрузки станка по времени работы станочника и заточника; F_d , $F_{d,z}$ — действительный годовой фонд времени станка станочника и заточника в ч/г; $t_{\text{пер}}$ — время заточки (переточки) режущего инструмента, применяемого на i -й операции в мин/ед; k_v , $k_{v,z}$ — коэффициент выполнения норм станочником и заточником; q — количество деталей, обрабатываемых за период стойкости; S_c , $S_{c,z}$ — производственная площадь в плане, занимаемая основным и заточным станками в м²/ед; k_f , k_{fz} — коэффициент, учитывающий дополнительную производственную площадь для основного и заточного станков; h_c , h_z — высота цеха, где установлены основной и заточный станки, м; ц_c , $\text{ц}_{z,z}$ — стоимость 1 м³ производственного здания, где находится основной и заточный станки в руб/м³).

После подстановки в зависимость для себестоимости операции по формуле (1.44) получим

$$\begin{aligned} C_{\text{ит}} &= t_{\text{шт.кл}} R + C_{\text{он}} + \frac{\epsilon_n 100 (K_c + S_c k_f h_{\text{ц}} \text{ц}_c)}{60 F_d k_c k_{vi}} t_{\text{шт.кл}} + \\ &+ \frac{\epsilon_n 100 (K_{c,z} + S_{c,z} k_{fz} h_{\text{ц},z} \text{ц}_{z,z}) t_{\text{пер}} n_{\text{пер}}}{60 F_{d,z} k_{c,z} k_{v,z} (n_{\text{пер}} + 1) q}. \end{aligned} \quad (1.45)$$

Введем обозначения для величины удельных капиталовложений в средства, закрепленные за рабочим местом станочника, приходящихся на одну минуту его работы:

$$K_{\text{ст},i} = \frac{100 (K_c + S_c k_f h_{\text{ц}} \text{ц}_c)}{60 F_d k_c k_{vi}},$$

и для величины удельных капиталовложений в средства, закрепленные за рабочим местом заточника, приходящихся на период стойкости инструмента между очередными переточками:

$$K_{\text{п},z} = \frac{100 (K_{c,z} + S_{c,z} k_{fz} h_{\text{ц},z} \text{ц}_{z,z}) t_{\text{пер}} n_{\text{пер}}}{60 F_{d,z} k_{c,z} k_{v,z} (n_{\text{пер}} + 1)}.$$

Тогда формула (1.45) примет вид $C_{\text{ит}} = t_{\text{шт.кл}} R + C_{\text{он}} + \epsilon_n K_{\text{ст},i} t_{\text{шт.кл}} +$

+ $\varepsilon_n K_{п.з} 1/q$. Учитывая ранее приведенное обозначение $C_{инт} = M/q$, получаем

$$C_{инт} = (R + \varepsilon_n K'_{ст.и}) t_{шт.ки} + \frac{M + \varepsilon_n K_{п.з}}{q}. \quad (1.46)$$

Обозначим $A = R + \varepsilon_n K'_{ст.и}$, $B = M + \varepsilon_n K_{п.з}$. Заменим в формуле (1.46) $t_{шт.ки}$ его составляющими. Тогда

$$C_{инт} = At_{ми} + At_{см} + At_{шт.к.н} + B 1/q. \quad (1.47)$$

Составляющую $At_{шт.к.н}$, не зависящую от режимов резания, из расчетов опускаем

$$C_{интпер} = At_{ми} + AT_{см}/T_p + Bt_p/q. \quad (1.48)$$

При соответствующей подстановке формул и введении обозначения (1.7) получаем

$$C_{интпер} = \frac{Lh}{nsl\lambda} A + \frac{T_{см}}{T} \frac{Lh}{nst} A + \frac{1}{T} B \frac{Lh}{nst}. \quad (1.49)$$

Анализ полученной формулы (1.49) и зависимости, ранее установленной для критерия минимальной себестоимости (1.25), показывает, что они по своей структуре весьма схожи, что позволяет предположить, что функциональная зависимость $C_{интпер} = f(v, s, t)$ будет также иметь форму экстремального вида. После преобразования (1.49) может быть получено следующее выражение

$$C_{интпер} = \frac{Lh}{nsl\lambda} \left[A + \frac{mA}{(1-m)(T_{см} + B)} (A + B) \right]. \quad (1.50)$$

4. Выбор технических ограничений

Оптимизация ТП зависит также от правильного выбора технических ограничений, которые определяют область существования оптимальных решений. Следует иметь в виду, что не может быть и речи о каком-либо оптимальном ТП в общем смысле, поэтому поиск оптимального ТП должен быть ограничен определенными производственными условиями. Чем точнее будут сформулированы ограничения, вытекающие из производственных условий, тем меньше будет вариантов процесса, рассматриваемых в качестве основы для выбора оптимального решения. В общем виде все параметры (величины, характеризующие элементы процесса обработки), определяющие состояние объекта в произвольный момент времени, могут быть представлены в виде следующих векторов.

1. Вектор входных и возмущающих параметров $V = (V_1, V_2, \dots, V_p)$. К входным параметрам относятся неуправляемые переменные, связанные с объектом обработки и состоянием оборудования. Возмущающие параметры связаны с проявлением случайных величин, характеризующих неконтролируемые характеристики заготовки или внешней среды.

2. Вектор технологических параметров $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$. Компоненты этого вектора являются управляемыми переменными, позво-

ляющими выбирать необходимые условия обработки. Обязательное условие этих параметров — возможность их управления и контроля.

3. Вектор выходных параметров $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$. Эти параметры, ранее названные производными переменными, определяют основные характеристики качества продукции и технико-экономические показатели, связанные с рассматриваемым процессом.

Значения каждого из рассмотренных параметров находятся в определенном интервале, задаваемом физической природой данного параметра или требованиями к ТП, поэтому группа ограничений, связанная с диапазоном варьирования параметров, может быть представлена в виде следующей совокупности неравенств:

$$V_{k \min} \leq V_k \leq V_{k \max}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, p;$$

$$X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

$$Y_{j \min} \leq Y_j \leq Y_{j \max}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m.$$

Решение задач технологического проектирования связано с учетом большого числа факторов — причин, определяющих выполнение какого-либо процесса обработки. Причем в каждой задаче требуется учитывать определенный вид факторов, в наибольшей степени влияющий на принимаемые решения.

Анализ процессов механической обработки показывает, что в большинстве случаев требуется учитывать пять основных групп факторов.

Первая группа характеризует объект обработки (заготовку): вид материала, твердость и другие механические свойства, способ получения заготовки, ее размеры, массу, точность размеров, шероховатость поверхности.

Вторая — основные параметры орудий труда (станок, приспособление, инструмент): вид, кинематику и динамику станка, жесткость, прочность и точность отдельных элементов и системы в целом.

Третья — выбираемые параметры инструмента для исследуемого процесса обработки: физико-механические свойства материала режущей части инструмента, геометрические параметры его заточки, размеры и точность, степень изношенности, шероховатость поверхности, зернистость и вид связки, стойкость инструмента.

Четвертая — процесс механической обработки: время и глубину обработки, скорость, подачу, число проходов, усилие резания, давление, вид и способ подачи технологических сред.

Пятая — технико-экономические показатели: расход инструмента, износ инструмента и станка, производительность и себестоимость обработки, качество изделия (точность, шероховатость поверхности и физико-химические свойства, вид и форму детали, вид производства).

Вектор входных параметров V объединяет первую и вторую группы факторов. Вектор технологических параметров X формируется из третьей и четвертой групп факторов, а вектор выходных параметров Y включает пятую группу факторов.

Вектор необходимого количества параметров обработки связан с требуемой точностью описания математической моделью процесса обработки и структурным уровнем отыскиваемых проектных решений. Так,

при проектировании маршрута обработки в качестве технических ограничений учитываются вид и материал заготовки, вид и форма детали, ее точность, шероховатость и физико-химические свойства, вид станка, традиционная форма обработки на заводе, серийность и др.

Наиболее полно в технологии машиностроения описывается математическая модель процесса обработки при выборе оптимальных режимов резания, точность получения которых во многом зависит от количества и достоверности описания технических ограничений.

Недостатком используемых в качестве технических ограничений стойкостных и силовых зависимостей для расчета режимов резания является недостаточная высокая точность. В существующей справочной литературе по резанию металлов отсутствуют данные по диапазонам, в которых эти зависимости справедливы. Хотя известно, например, что зависимости для определения стойкости инструмента и усилия резания применимы в довольно узком интервале скоростей резания. Поэтому в настоящее время необходимо проводить исследования и обобщать имеющийся материал по созданию точных функциональных зависимостей, отражающий во всей полноте процесс резания металлов. Причем в основу этих работ должны быть положены результаты современных теоретических и экспериментальных исследований по изучению тепловых явлений и напряженного состояния в зоне резания. Так, в результате исследований в последние годы установлен ряд новых положений, которые необходимо учитывать при определении вида технических ограничений [27].

Основные из них следующие.

1. Зависимость интенсивности износа инструмента от скорости резания для различных обрабатываемых материалов, различных операций механической обработки и условий резания носит немонотонный характер с одним или двумя минимумами.

2. Чем ниже обрабатываемость металла резанием, тем более ярко выражен экстремальный характер зависимости интенсивности износа от скорости резания и тем большее значение приобретает определение оптимальных скоростей резания, характеризующихся наименьшей интенсивностью износа инструмента и наибольшей стабильностью процесса резания.

3. Назначение режимов резания без учета действительного характера стойкостных зависимостей приводит к значительным потерям производительности обработки, размерной стойкости инструмента и повышению себестоимости выполнения операции.

4. Наличие взаимосвязи минимальной интенсивности износа инструмента и постоянства оптимальной температуры резания для различных видов обработки металлов резанием лезвийным инструментом.

Выполняемые исследования закономерностей протекания различных видов технологических процессов механической обработки должны быть направлены на установление количественных зависимостей, позволяющих обоснованно выбрать технические ограничения при создании математических моделей оптимизации решения технологических задач.

5. Виды оптимизации процессов механической обработки

Задача оптимизации ТП является комплексной, требующей проведения анализа и выбора технологических решений на различных уровнях проектирования и обеспечивающей минимальные значения приведенных затрат с одновременным соблюдением ряда технических ограничений.

При комплексном подходе следует различать два вида оптимизации ТП, выполняемых на различных этапах технологического проектирования по ГОСТ 14.301—83 (табл. 1): 1) структурная оптимизация — выбор оптимального технологического маршрута, операции, перехода, вида и методов изготовления заготовки, способов базирования, оборудования, приспособлений, инструмента и т. д.; 2) параметрическая оптимизация — выбор оптимальных технологических параметров — допусков на межоперационные размеры, припусков, режимов резания, геометрических размеров режущего инструмента и др.

Такой подход к оптимизации значительно усложняет решение задачи. Так, при параметрической оптимизации необходимо иметь решение о выборе структуры соответствующего уровня. В то же время структурная оптимизация требует знания значений параметров, входящих в соответствующую структуру.

Это противоречие может быть устранено при построении алгоритмов оптимизации ТП за несколько итераций.

С точки зрения структурного описания уровней технологических процессов различают этапы проектирования маршрута, операции и переходов. Здесь возможны два подхода.

Первый содержит следующую последовательность этапов: **принципиальная схема ТП → маршрут → операция** и заключается в последовательном синтезе и анализе сначала вариантов принципиальных схем, а затем вариантов маршрута и операции. На каждом последующем этапе решение предыдущего этапа детализируется (как правило, в нескольких вариантах) [26].

Второй подход основан на анализе отдельных поверхно-

Т а б л и ц а 1. Виды оптимизации на различных этапах проектирования ТП

Этап проектирования ТП	Вид оптимизации	
	структурная	параметрическая
1. Анализ исходных данных для разработки ТП	—	—
2. Выбор действующего типового, группового ТП или поиск аналогов единичного процесса	+	—
3. Выбор исходной заготовки и методов ее изготовления	+	—
4. Выбор технологических баз	+	—
5. Составление технологического маршрута обработки	+	—
6. Разработка технологических операций	+	+
7. Нормирование ТП	—	+
8. Определение требований техники безопасности	—	—
9. Расчет экономической эффективности ТП	+	+
10. Оформление ТП	—	—

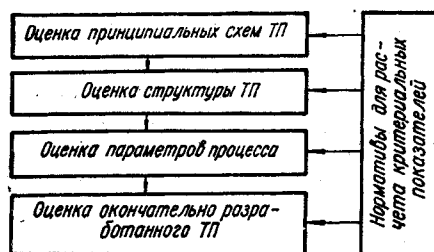


Рис. 5. Модель многоуровневой оптимизации ТП.

этих критериев показывает, что с позиций проблемы согласования оптимальных решений разных уровней предпочтительнее разработка процесса, начиная с наиболее общих вопросов в направлении их детализации, что свойственно первому подходу.

Исследование проблемы оценки и выбора проектных решений на промежуточных этапах проектирования свидетельствует о предпочтительности членения процесса проектирования на три этапа: разработка принципиальной схемы ТП, проектирование структуры в рамках принятой принципиальной схемы, определение параметров решения известной структуры [26]. Главной особенностью такого подхода является возможность использования на различных этапах разных по виду критериев оптимальности и технических ограничений.

Принципиальная схема модели многоуровневой оптимизации показана на рис. 5.

Выбор принципиальной схемы ТП основан на анализе наиболее рациональных маршрутов обработки каждой поверхности. В свою очередь, каждый из этих маршрутов обуславливается методами формообразования, включенными в него. Оценка влияния отдельных методов на этом этапе проектирования на окончательные показатели эффективности ТП затруднена и может быть установлена в самом общем виде. В работе [26] предложено использовать оценку методов формообразования по порядковому критерию теоретической производительности, по которой понимается скорость генерации поверхностей определенным методом. В соответствии с этой классификацией все методы разбиты на классы и подклассы по теоретической производительности (количеству и виду движений) и проранжированы.

При таком подходе выбор маршрута обработки отдельных поверхностей определяется по минимуму суммы рангов всех методов, входящих в анализируемые маршруты. Используемый показатель теоретической производительности формообразования того или иного метода в определенной степени отражает затраты по минимуму станкочемкости. В то же время следует отметить, что более точная оценка на этом этапе невозможна, так как для расчета величин затрат необходимо решение о привязке к вполне конкретным затратам по технологическому оснащению ТП и его нормированию, которые проводятся на более поздних этапах проектирования.

Выбор структуры ТП механической обработки сопряжен с затруд-

стей и проектировании переходов их обработки. Далее переходы упорядочиваются в операции, а операции упорядочиваются в маршрут обработки детали.

Второй подход содержит этапы: **переход → операция → маршрут**.

Для каждого этапа в рассмотренных подходах характерно применение определенных критериев выбора решения. Анализ

нениями: во-первых, получается слишком большое число переменных, с которыми нужно оперировать одновременно; во-вторых, переменные на разных уровнях имеют слишком неравноценное влияние на критерий эффективности. Чтобы преодолеть указанные затруднения в работе [53], предлагается многоуровневую задачу разделить по возможности на большее число двухуровневых задач, которые лучше рассматривать последовательно, сверху вниз (от общих к частным).

При структурной оптимизации ТП целесообразно выделять его организационные элементарные части — операции, позиции, переходы. При этом имеет место три уровня структурной оптимизации (рис. 6). С первым связан выбор оборудования, со вторым — выбор приспособлений, с третьим — инструментов. В данном случае не выделяется структурный уровень проходов, поскольку глубина резания, которая обуславливает число проходов в переходе, будет определяться на последующих уровнях оптимизации с использованием своих моделей.

Процедура структурной оптимизации ТП состоит из последовательного решения на каждом уровне по выбору возможных операций, затем оптимального числа и вида позиций для каждой операции и оптимального числа и вида переходов для каждой позиции. Выбор оптимальных решений на этих уровнях выполняется на основе своих критериев эффективности [26].

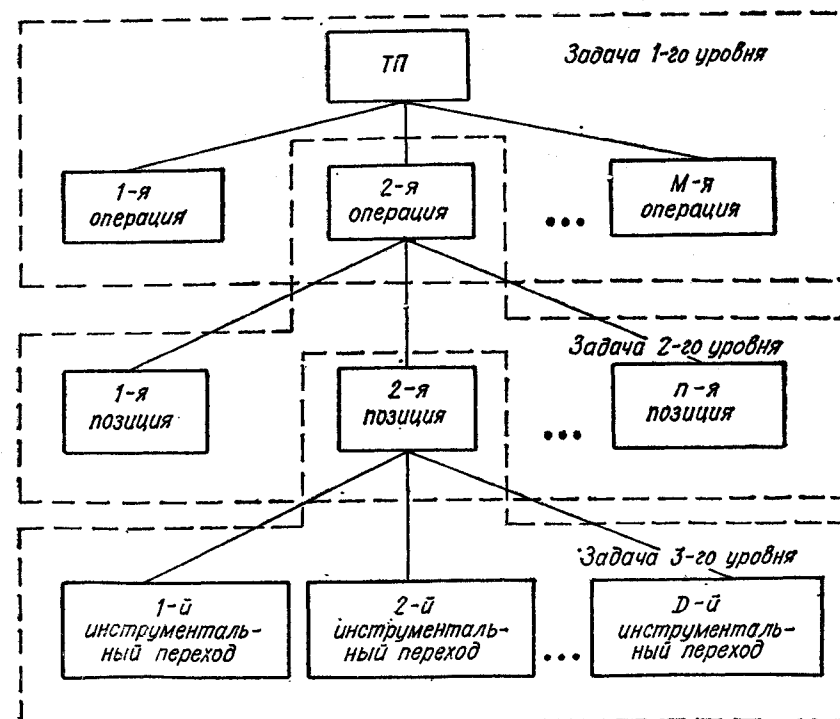


Рис. 6. Выделение задач структурной оптимизации технологических процессов.

Выбор оптимальных параметров обработки производится для известных структур операций, когда выбраны оборудование, инструменты, приспособления. Он заключается в общем случае в выборе таких взаимосвязанных параметров, как межпереходные припуски и допуски, скорость резания, подача, число проходов. Их различные сочетания дают большое число вариантов обработки, неравнозначных по совокупным затратам общественного труда. В частных случаях какие-то параметры могут быть заданы. Например, расчет припусков и допусков может вестись независимо от оптимизации остальных параметров и быть исходным пунктом этой оптимизации.

Выполняемые работы по оптимизации режимов резания при механической обработке следует рассматривать еще в двух аспектах. Во-первых, необходимо учитывать, что в процессе резания возникают возмущающие воздействия, связанные с изменением припуска, свойств материала заготовки, геометрического и физико-механического состояния режущего инструмента. Если создать условия, компенсирующие возмущающие воздействия за счет введения адаптивного или другого вида управления, обязательным требованием которого является наличие обратной связи, то возможно обеспечить непрерывную или внутреннюю оптимизацию. В основу такого подхода должны быть положены динамические модели процесса резания. Во-вторых, рассматриваемые работы могут представляться как «внешняя оптимизация» [24], которая не учитывает изменяющихся во времени возмущающих воздействий и определяет параметры режимов резания, обеспечивающих достижения некоторой цели. В основу такой оптимизации положены статические модели. Организационно второй вид оптимизации проводится на ранних этапах ТПП, и его результаты используются в дальнейшем при внутренней оптимизации.

Выбор оптимального варианта технологического процесса в целом связан с окончательной оценкой полностью разработанного проекта. В основе его оценки должны лежать показатели и ограничения в явном или неявном виде, характеризующие все параметры предыдущих уровней оптимизации. В роли такого обобщающего показателя экономической эффективности обычно используется показатель приведенных народнохозяйственных затрат на производство единицы продукции данным ТП [12, 26]. Расчет обобщающего показателя необходим по нескольким причинам: 1) для выбора единственного, самого эффективного варианта, если предыдущие уровни оценки показали равноценность решения; 2) для уточнения и проверки отдельных элементов затрат, определявшихся ранее приближенно; 3) для определения абсолютных величин приведенных затрат, используемых в дальнейшем для экономического обоснования планов новой техники.

Разработка оптимальных ТП по описанной схеме представляет собой итерационный многоуровневый процесс последовательной детализации и оптимизации, содержанием которого является многократное повторение процедур анализа — синтеза — оценки (рис. 7). Анализ исходных данных, условий и ограничений позволяет установить границы области возможных технологических решений. С помощью процедур синтеза получают технологические решения, допустимые по совокупности

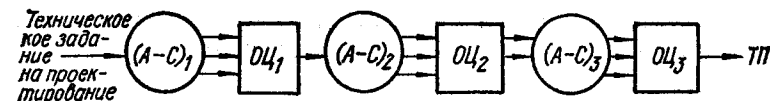


Рис. 7. Общая схема многоуровневого процесса проектирования ТП: (А — С)₁ — анализ — синтез допустимых вариантов принципиальных схем ТП; ОЦ₁ — оценка и отбор лучших вариантов принципиальных схем ТП; (А — С)₂ — анализ — синтез вариантов структур ТП; ОЦ₂ — оценка и отбор лучших вариантов структур ТП; (А — С)₃ — анализ — синтез параметров ТП; ОЦ₃ — оценка и отбор лучших вариантов параметров ТП.

граничных условий. Лучшие по некоторому критерию решения отбираются процедурами оценки, причем на каждом уровне, как отмечалось выше, должны быть свои критерии оптимальности.

При решении задач оптимизации процессов механической обработки часто возникает необходимость учитывать по несколько противоречащих целей. Принимая решения, улучшающие оценки одного критерия, например минимальной себестоимости операции, мы ухудшаем одновременно оценки по другим критериям, например наибольшей производительности и др. В таких случаях возникает задача оценки и сравнения различных проектных решений при так называемом векторном критерии эффективности [7]. С этой целью используют обобщенные критерии, которые являются скалярной функцией частных критериев и учитывают степень достижения всех целей в совокупности, отражая их относительную значимость исходя из общих целей.

Поскольку каждый из частных критериев фактически функция управляемых переменных, то и обобщенный критерий, в свою очередь, можно рассматривать как некоторую функцию управляемых переменных. Эту функцию обычно называют целевой функцией. При этом подходе (называемом свертыванием векторного критерия) задача сравнения решений по векторному критерию фактически заменяется задачей выбора способа свертывания и определения значения коэффициентов, участвующих в этом свертывании. Существуют следующие способы свертывания [7].

Аддитивный критерий. В этом случае в качестве обобщенного критерия берется «взвешенная» сумма частных критериев $K_j(x)$

$$F(x) = \sum_{j=1}^k \alpha_j K_j(x), \quad (1.51)$$

где x — управляемые переменные; α_j — неотрицательные коэффициенты, значения которых выбирают исходя из степени важности отдельных целей. Определяются на основании ранее решенных аналогичных задач или методом проб. В последнем случае «весовые» коэффициенты подбираются при анализе результатов, получаемых при различных значениях этих коэффициентов.

Мультипликативный критерий. В отличие от предыдущего в данном случае в качестве обобщенного критерия берется «взвешенное» произведение частных критериев

$$F(x) = \prod_{j=1}^k (K_j(x))^{\alpha_j}. \quad (1.52)$$

Конъюнктивный критерий оценивает каждое решение с точки зрения цели, степень достижения которой (с учетом «весового» коэффициента) в данном случае наименьшая

$$F(x) = \max_{1 \leq j \leq k} \alpha_j K_j(x). \quad (1.53)$$

Дизъюнктивный критерий противоположен предыдущему и оценивает решения с точки зрения цели, степень достижения которой (также с учетом «весового» коэффициента) в данном случае максимальная

$$F(x) = \min_{1 \leq j \leq k} \alpha_j K_j(x). \quad (1.54)$$

Выделение наиболее важного критерия. В этом случае из набора частных критериев эффективности выделяется один, который принимается за обобщенный. Остальные критерии набора рассматриваются как критерии допустимости.

Метод последовательных уступок предполагает, что все количественные цели и соответствующие им критерии можно упорядочить (и перенумеровать) в порядке убывания их значимости.

Свертка критериев оптимизации ТП находит применение в так называемом комплексном подходе, в котором, наряду с основными показателями эффективности — себестоимостью и производительностью, учитывается ряд дополнительных показателей, которые в определенных условиях могут стать основными. В работе [49] предлагается учитывать дополнительно следующие показатели.

Коэффициент эффективности использования времени $K_{э.в.}$, представляющий отношение основного времени, необходимого для выполнения данной операции, к вспомогательному

$$K_{э.в.} = t_o/t_v. \quad (1.55)$$

Коэффициент стабильности ТП $K_{с.п.}$, определяющий способность обеспечить выход годных изделий в течение определенного периода времени,

$$K_{с.п.} = h_{\min}/h_{\text{ср}}, \quad (1.56)$$

где $h_{\min}$ — минимальное значение процента выхода годных изделий за определенное календарное время; $h_{\text{ср}}$ — среднее значение процента выхода годных изделий за тот же период времени.

Коэффициент автоматизации (механизации) ТП

$$K_{\text{ам}} = 1 - T_p/T_{\text{оц}}. \quad (1.57)$$

Здесь T_p — время участия рабочего (оператора) в цикле; $T_{\text{оц}}$ — длительность операционного цикла.

Коэффициент оснащенности технологического процесса $K_{\text{от}}$ оборудованием и оснасткой

$$K_{\text{осн}} = \sum_{i=1}^m C_i/N_i \quad (1.58)$$

($\sum_{i=1}^m C_i$ — число наименований стандартных и унифицированных видов

оборудования и технологической оснастки; N_i — общее число наименований оборудования и оснастки).

Коэффициент готовности оборудования $K_{г.о.}$ и технологической оснастки к выпуску данной продукции

$$K_{г.о.} = O_{\phi} S' / O_{\tau} S', \quad (1.59)$$

где O_{ϕ} — фактическое число единиц оборудования и технологической оснастки; O_{τ} — требуемое число единиц оборудования и технологической оснастки; S' — стоимость единицы соответствующего оборудования и оснастки.

Коэффициент использования материалов

$$K_{и.м} = \frac{\sum_{i=1}^k M_{gi} S_i}{\sum_{i=1}^k M_{pi} S_i}. \quad (1.60)$$

Здесь M_{gi} — количество i -го материала в готовом изделии, кг или шт; M_{pi} — количество i -го материала, расходуемого в процессе производства на операции, т. е. норма расхода с учетом запуска, кг или шт; S_i — стоимость единицы измерения i -го материала, руб; $i = 1, 2, \dots, k$ — число наименований материалов.

Коэффициент использования паспортной производительности оборудования $K_{п.о.}$. Для механизированных и автоматизированных работ

$$K_{п.о.} = k_{т.и} \eta_i, \quad (1.61)$$

а для ручных работ

$$K_{п.о.} = \frac{F_{\text{эф}} \eta_i}{0,95 F_{\text{общ}}}, \quad (1.62)$$

где $k_{т.и}$ — коэффициент технического использования оборудования на i -й операции; η_i — коэффициент выхода годных деталей на i -й операции; $F_{\text{эф}}$ — эффективный фонд времени (на одного рабочего в одну смену), ч; $F_{\text{общ}}$ — общий фонд рабочего времени за смену, ч.

Коэффициент трудоемкости подготовки производства

$$K_{т.п} = 1/t_k + 1/t_t \quad (1.63)$$

(t_k и t_t — трудоемкость конструкторской и технологической подготовки соответственно).

Коэффициент стандартизации операций, представляющих собой отношение количества стандартных C_i и унифицированных Y_i операций к общему числу операций N_i :

$$K_{\text{ст}} = \frac{C_i + Y_i}{C_i + Y_i + O_i} = 1 - \frac{Q_i}{N_i}, \quad (1.64)$$

где Q_i — количество оригинальных операций.

Стандартными называются операции, выполнение которых регламентируется документами, входящими в государственные или отрасле-

вые стандарты, а унифицированные — типовыми заводскими документами.

Для вычисления комплексного показателя технического уровня ТП применяют, как отмечалось ранее, аддитивную функцию вида

$$F_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_i \alpha_j, \quad (1.65)$$

где K_i — частный (относительный показатель) технического уровня; α_j — весовой уровень j -го показателя; n — число частных показателей ТП; m — число операций в технологическом процессе.

При определении комплексного показателя принимают

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1. \quad (1.66)$$

Выбор оптимального варианта проводится по максимальной величине комплексного показателя P_k , который относится к нескольким свойствам технологического процесса.

Средневзвешенное значение комплексного показателя получается делением F_k на число частных показателей n ТП.

Важным является определение значимости показателей (коэффициентов весомости). Показатели, имеющие размерность, следует преобразовать в относительные значения. Формализация частных показателей дает возможность суммировать неоднородные величины. При этом отдельные показатели должны быть приведены к такому виду, чтобы лучшему показателю соответствовал больший коэффициент. Весовой уровень каждого показателя устанавливается экспертным путем. Значение коэффициентов зависит от их важности.

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Особенности структурной оптимизации

Большинство работ в области оптимизации ТП затрагивают оптимизацию параметров отдельных элементов. При этом считается, что структура ТП, связи и функции отдельных элементов, входящие в них, выбраны заранее. Выбор структуры ТП характеризуется низкой формализацией при достаточно высокой многовариантности решений (комбинации элементов по составу, последовательности, связям и функциям). Недостаточное внимание к структурной оптимизации ТП связано с тем, что творческие способности человека при решении этих задач превосходили возможности ЭВМ. В то же время значение правильного выбора структуры во многом превосходит эффект от параметрической оптимизации. Действительно, при ошибочном выборе структуры маршрута обработки или отдельной операции самые совершенные методы оптимизации режимов резания не могут компенсировать потери по стоимости и производительности обработки.

В наиболее общем виде задачу структурной оптимизации можно сформулировать как задачу выбора наилучшей структуры, для чего нужно, во-первых, наложить определенные требования на совокупность выполняемых операций, т. е. фиксировать некоторое подмножество $F^0 = \{f_j\}$ множества F ; во-вторых, ввести некоторые критерии предпочтения одной структуры (S') другой (S'') [18]. Следовательно, по множеству $F^0 \subseteq F$ операций, которые необходимо выполнить нужно построить множество $S(F^0)$ допустимых для F^0 структур, т. е. всевозможные структуры S^α , каждая из которых может сопоставляться с совокупностью функций $FS^\alpha \subseteq F^0$, и из них выбирать наилучшую в смысле введенного критерия.

Критерий предпочтения является некоторым функционалом $L(S)$ от структуры и $S' < S''$ эквивалентно $L(S') < L(S'')$. Он зависит от условий функционирования (технических ограничений), которые, в свою очередь, описываются некоторым вектором параметров B , который предполагается постоянным. Тогда задача выбора оптимальной детерминированной структуры состоит в поиске структуры, которая наилучшим образом (в смысле выбранного критерия) выполняла бы некоторую заданную совокупность функций $F^0 \subseteq F$ при заданных условиях функционирования B [18]:

$$\max_{S \in S(F^0)} L(S) = \max_{S \in S(F^0)} \sum_i \left(\sum_j l_{ij} - C_i \right),$$

где l_{ij} — эффективность выполнения объектом i -й операции f_j ; C_i — затраты на i -й элемент; $S(F^0)$ — множество всех структур, отвечающих множеству F^0 .

Решение задачи структурной оптимизации, заключающееся в определении вида функционала F , обычно выполняется методом перебора. Приближенной аппроксимацией перебора, эффективной для подобных задач, является случайный поиск для нулевых переменных [18].

Рассмотренный в общем виде математический подход к структурной оптимизации ТП может быть применен при решении следующих задач выбора: вида заготовки и методов её изготовления; стадий и этапов при проектировании маршрута обработки; маршрута обработки; структуры операции; оптимальной технологической операции; структуры перехода; оборудования; системы станочных приспособлений; конструкции станочного приспособления; конструкции режущего инструмента; многоинструментальной наладки; измерительной системы и др.

2. Выбор вида заготовки и методов ее изготовления

Выбор заготовки — важный этап технологического проектирования. Он во многом определяет качество готовых изделий и себестоимость их изготовления. Этот этап включает выбор рационального вида заготовки, метода ее изготовления, определение припусков на обработку поверхностей и размеров заготовки, установление допусков на неточность их выполнения.

Под заготовкой обычно понимается предмет производства, из которого изменением формы и размеров, шероховатости поверхности и свойств материала изготавливают деталь или неразъемную сборочную единицу (узел). В качестве исходных заготовок в машиностроении принимают следующие их основные виды [54]: отливки, полученные литьем в песчаные или металлические формы или другими способами; горячекатаный прокат обычной или повышенной точности, а также профильный фасонный и другой тип проката; поковки, полученные методом свободнойковки, ковкой в подкладных кольцах и штампах; штамповки (поковки), полученные также обработкой давлением — объемной горячей и холодной штамповкой; сварные заготовки из листового материала.

Выбор вида заготовки представляет сложную многовариантную задачу. При этом необходимость решения этой задачи может возникнуть на различных этапах технической подготовки производства, а именно при конструировании и технологическом проектировании. В общем случае заготовка должна быть выбрана при конструировании детали и уточнена в отношении оптимального метода ее изготовления при технологическом проектировании. Выполнение этих работ или отдельных из них определяется видом детали и включает три подхода: 1) если деталь обрабатывается со всех сторон и к ней не предъявляются особые требования по физико-механическим свойствам и макро-

структуре металла, то выбор заготовки производится только технологом; 2) если деталь обрабатывается со всех сторон, но к ней предъявляются особые требования, то конструктор, задавая требования к детали (например по расположению волокон металла), косвенно задает возможные методы получения заготовки; окончательное решение о выборе заготовки принимает технолог; 3) если деталь имеет необрабатываемые поверхности, то конструктор предварительно задается определенным типом заготовок, указывая штамповочные или литейные радиусы, уклоны и другие, а технолог определяет оптимальный метод получения заготовки. Решение о выборе заготовки в этом случае наиболее целесообразно проводить совместно конструктору и технолог.

В настоящее время при выборе вида заготовки конструктор практически не производит технико-экономических расчетов и принимает решение исходя только из своего опыта. То же можно сказать и в отношении технолога. Постановка задачи оптимизации современных методов изготовления деталей и машин в целом требует разработки автоматизированных систем проектирования технологических процессов механической обработки, включающей выбор оптимальных методов изготовления заготовки. Оптимизация выбора метода получения заготовки позволяет не только снизить затраты на ее изготовление, но и значительно сокращает трудоемкость и стоимость механической обработки. Выбор оптимальной заготовки должен проводиться по комплексным оценкам, которые учитывают затраты и трудоемкость выполнения всего технологического процесса изготовления детали. При нарушении этого условия может получиться так, что при незначительной себестоимости получения заготовки общая себестоимость изготовления детали окажется завышенной вследствие большой трудоемкости механической обработки. В то же время следует иметь в виду, что выбор исходной заготовки и методов ее изготовления в соответствии с ГОСТ 14.301—83 выполняется на первых этапах разработки ТП и предшествует составлению маршрута и проектированию отдельных технологических операций. Это создает определенные трудности для проведения оптимизации выбора вида заготовки с учетом затрат на механическую обработку.

Анализ видов заготовок, используемых в машиностроении, показывает, что их выбор определяется рядом основных показателей (признаков): видом материала, серийностью или масштабом выпуска, конструктивной формой детали, массой и размерами детали, требуемой точностью заготовки, коэффициентом использования металла и др. Наиболее важными являются первые четыре признака. Однако учет всех перечисленных признаков в ряде случаев не дает однозначного решения по выбору метода получения заготовки и приходится проводить дополнительно технико-экономический анализ. В основу этого анализа может быть положена оптимизация. В качестве критерия оптимальности используется минимальная себестоимость изготовления заготовки C_z , которая определяется стоимостью материала, переменными затратами (зарплата основных рабочих, затраты на амортизацию оборудования, оснастку, инструмент и т. д.) и посто-

янными годовыми расходами. Следует отметить, что выбор заготовки с минимальным значением C_3 не всегда приводит к оптимальному варианту при оценке всего процесса изготовления детали. Виды заготовок, отличающихся различными припусками, оказывают влияние главным образом на черновую обработку — первые операции ТП механической обработки [54]. Поэтому при оптимизации выбора заготовки необходимо также учитывать затраты на выполнение черновых операций механической обработки $C_{\text{мех}}$. В то же время следует иметь в виду, что при проектировании ТП изготовления деталей с повышенными требованиями к их точности и качеству поверхности влияние вида заготовки может сказываться на затратах при выполнении чистовых операций, что связано с проявлением технологической наследственности [59].

При более точной оценке наиболее оптимального метода получения заготовки целесообразно принимать во внимание стоимость отходов металла $C_{\text{отх}}$, возникающих при механической обработке заготовок с различными по величине припусками. Тогда зависимость для критерия оптимальности выбора метода получения заготовки будет представлена в виде следующего выражения:

$$C = \min (C_3 + C_{\text{мех}} - C_{\text{отх}}). \quad (2.1)$$

Однако выбор вида заготовки по предлагаемому критерию в конкретных производственных условиях не всегда целесообразен. Могут быть случаи, когда важнее выбрать заготовку, обеспечивающую минимальную себестоимость механической обработки $\min C_{\text{мех}}$ или минимум затрат на материал $\min (C_m - C_{\text{отх}})$, где C_m — стоимость материала для получения заготовки.

Исходя из изложенных принципов при решении задачи выбора оптимального метода получения заготовки выделены следующие этапы: 1) выбор возможных видов заготовки по материалу детали; 2) выбор возможных методов изготовления заготовок исходя из серийности, конструктивной формы, массы и размеров детали; 3) определение технических характеристик для выбранных видов заготовок (точность, коэффициент использования металла и др.); 4) определение себестоимости заготовки C_3 для выбранных методов ее изготовления; 5) определение стоимости затрат на механическую обработку $C_{\text{мех}}$ для выбранных видов заготовок; 6) определение стоимости отходов металла для выбранных видов заготовок $C_{\text{отх}}$; 7) выбор оптимального метода изготовления заготовки для конкретных условий производства.

Для формализации условий выбора вида заготовки и методов ее изготовления и построения на их основе алгоритмов решения рассматриваемой задачи первоначально была проведена классификация всех признаков, определяющих выбор заготовок. Для упрощения алгоритмов проектирования значения всех признаков кодировались.

Вид материала (ВМ). Предварительный анализ этого признака показал целесообразность классификации всех материалов с использованием трехуровневого кодирования. Структура кода имеет следу-

ющий вид: $X_1X_2X_3$, где X_1, X_2, X_3 — коды группы, подгруппы материала, код материала соответственно.

Значение каждого кода выбирается для конкретного вида материала заготовки по специально разработанным таблицам.

Все материалы разбиты на 7 групп, которые соответственно кодировались: стали углеродистые (литейные) — 1; чугуны — 2; литейные сплавы — 3; высоколегированные стали и сплавы — 4; низколегированные стали — 5; легированные стали — 6; автоматные стали — 7. Код группы использовался для определения всех возможных видов и методов изготовления заготовок. Второй уровень классификации, описываемый кодами подгрупп, объединяет материалы, имеющие одинаковые или близкие технологические свойства. Коды подгрупп материалов учитывались при определении затрат на черновую механическую обработку. На последнем уровне классификации кодируются конкретные материалы, и эта информация используется для уточненного определения оптовых цен за тонну заготовок и стоимости отходов металла.

Конструктивная форма (КФ) деталей. Классификация конструктивной формы представлена 11 видами (кодами) деталей и каждый вид — пятью группами сложности. С 1 по 4 вид — детали цилиндрической формы с различными перепадами ступеней; 5 — детали типа втулок и дисков, имеющие сложную наружную и внутреннюю поверхность; 6 — детали типа валов сложной пространственной формы; 7 — детали типа рычагов, шатунов и др.; 8 — корпусные детали призматической формы и сочетания призматической, цилиндрической и других форм; 9 — корпусные детали фланцевого типа; 10 — корпусные детали коробчатой формы сложной конфигурации и 11 — корпусные детали простой конфигурации. Код детали, соответствующий ее виду, выбирается на основе сравнения конкретной детали с описанием типовой детали-представителя (табл. 2).

Серийность производства (СП). Серийность производства определяется масштабом выпуска. Если задана готовая программа выпуска, серийность производства для определенного вида заготовки может определяться по табл. 3. В рассматриваемой подсистеме вид серийности производства кодировался так: единичное — 1, серийное — 2, крупносерийное — 3, массовое — 4.

Масса детали (МД). Для выбора вида заготовки важное значение имеет ее масса, которая в условиях рассматриваемой задачи определяется в зависимости от массы детали. Кодирование массы детали из отливок проводится по шести диапазонам: 1 — до 50 кг, 2 — от 50 до 100 кг, 3 — от 100 до 250 кг, 4 — от 250 до 3000 кг, 5 — от 3000 до 5000 кг и 6 — свыше 5000 кг, а из поковок, штамповок и проката — по двум: 1 — до 50 кг, 2 — свыше 50 кг.

Размер заготовки оказывает влияние только на выбор заготовок из проката: если ее диаметр больше 250 мм (код В), то в этом случае прокат не используется, если диаметр меньше 250 мм (код А), то возможно его применение.

Для упрощения построения алгоритмов решения рассматриваемой задачи определяемые виды заготовок и методы их изготовления также

Т а б л и ц а 2. Выбор кодов кон

Код	Основной признак деталей	Конструктивная		
		1	2	
1	Цилиндрическая гладкая или с перепадом менее 10 мм, с размерами $L > 2D$	—	Детали типа валов, осей, цапф без осевого отверстия — гладкие или переменного сечения с перепадом ступеней не более 10 мм	—
2	Цилиндрическая гладкая или ступенчатая с перепадом ступеней не более 10 мм, полая, с размерами $L > 3D$	—	Детали типа валов со сквозным отверстием типа втулок, гладких или с буртиком, шлицев, роликов	—
3	Цилиндрическая ступенчатая с перепадом ступеней более 10 мм, с размерами $L > 3D$	—	Детали типа ступенчатых валов с односторонним, двухсторонним расположением ступеней, имеющих шлицы, шпонки, дополнительные отверстия, грани, резьбы	—
4	Цилиндрическая гладкая или ступенчатая с центральным отверстием, с размерами $L \leq (0,5 + 2) D$	Детали типа крышек, втулок, дисков, маховиков, шестерен, муфт барабанов шкивов	Блоки шестерен, стаканы с центральными (осевыми) отверстиями сложной формы — гнезда подшипников, поршни	—
5	Детали типа втулок и дисков, имеющие сложную наружную и внутреннюю поверхность вращения, а также различные ребра, выступы и др.	—	Гнезда подшипников, стаканы, фланцы, фасонные кромки, зубчатые колеса со ступицами, ступицы барабанов, фланцы насосов	—
6	Детали типа валов сложной пространственной формы	—	—	—
7	Детали типа рычагов, шатунов и др.	Крестовины, тройники, угольники без отверстия, рычаги, вилки без отверстия, хомутики	Угольники, серьги, рычаги, вилки с отверстием, колодки, вилки карданных валов без отверстия	—

структивной формы деталей

характеристика деталей по группам сложности (1—5)			
3	4	5	
—	—	—	—
Тела вращения с отверстиями и выступами типа блоков-шестерен, плоских одновальцовых колес, дисков	Детали типа гильз, пинолей, направляющих втулок, стаканов полых шпинделей	Детали приборов типа гильз, втулок, контрольных валов, центров, винтов с микрометрической резьбой	—
Детали типа ступенчатых валов с фланцами, зубчатыми венцами, имеющие осевые отверстия сложной формы, наружные ступени конической, фасонной формы, сложные вспомогательные поверхности типа кулачков, выступов, секторов, шлицев, шпонок наружных и внутренних и др.	Детали типа червяков архимедовых, эвольвентных, конволютных), детали типа шпинделей станков, ходовых винтов и валов	Детали приборов типа ступенчатых валов, червяков, ходовых винтов	—
Детали типа направляющих втулок, стаканов, корпусов подшипников	—	—	—
Диски с фланцем, ступицами, переходящими в убывающие ступени. Рубашки цилиндров, ступицы колес, кожухи планшайб, звездочки, блоки	—	—	—
Кулаки шарниров полуосей, полуоси с фланцами, коленчатые валы с изгибом в одной плоскости	Валы эксцентриковые, валы распределительные, сложные коленчатые валы с изгибом в различных плоскостях и с противовесами	—	—
Рычаги, вилки, колодки сложной пространственной формы, прихваты с отверстием, крышки	Шатуны, стойки поворотных кулаков, вилки переключения скоростей, колодки тормозные сложной пространственной формы, лопатки турбин	—	—

Код	Основной признак деталей	Конструктивная	
		1	2
8	Корпусные детали призматической формы и сочетания призматической, цилиндрической и других форм	—	—
9	Корпусные детали фланцевого типа	—	—
10	Корпусные детали коробчатой формы сложной конфигурации	—	—
11	Корпусные детали простой конфигурации	Плиты, крышки, подушки, угольники	Корпуса подшипников, кронштейны, подвески, стойки, крышки люнетов, траверсы, кожухи

целесообразно закодировать: литье в песчаные формы — 1; центробежное литье — 2, литье под давлением — 3, литье в кокиль — 4, литье в оболочковые формы — 5, литье по выплавляемым моделям — 6, прокат — 7; штамповка — 8; поковка — 9; сварная заготовка — 10.

Алгоритм выбора возможных видов заготовок и методов их изготовления может быть представлен в виде таблицы выбора решений

Таблица 3. Выбор кодов серийности производства заготовок в зависимости от годовой программы выпуска

Вид заготовки	Масса, кг	Код серийности производства			
		1	2	3	4
Штамповки, поковки	10	500	1000	3500	3500
	100	250	400	1000	1000
	1000	60	300	600	600
Прокат	10	500	1000	3500	3500
	100	250	400	1000	1000
	1000	60	300	600	600
Отливки	10	2000	12 000	30 000	30 000
	100	600	4000	8000	8000
	1000	300	1500	7000	7000

характеристика деталей по группам сложности (1—5)		
3	4	5
Корпуса редукторов, раздаточных коробок, крышки редукторов, ползуны, буксы, корпуса подшипников, картеры, корпуса насосов приводов, основания тумбы	Корпуса редукторов разъемные и неразъемные, имеющие три и более трех опор под валы, корпуса сервомоторов, коробки передач, рамы роботов	—
Рубашки цилиндров, барабанов, корпуса подшипников, поршни, корпусные детали переменного фланцевого типа	Картеры бортредукторов, направляющие стаканы, корпуса редукторов, направляющие колеса, корпуса гидротрансформаторов	Коробки паровые, аппараты направляющие, рабочие колеса, ротор турбины, крыльчатка, венцы силовой сопловой аппаратуры, корпус воздухоудавки, блок цилиндров
—	Рамы, корпуса коробок передач, сложные корпусные детали разъемных редукторов, корпуса двигателей, картеры бортредукторов, корпуса раздаточных коробок	Опора механизма подачи, корпус турбины, картеры станины, корпуса крупных редукторов, ползуны, корпуса гидронасосов, блок-картеры, блоки цилиндров
Кронштейны, тяги, крышки редукторов, ползуны, каретки, бабки	—	—

(табл. 4). Согласно этой таблице и исходя из конкретных значений ранее рассмотренных признаков детали выбирается один или несколько возможных методов получения заготовки. Далее определяются доплаты за серийность, черновую механическую обработку, находят оптовые цены за тонну заготовки и стоимость отходов металла, определяются точность заготовок и коэффициент использования металла. После расчета стоимости всех выбранных ранее видов заготовки

Таблица 4. Выбор решений для определения возможных видов и методов изготовления заготовки

Наименование признака	Код признака											
Материал	1, 2, 3			2, 3, 4						2		
Серийность	1			1						2		
Конструктивная форма	1...11			1						2		
Масса детали	1...6			1	2	3	4	5	6	1	2	3
Вид заготовки	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1
				3	3	4	4	4		2	2	2
				4	4					3	3	4
				6	6					4	4	
										6	6	

Наименование признака	Код признака																	
Материал	1, 2, 3																	
Серийность	2, 3, 4																	
Конструктивная форма	3																	
Масса детали	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Вид заготовки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	4	4	4	4		2	2	2	4	4		3	3	4	4	4	
	4	4					3	3	4				4	4	5			
	6	6					4	4					5	5				
							6	6					6	6				

Наименование признака	Код признака																	
Материал	1, 2, 3																	
Серийность	2, 3, 4																	
Конструктивная форма	6																	
Масса детали	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Вид заготовки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	4	4	4	4		3	3	4	4	4		3	3	5			
	5	5	5				4	4	5				5	5				
	6	6					5	5					6	6				

Наименование признака	Код признака																	
Материал	1, 2, 3																	
Серийность	2, 3, 4																	
Конструктивная форма	9																	
Масса детали	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Вид заготовки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	3	4	4	4		3	3	4	4	4		3	3	4	4	4	
	4	4	5				4	4	5	5	5		4	4	5			
	5	5					5	5					5	5				
	6	6					6	6					6	6				

Наименование признака	Код признака																	
Материал	4, 5, 6																	
Серийность	1																	
Конструктивная форма	3																	
Масса детали	1	2	1	2			1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
Вид заготовки	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9
	9			9			9			9			9			9		

Наименование признака	Код признака																	
Материал	4, 5, 6																	
Серийность	2, 3, 4																	
Конструктивная форма	8																	
Масса детали	1	2	—	—	—	—	1	2	—	—	—	—	1	2	—	—	—	—
Диаметр заготовки	A	B	—	—	—	—	A	B	—	—	—	—	A	B	—	—	—	—
Вид заготовки	7	9	9	9	10	—	7	9	9	7	8	8	7	8	8	7	8	8
	9				10		9	10	10	9	9	9	8	9	9	8	9	9

Наименование признака	Код признака																	
Материал	4, 5, 6																	
Серийность	2, 3, 4																	
Конструктивная форма	4																	
Масса детали	1	2	—	—	—	—	1	2	—	—	—	—	1	2	—	—	—	—
Диаметр заготовки	A	B	—	—	—	—	A	B	—	—	—	—	A	B	—	—	—	—
Вид заготовки	7	8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8
	8	9	9	9	9	9	8	9	9	9	10	8	9	9	9	8	9	9
	9						9					9	10	10				

вок, стоимости отходов металла и стоимости черновой обработки проводится оптимизация выбора метода изготовления заготовки. Общий вид структурной схемы рассмотренной подсистемы приведен на рис. 8.

Для проведения технико-экономического анализа создана база данных, которая включает массивы: граничных значений интервалов массы и размеров заготовки; серийности производства отливок; серийности производства поковок, штамповок и заготовок из проката; доплаты за серийность; доплат за черновую обработку; оптовых цен за тонну заготовок.

Разработанная автоматизированная подсистема выбора оптимального вида заготовки и метода изготовления ориентирована на ее использовании конструктором при проектировании деталей и технологом — при разработке новых ТП. В состав подсистемы входит 16 программ, написанных на языке ФОРТРАН. Используются две версии подсистем для СМ ЭВМ — с диалоговым режимом проектирования и для ЕС ЭВМ — с пакетным режимом.

Результаты проектирования выводятся в виде технологической карты, в которой приводятся характеристики оптимального и всех возможных методов получения заготовки (точность, коэффициент использования металла, себестоимость изготовления заготовки, стоимость черновой обработки и стоимость отходов металла).

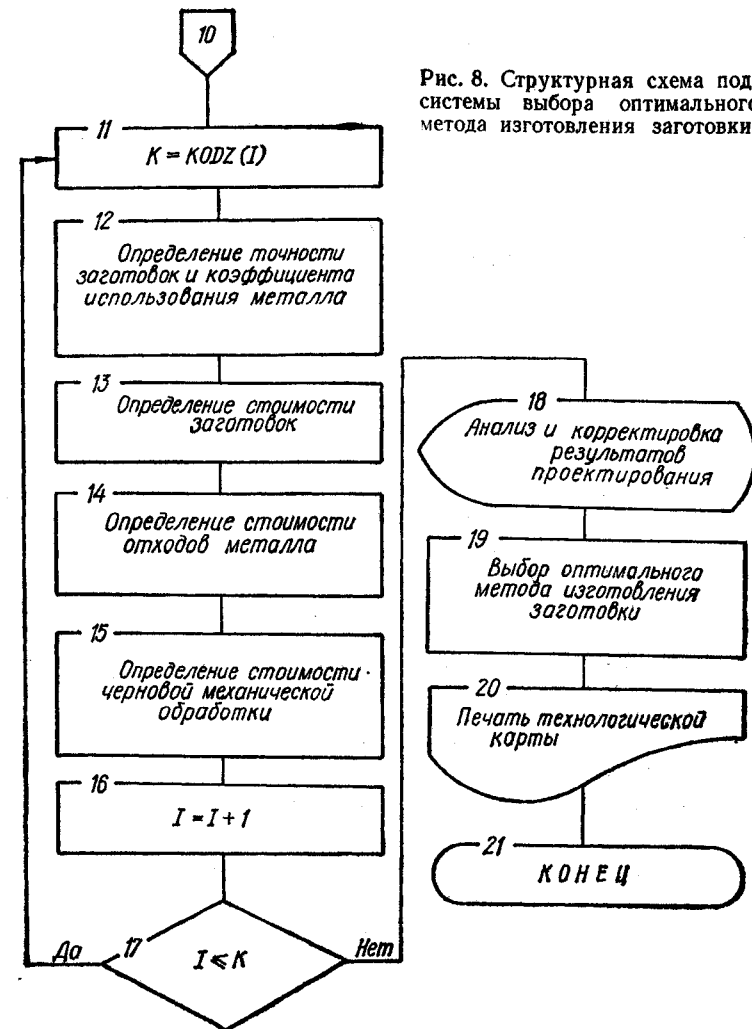
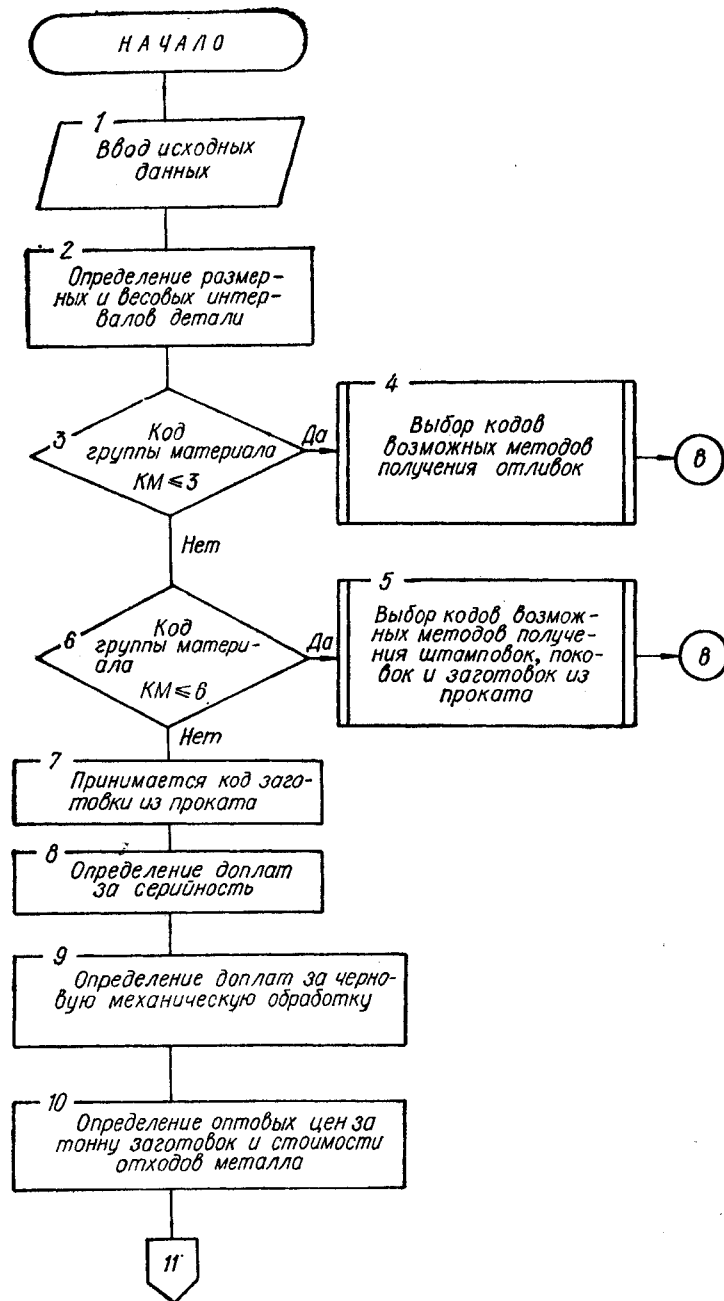


Рис. 8. Структурная схема подсистемы выбора оптимального метода изготовления заготовки.

3. Структурный анализ выбора типового маршрута обработки деталей

Структурное деление маршрута обработки. Принятие рациональных и оптимальных технологических решений на всех этапах проектирования ТП связано со значительными трудностями, так как структура технологического процесса не выражается в явном виде через известные исходные данные и в значительной степени зависит от множества условий технологического, организационного, экономического и производственного характера, описания которых отличаются большой сложностью. Решать эту задачу можно на основе формирова-

ния оптимальной структуры ТП как функции многих переменных, которая отыскивается на различных уровнях проектирования как простая функция сравнительно небольшого числа переменных [42].

В ряде работ высказывалась мысль о необходимости учета стадий и этапов ТП, на основе которых представляется возможным сформировать достаточно простые планы обработки заготовки [45, 48]. Так, А. П. Соколовским предложено разделить процесс механической обработки на три стадии: черновую, чистовую и отделочную. Однако при этом не учитывались особенности немеханической обработки (термической, гальванической и др.) и ее связь с другими методами обработки. Это не позволило широко использовать описанное структурное деление на практике при проектировании ТП.

В настоящей работе поставлена цель — рассмотреть структуру ТП обработки деталей и выявить качественные и количественные связи между ее отдельными элементами.

Анализ большого числа типовых маршрутов изготовления различных классов деталей показал, что для них характерна некоторая типовая схема, которая выражается в четырех уровнях дифференциации ТП [4, 6]: стадии обработки; этапы обработки; виды работ; типовые операции.

Под стадией понимается максимально укрупненная группа операций, включающая однородную по характеру, точности и качеству обработку различных поверхностей и детали в целом. В качестве стадий обработки могут быть использованы: 1 — обдирочная; 2 — черновая; 3 — чистовая; 4 — тонкая; 5 — отделочная; 6 — доводочная. Отдельные стадии включают, наряду с механической обработкой, термообработку, гальванические и другие виды операций. Структура маршрута обработки детали представляет некоторую совокупность стадий, которая выражается в виде множества

$$M_{cu} \subset \{C_{u1}, C_{u2}, \dots, C_{un}\}, \quad (2.2)$$

где $C_{u1}, C_{u2}, \dots, C_{un}$ — стадии обработки u -й детали.

Этап обработки является частью стадии и представляет группу однородных операций, характеризующихся определенной точностью, качеством механической обработки формируемых поверхностей или видом немеханической обработки. Анализ известных этапов обработки различных деталей типа «тела вращения» показал, что их можно разделить на четыре укрупненные группы: этапы получения и подготовки заготовок к дальнейшей обработке (заготовительные и др.); этапы механической обработки; этапы по улучшению механических свойств материалов обрабатываемых заготовок (термические и др.); этапы по нанесению защитных покрытий отдельных поверхностей и всей детали в целом (гальванические, химические и др.).

Маршрут обработки u -й детали, выраженный через этапы, может быть описан в следующем виде:

$$M_{eu} \subset \{E_{u1}, E_{u2}, \dots, E_{um}\}, \quad (2.3)$$

где $E_{u1}, E_{u2}, \dots, E_{um}$ — этапы обработки u -й детали.

Под видами работ понимаются группы операций в пределах каждого этапа обработки, связанные с формированием (обработкой) однотип-

ных по геометрической форме и функциональному назначению поверхностей. Для деталей типа «тела вращения» видами работ являются: отрезные работы; обработка цилиндрических поверхностей; специальных поверхностей (конус, сфера и др.); винтовых поверхностей и резьбы; зубчатых, шлицевых и других поверхностей; поверхностей общего назначения (отверстия, пазы); работы, нехарактерные механической обработке.

Маршрут обработки в зависимости от вида работ для u -й детали можно представить так:

$$M_{vu} \subset \{V_{u1}, V_{u2}, \dots, V_{un}\}, \quad (2.4)$$

где $V_{u1}, V_{u2}, \dots, V_{un}$ — виды работ для u -й детали.

Виды работ в зависимости от классов технологических подобных деталей, стадий, этапов и других условий конкретизируются и в различных сочетаниях образуют отдельные операции. Под типовой понимается такая операция, в которой наименованием операции конкретизируется вид применяемого оборудования или оснащения без уточнения модели и других данных, а с помощью типового содержания операции четко оговариваются максимально возможные объемы работ, планируемых к выполнению в конкретной операции.

По аналогии с ранее рассматриваемым маршрут обработки и детали можно описать следующим образом:

$$M_{ou} \subset \{O_{u1}, O_{u2}, \dots, O_{uk}\}, \quad (2.5)$$

где $O_{u1}, O_{u2}, \dots, O_{uk}$ — типовые операции обработки.

Приведенная дифференциация процесса обработки детали основана на результатах исследования связей между характеристиками отдельных поверхностей конкретных деталей и маршрутов обработки этих поверхностей и деталей в целом. Известно, что основными составляющими маршрутов обработки каждой i -й поверхности являются переходы, а общий маршрут обработки u -й детали представляется рядом конкретных операций.

И переходы, и операции — структурные составляющие маршрутов механической обработки деталей, причем сами переходы рассматриваются как структурные составляющие конкретных операций. Поэтому можно утверждать, что маршрут обработки u -й детали является производным от маршрута обработки ее составляющих i -й поверхностей. Операции — нижний уровень в структурной модели проектирования маршрутов обработки деталей, поэтому переходы как структурную составляющую маршрута обработки i -й поверхности можно рассматривать в виде составной части маршрутов обработки деталей, она на порядок ниже самого нижнего уровня в модели.

Если рассматривать маршрут обработки одной конкретной i -й поверхности, то сведения по механической обработке, которые содержатся на уровне «этапов обработки», практически совпадут со сведениями на уровне «типовых операций». Другими словами, переходы, окончательно уточненные в этапах обработки, без существенных изменений группируются в отдельные «типовые операции», и тем самым отпадает необходимость в специальном выделении уровня «виды работ».

Применительно к разработке маршрута обработки i -й поверхности u -й детали можно записать

$$M_{ui} \subset \{P_{ui1}, P_{ui2}, \dots, P_{uif}\}, \quad (2.6)$$

где $P_{ui1}, P_{ui2}, \dots, P_{uif}$ — типовые переходы обработки i -й поверхности u -й детали. Если типовые переходы P_{uif} представить в виде условной трудоемкости их выполнения, то будет возможно общую трудоемкость выполнения маршрута обработки i -й поверхности выразить в виде суммы значений P_{uif} :

$$M_{ui} = P_{ui1} + P_{ui2} + \dots + P_{uif} = \sum_{i=1}^f P_{uif}. \quad (2.7)$$

Учитывая, что каждая стадия обработки поверхности содержит некоторое количество переходов, маршрут обработки i -й поверхности и u -й детали в целом можно также представить в виде суммы значений некоторой условной трудоемкости отдельных стадий:

$$M_{cui} = C_{ui1} + C_{ui2} + \dots, C_{uin} = \sum_{i=1}^n C_{uin}, \quad (2.8)$$

$$M_{cu} = C_{u1} + C_{u2} + \dots + C_{un} = \sum_{i=1}^n C_{un}. \quad (2.9)$$

Аналогично маршрут обработки u -й детали может выражаться в виде суммы этапов $M_{\varepsilon u} = \sum_{i=1}^m \varepsilon_{um}$, видов работ $M_{vu} = \sum_{i=1}^l v_{ui}$ или типовых операций $M_{ou} = \sum_{i=1}^k o_{uk}$.

Дифференциация процесса проектирования маршрутов обработки позволила представить сложный творческий процесс проектирования в виде более простых решений на нескольких уровнях, для которых отыскивались оптимальные решения (рис. 9).

Выбор маршрута обработки детали в виде некоторого набора типовых операций может выполняться по двум принципиально различным направлениям: проектирование «от общего к частному»; проектирование «от частного к общему». Иногда эти направления называют методами «вариантов» и «генерирования». Первому направлению характерны разработки на основе типизации технологических процессов на группу или класс технологически подобных деталей, из которых выбирается маршрут обработки конкретной детали, а затем формируются переходы соответственно каждой из операций.

Второе направление связано с использованием типовых планов обработки отдельных элементарных поверхностей и формирования на их основе операций, которые составляют маршрут обработки конкретной детали. Для этого направления характерен более высокий уровень использования типизации, который предусматривает выделение технологических решений в виде типовых элементов ТП для синтеза маршрута обработки.

Несмотря на существенные методологические отличия двух подходов к проектированию маршрутов обработки, им свойствен ряд

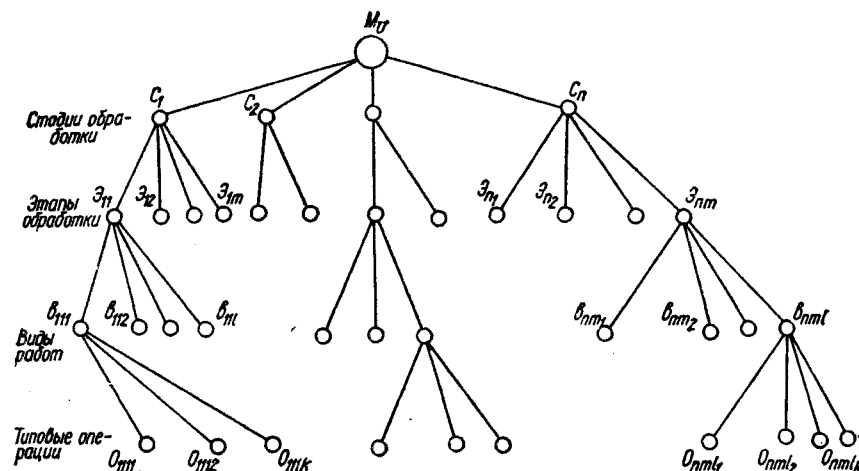


Рис. 9. Граф структурной модели маршрута обработки детали.

общих принципов. Одним из таких принципов является разделение сложного процесса проектирования технологических маршрутов на ряд более простых задач. В основу этого подхода могут быть положены рассмотренные принципы деления ТП на стадии, этапы и виды работ.

Выбор стадий обработки. Рассмотрим более подробно выбор маршрута обработки методом «от частного к общему». При этом первой задачей является построение маршрута обработки отдельной i -й поверхности, состоящего из набора стадий обработки M_{ci} . Для решения этой задачи могут быть использованы так называемые таблицы соответствия, которые в этом случае представляют одну из форм записи соответствия множества типовых решений M_{ci} множеству условий их существования. Табл. 5 — одна из таких таблиц соответствия для поверхностей вращения деталей из конструкционной углеродистой стали. Аналогичные таблицы разработаны для плоских, зубчатых и других типов поверхностей из различных материалов.

В левой части табл. 5 представлены наименования стадий обработки, расположенные в определенной последовательности выполнения типовых технологических маршрутов, а в правой — условия по точности обработки и шероховатости поверхности после предшествующего и выполняемого перехода, а также данные по биению ступеней и отклонению размеров длин ступеней.

Выбор обобщенного кода стадий обработки (графа 3, табл. 5) выполняется в три шага. На первом — сравнением требуемой шероховатости i -й поверхности с табличными данными для выполняемого перехода определяется предварительный код стадий обработки в зависимости от требований по шероховатости k_{wi} . На втором шаге, аналогично с первым, определяется предварительный код стадий обработки в зависимости от требований точности рассматриваемой i -й поверхности k_{ti} . При этом под приведенной точностью i -й поверх-

Таблица 5. Алгоритм выбора маршрута обработки поверхностей вращения углеродистых сталей

Стадия обработки			Вид цилиндрической поверхности		Шероховатость на переходе, R_z (R_a) мкм	
Наименование	Обозначение	Код	наружная	внутренняя	выполняемом	предшествующем
Обдирочная	C_1	1	(+)	(+)	40	—
Черновая	C_2	2	+	+	20	40
Чистовая	C_3	3	+	+	2,5—5	10—20
Тонкая (лезвийная)	C_4	4	+	+	0,63—2,5	2,5—5
Отделочная	C_5	5	(+)	(+)	0,16—0,32	1,25
Доводочная	C_6	6	+	+	0,08—0,16	0,63

ности понимается максимальная точность, получаемая сравнением точности размера, формы и взаимного расположения i -й поверхности относительно других поверхностей. На третьем шаге сравнением предварительных кодов стадий обработки i -й поверхности выбирается обобщенный код стадий обработки $k_{о6i}$, равный наибольшему из предварительных кодов $k_{шi}$ и $k_{тi}$.

По обобщенному коду выбирается типовой табличный маршрут обработки i -й поверхности. Для этого находится приоритетная «+», имеющая преимущества при выборе решения, или вариантная «(+»)» стадии обработки, расположенные в одной строке с кодом $k_{о6i}$, и принимаются все предшествующие приоритетные стадии обработки. При этом порядок расположения стадий обработки в типовом табличном маршруте должен соответствовать увеличению порядковых номеров стадий обработки. Так, маршрут обработки для наружной цилиндрической поверхности (графа 4, табл. 5) будет соответствовать при

$$\begin{aligned}
 k_{о6i} = 1 & \quad M_{ci} = C_{i1}, \\
 k_{о6i} = 2 & \quad M_{ci} = C_{i2}, \\
 k_{о6i} = 3 & \quad M_{ci} = C_{i2} + C_{i3}, \\
 & \dots \dots \dots \\
 k_{о6i} = 6 & \quad M_{ci} = C_{i2} + C_{i3} + C_{i4} + C_{i6},
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Найденные таким образом маршруты обработки представляют сумму максимально возможного количества стадий, которое соответствует самому неблагоприятному состоянию i -й поверхности заготовки с точки зрения наибольшей величины припуска.

Определение маршрута обработки i -й поверхности конкретной детали M_{ci}^k требует уточнения типового маршрута M_{ci} вследствие наличия у реальных заготовок различного по величине припуска.

заготовок из конструкционных

Точность обработки			
по размерам и форме поверхностей на переходе		по биению ступеней	по отклонению размеров длин ступеней
выполняемом	предшествующем		
15—17	—	14	—
13—14	15—16	12	14
10—11	13—14	10	11
7—9	10	8	10
7—9	8—9	6	8
6—7	8	—	—

Процесс уточнения типовых табличных маршрутов обработки предложено проводить на основе анализа величин припуска на обработку, точности исходной заготовки и ряда других требований [4].

Рассмотрим процесс уточнения типового табличного маршрута обработки в зависимости от величины припусков. В основу положены принцип определения общего расчетного припуска $Z_{общ.фi}$ для всех выбранных стадий обработки i -й поверхности и сравнение его с фактическим припуском $Z_{фi}$. Типовые табличные маршруты обработки поверхностей, по аналогии с (2.10), можно представить в виде

аналитических зависимостей для расчетных припусков:

$$\begin{aligned}
 k_{о6i} = 1 & \quad Z_{общ.пi1} = Z_{пi1}, \\
 k_{о6i} = 2 & \quad Z_{общ.пi2} = Z_{пi2}, \\
 k_{о6i} = 3 & \quad Z_{общ.пi3} = Z_{пi2} + Z_{пi3}, \\
 & \dots \dots \dots \\
 k_{о6i} = 6 & \quad Z_{общ.пi6} = Z_{пi2} + Z_{пi3} + Z_{пi4} + Z_{пi6},
 \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $Z_{общ.пi1}$, $Z_{общ.пi2}$, ..., $Z_{общ.пi6}$ — варианты общих расчетных припусков, необходимых для обработки i -й поверхности согласно обобщенным кодам $k_{о6i}$; $Z_{пi1}$, $Z_{пi2}$, $Z_{пi3}$, ..., $Z_{пi6}$ — расчетные промежуточные припуски, необходимые для выполнения соответственно обдирочной, черновой и других стадий обработки.

Величины расчетных промежуточных припусков для различных стадий обработки определялись на основе интегрально-аналитического метода по уравнениям типа

$$Z_p = Z_0 + a_1 B + a_2 H + a_3 L, \quad (2.12)$$

где Z_0 — величина припуска, которую необходимо снять для удаления дефектного слоя и микронеровностей, мм; a_1 — a_3 — коэффициенты, учитывающие влияние габаритов заготовки и способа ее установки на величину операционного припуска.

Эти зависимости получены на основе корреляционного анализа таблиц, нормативов на припуски применительно к отраслям тяжелого машиностроения. Так, для черновой стадии обработки «сырых» заготовок типа «тела вращения» и в зависимости от их длины L и диаметра D установлено, что

$$\text{при } L/D \geq 1 \quad Z_{пi2} = 1,8 + 0,002D + 0,0008L, \quad (2.13)$$

$$\text{при } L/D < 1 \quad Z_{пi2} = 1,8 + 0,008D + 0,002L. \quad (2.14)$$

Логическим принципом, проверяющим необходимость уточнения табличного маршрута обработки M_{ci} и корректирования его до требуемого M_{ci}^k , является условие

$$\text{если } Z_{\text{общ.рi}}/Z_{\text{общ.фi}} > 1, \text{ то } M_{ci} \neq M_{ci}^k \quad (2.15)$$

и M_{ci} необходимо уточнить. Причем, если для некоторой выбранной из таблицы стадии j отсутствует припуск на обработку Z_{pij} , то нет необходимости в выполнении работ по данной стадии.

Для определения степени уточнения и корректирования типового табличного маршрута обработки i -й поверхности в зависимости от величины и соотношения общего расчетного и действительного припусков предусматривается ряд проверок. Так, необходимость черновой стадии обработки i -й поверхности проверяется условием

$$\text{если } 0 < \frac{Z_{\text{общ.рi}} - Z_{pi2}}{Z_{\text{общ.фi}}} \leq 1, \quad (2.16)$$

то нет необходимости в черновой стадии в типовом табличном маршруте. Иначе говоря, в общем расчетном припуске на обработку i -й поверхности отсутствует припуск на черновую стадию обработки, т. е. $Z_{pi2} = 0$. Тогда в соответствии с условием (2.10) процесс корректирования табличного типового маршрута можно выразить зависимостью

$$M_{c_{ij}}^k = M_{c_{ij}} - C_{i2} = \sum_{j=1}^n C_{ij} - C_{i2}. \quad (2.17)$$

Если

$$\frac{Z_{\text{общ.рi}} - Z_{pi2}}{Z_{\text{общ.фi}}} > 1, \quad (2.18)$$

то табличный маршрут обработки i -й поверхности следует корректировать на черновой и последующих стадиях. При этом проверка по следующему условию:

$$0 < \frac{(Z_{\text{общ.рi}} - Z_{pi2}) - Z_{pi4}}{Z_{\text{общ.фi}}} \leq 1 \quad (2.19)$$

показывает, что скорректированный типовой табличный маршрут обработки i -й поверхности не будет содержать стадии C_{i2} и C_{i4} , т. е.

$$M_{ci}^k = M_{c_{ij}} - C_{i2} - C_{i4} = \sum_{j=1}^n M_{c_{ij}} - C_{i2} - C_{i4}. \quad (2.20)$$

Аналогично составляются условия для проверки необходимости уточнения типового маршрута $M_{c_{ij}}$ для последующих j стадий.

В соответствии с изложенным для определения маршрута обработки u -й детали, в первую очередь, необходимо спроектировать типовые табличные маршруты обработки всех поверхностей конкретной детали. Из общего множества найденных типовых маршрутов обработки i -й поверхности, составляющих u -й детали, выбирается маршрут обработки базовой поверхности. После дополнения маршрута обра-

ботки базовой поверхности работами, характерными для других поверхностей детали, но отсутствующими в выбранном базовом маршруте, получают типовой маршрут обработки u -й детали, который обычно требует некоторой доработки.

Описанный процесс проектирования маршрута обработки методом «от частного к общему» целесообразно проводить по следующей схеме: проектирование предварительных типовых маршрутов обработки i -й поверхности, составляющих u -й деталь; проектирование предварительного типового маршрута обработки u -й детали; корректирование предварительных типовых маршрутов обработки i -й поверхности и u -й детали в целом; корректирование типового маршрута обработки u -й детали до уровня и требований конкретного ТП обработки u -й детали.

На основании описанного подхода возможно осуществить синтез маршрута обработки с использованием типовых технологических решений при автоматизации проектирования индивидуальных ТП.

Выбор этапов обработки. При разработке технологического маршрута изготовления детали в целом в виде набора стадий обработки переход к типовым операциям представляет значительные трудности. В связи с этим возникает необходимость введения второго уровня представления структуры маршрута в виде этапов обработки, которые более полно отражают все особенности обработки определенного вида деталей в конкретных условиях производства.

Для решения этой задачи необходимо сформировать состав типовых этапов обработки для определенных условий производства, определить условия и критерии выбора этапов и разработать алгоритмы проектирования [4].

Наиболее сложной задачей, возникающей при формировании плана обработки на втором уровне, является установление рационального состава типовых этапов обработки для деталей различных технологических групп. При формировании рационального состава этапов обработки необходимо руководствоваться рядом общих рекомендаций организационно-технологического характера. Так, опыт автоматизированного проектирования маршрутов обработки деталей показывает, что число этапов должно быть минимально возможным, чтобы в общем объеме информации не нивелировались и не терялись главные и второстепенные вопросы обработки деталей, а также достаточно большим, чтобы учесть все особенности обработки деталей.

В результате анализа ТП механической обработки деталей в условиях тяжелого и энергетического машиностроения установлены следующие основные группы типовых этапов обработки деталей: 1) этапы механической обработки общего назначения; 2) этапы, связанные с особенностями формирования основных видов промежуточных заготовок; излишков металла технологических поверхностей в заготовках и других работ общего назначения; 3) этапы, связанные с особенностями механической обработки деталей (заготовок), подвергающихся промежуточной сварке; деталей с наплавленным слоем металла, отличного от материала базовой заготовки; деталей с запрессованными в них другими деталями (заготовками); деталей, подверга-

ющихся поверхностной закалке, в том числе с цементируемыми, азотируемыми и другими поверхностями; деталей, подвергающихся metallическому покрытию; 4) этапы, связанные с пластическим деформированием поверхностей, навивкой пружин и другими работами специального назначения; выполнением разметочных, слесарных, слесарно-сборочных и других работ; выполнением термических, гальванических, термохимических и других работ, нехарактерных для механосборочного производства; контролем деталей; обеспечением требованиями техники безопасности и др.

При формировании типовых этапов обработки следует учитывать технологические особенности обработки отдельных поверхностей, которые можно рассматривать в виде двух укрупненных групп: технологически простые и технологически сложные поверхности.

Технологически простые — поверхности деталей, для которых применяются только методы механической обработки. Технологически сложные — поверхности деталей, при формировании которых, кроме механической обработки, применяются термические, гальванические и другие методы обработки или покрытия поверхности (кроме объемной термообработки). В общем случае считается, что при обработке технологически простых поверхностей сохраняется предложенная последовательность стадий в виде планов обработки для конкретных типов деталей. Формирование технологически сложных поверхностей характеризуется, как правило, нарушением стадийности. Так, в конце процесса обработки детали на стадиях тонкой и отделочной обработки могут выполняться работы, связанные с разметкой, формированием в заготовках технологических баз и др.

В то же время, как показывает анализ ТП изготовления деталей на различных предприятиях, выполнение работ, характерных для данного этапа обработки, может производиться на различных ее стадиях. Так, «формирование заготовки — под повторное (многократное) старение» выполняется на черновой, получистовой и чистовой стадиях обработки. Это во многом связано с установившимися на предприятии традициями обработки деталей различных типов и носит субъективный характер. Чтобы учесть эту особенность и сделать более приспособляемыми разрабатываемые САПР ТП, предложено рассматривать при формировании типовых этапов обработки приоритетные и варианты стадии обработки.

Если при назначении типового этапа обработки в формируемый технологический маршрут руководствуются объективными техническими критериями, инструкциями, проверенными рекомендациями, статистическими данными и т. д., а процесс принятия решения носит алгоритмический характер, то такая реализация конкретного этапа обработки будет приоритетной. При вариантной реализации технологического маршрута руководствуются субъективными соображениями, указаниями руководства и т. д., а принятое решение о целесообразности и необходимости функционирования типового этапа в конкретном маршруте обработки можно считать «волевым решением». В дополнение к изложенному следует отметить, что приоритетная реализация типовых этапов обработки деталей характерна для конкретной, как правило, одной

Таблица 6. Типовые этапы обработки деталей в тяжелом машиностроении

Наименование этапов	Код КТЭ	Стадии реализации этапа обработки	
		приоритетная	вариантная
1. Механическая обработка общего назначения			
обдирочная	01	1	2
черновая	02	2	—
чистовая	03	3	—
тонкая	04	4	—
отделочная	05	5	—
доводочная	06	6	—
...	...	...	...
2. Формирование основных видов промежуточных заготовок			
Технологических баз общего и специального назначения	19	2, 4, 5	3, 6, 7
Заготовки под объемную термообработку	20	2	—
Заготовки под черновую обработку	21	2	—
Заготовки под искусственное старение	22	3	2, 4
Заготовки под повторное (многократное) искусственное старение	23	3	4
Заготовки под получистовую обработку	24	3	—
Заготовки под чистовую обработку	25	4	—
...	...	...	...

стадии обработки, а вариантная — для ряда близких по характеру стадий обработки деталей.

С учетом изложенных положений составлена таблица типовых этапов обработки деталей различных технологических групп в условиях тяжелого машиностроения. Число этих этапов не превышало 100, что позволило использовать в качестве промежуточного кода двузначное число. Фрагментом такой таблицы является табл. 6.

В целях уменьшения числа анализируемых технологических особенностей обработки и упрощения алгоритмов выбора типовых этапов необходимо проводить их ранжирование, т. е. определять точное место каждому типовому этапу в пределах конкретной стадии обработки деталей. В связи с этим на основании табличных данных, аналогичных табл. 6, последовательно для каждой стадии составляется логическая последовательность выполняемых работ (этапов). Эти данные заносятся в таблицы по ранжированию типовых этапов в виде комплексного маршрута обработки деталей различных технологических групп. Для примера приведен фрагмент такой таблицы (табл. 7). В ней, наряду с кратким содержанием работ, выполняемых в этапе и расположенных в порядке их выполнения в технологическом маршруте, приведены ранее принятые коды типовых этапов КТЭ. Использование этих кодов, имеющих нумерацию в соответствии с типовым содержанием работ в этапе (см. табл. 6), а не по стадиям обработки,

Таблица 7. Стадии и этапы комплексного маршрута обработки деталей

№ п/п	КТЭ	Выполняемые работы	Условия, технологические особенности обработки деталей
1. Стадия обдирочной обработки			
1.01	73	Естественное старение заготовок	Высокоточные нежесткие детали из литых, сварных и других заготовок
1.02	54	Формирование единичных и комплексных заготовок из проката для изготовления деталей и «свидетелей»	
1.03	(75)	Отжиг заготовок	Для всех заготовок, кроме сварных
1.04	(48)	Разметка заготовок под обдирочную обработку	
...	...	...	...
2. Стадия черновой обработки			
...	...	...	...
2.14	21	Формирование заготовок под черновую обработку	
2.15	20	Формирование заготовок под объемную термообработку	
...	...	...	...

позволяет разрабатывать в дальнейшем единые алгоритмы и программы для целой группы этапов.

Для выбора типовых этапов обработки деталей необходимо установить определенный состав условий и объективных критериев (признаков) функционирования каждого этапа в маршрутах обработки. Количество этих классификационных признаков должно быть минимально возможным и в то же время достаточно большим, чтобы обоснованно выбирать типовые этапы обработки деталей.

Классификационные признаки обычно делят на два вида: конструкторские и технологические. Многие признаки могут относиться к одному и другому виду, поэтому они названы конструкторско-технологическими. В рассматриваемой работе все условия и критерии выбора типовых этапов обработки разделены на следующие группы: конструкторско-технологические признаки деталей общего назначения (точность, шероховатость поверхности, материал заготовки и др.); конструкторско-технологические признаки особенностей формирования заготовок; приведенные величины припусков, снимаемых с заготовок в процессе изготовления деталей; сведения о жесткости детали (заготовки); сведения о твердости, прочности и других характеристиках деталей (заготовок).

Для описания признаков формирования типовых этапов обработки деталей их (признаки) разделили в пределах группы на характеристики и условия (критерии) формирования этапов. Использована многоуровневая схема кодирования признаков. При этом основной код со-

стоял из трех уровней, первые два уровня определяли код характеристики, а третий — условия (критерий) формирования типовых этапов.

При установлении рационального состава условий формирования этапов обработки, включаемых в конкретную характеристику, следует предусматривать возможность введения в характеристику следующих видов условий: одного условия, соответствующего отрицанию необходимости в выполнении работ по существу рассматриваемого вопроса (код этого условия — 0); одного условия, соответствующего указанию алгоритмически решать вопрос о необходимости типового этапа обработки для выполнения работ, связанных с рассматриваемой характеристикой признака (код этого условия — 9); ряда условий, определяющих типовой этап обработки «волевым решением», соответствующим утверждению о необходимости выполнения работ по существу рассматриваемого вопроса с их конкретизацией (коды этих условий — 1...8).

Под конкретизацией работ понимается необходимость в выполнении работ по существу рассматриваемых в характеристике вопросов с конкретизацией стадий обработки деталей, на которых планируется выполнение этих работ. Необходимо отметить, что в конкретных характеристиках могут отсутствовать отдельные из перечисленных видов условий, что связано с особенностями описания информации различных характеристик.

На основании описанного подхода разработаны рекомендации по назначению и кодированию характеристик и условий (критериев) выбора этапов механической, термической, гальванической и других видов обработки деталей различных технологических групп в условиях тяжелого машиностроения. Установлена необходимость описания свыше 600 различных условий выбора этапов обработки деталей, сгруппированных в виде 97 характеристик. В табл. 8 приведен образец рекомендаций по определению характеристик и условий выбора типовых этапов обработки деталей различных технологических групп в условиях тяжелого машиностроения.

Приведенный состав характеристик и условий выбора типовых этапов обработки содержит большое число вариантов возможных решений. Однако они в значительной степени сокращаются в случае алгоритмического выбора решений. В то же время введение условий, определяемых «волевым решением», т. е. предписываемых непосредственно технологом, позволяет учесть все многообразие особенностей, присущих конкретному производству.

Для построения комплексных маршрутов обработки деталей необходимо объединить набор технологических решений в виде типовых этапов с условиями их функционирования. Сравнением конкретных условий, характеризующих анализируемую деталь с условиями выбора типовых этапов в комплексном маршруте обработки, получают маршрут обработки конкретной детали. Эта операция обычно выполняется с использованием таблиц соответствий. С целью минимизации описываемой информации и упрощения построения алгоритмов проектирования предложено процесс формирования и выбора типовых этапов обработки проводить с помощью аппарата математической

логики, главной задачей которой является структурное моделирование любых дискретных систем, характеризующихся конечным числом состояний.

Каждое условие, определяющее выбор типовых этапов обработки и описываемое трехзначным кодом, может пребывать в двух состояниях — совпадают и не совпадают по значению («да» и «нет»). Известно, что объекты с двумя возможными состояниями характеризуются булевыми переменными, а отношения между ними представляются булевыми функциями — отрицание $\bar{X}$, дизъюнкцией $X_1 \vee X_2$ (логическая сумма) и конъюнкцией $X_1 \wedge X_2$ (логическое произведение). В общем случае выбор кода типового этапа обработки можно представить в виде решения логического выражения

$$KЭ = f(X_1 X_2, \dots, X_n), \quad (2.2i)$$

где $X_1, X_2, \dots, X_n$ — независимые характеристики, с помощью которых описываются конструктивно-технологические признаки детали (заготовки), а также организационно-технические и экономические особенности ее обработки.

Если установлен минимально необходимый состав независимых характеристик, определяющих формирование конкретного типового этапа в комплексном маршруте обработки деталей, обеспечивающих однозначность решения, то можно записать логическую формулу назначения анализируемого этапа в виде следующего выражения

$$KЭ = X_1 \wedge X_2 \dots \wedge X_i \dots \wedge X_n. \quad (2.22)$$

Каждая независимая характеристика может быть представлена одним или группой условий формирования типовых этапов обработки деталей; так, если анализируемая характеристика представлена группой условий, равноценных по оказываемому ими воздействию на процесс формирования типовых этапов обработки деталей и наличие хотя бы одного из них равносильно действию рассматриваемой характеристики, то такую зависимость можно описать выражением с использованием дизъюнкции:

$$X_i = X_{i1} \vee X_{i2} \dots \vee X_{im}. \quad (2.23)$$

Возможны варианты подстановок, когда рассматриваемая характеристика заменяется группой взаимосвязанных условий, представляемых в виде конъюнкции

$$X_i = X_{i1} \wedge X_{i2} \dots \wedge X_{im}. \quad (2.24)$$

или в виде смешанных выражений с наличием дизъюнкции и конъюнкции

$$X_i = (X_{i1} \wedge X_{i2}) \vee (X_{i3} \wedge X_{i4}). \quad (2.25)$$

Встречаются случаи, когда целесообразно для упрощения выражений при выборе кода КЭ использовать операцию отрицания, например

$$X_i = \bar{X}_{i1}. \quad (2.26)$$

Для упрощения описания логических выражений в рассматриваемых условиях автоматизированного проектирования предложено изменить

символическое обозначение ряда функций двужанной логики. Так, операция дизъюнкции $y = X_1 \vee X_2$ представлялась в виде выражения $y = X_1, X_2$, а операция конъюнкции — в виде $y = X_1; X_2$. Тогда выражение (2.25) может быть записано в виде

$$X_i = (X_{i1}; X_{i2}), (X_{i3}; X_{i4}). \quad (2.27)$$

Изложенные выше рекомендации по описанию отдельных типовых этапов обработки проиллюстрируем на примере выражения для выбора кода КЭ (73) «Естественное старение заготовок» на стадии обдирочной обработки, взятого из табл. 7: КЭ (73) = (151, 159); (001, ..., 008); (051, ..., 055); (102, 103); 739; 760.

Это выражение показывает, что типовой этап обработки КЭ (73) может быть включен в маршрут конкретной детали, если для нее выполняются следующие условия:

151, 159 — условия на необходимость формирования стадии обработки (151 — необходимость обдирочной стадии); 159 — определение алгоритмически необходимого состава стадий обработки; 001, ..., 008 — приведенная точностная и качественная характеристика обработки по всем поверхностям детали (см. табл. 8); 051, ..., 055 — характеристика материалов для изготовления деталей (условия с кодами

Таблица 8. Характеристики и условия выбора типовых этапов обработки в тяжелом машиностроении

№ п/п	Характеристики	Код характеристик и условий
1.	Конструктивно-технологические особенности деталей общего назначения	000—029
1.1.	Приведенные характеристики по точности обработки и шероховатости (в мкм) по всем поверхностям детали	
	$T_{кв} > 14$ при $R_a \geq 20$	001
	$T_{кв} = 14$ при $20 > R_a \geq 10$	002
	$14 > T_{кв} > 12$ при $10 > R_a \geq 5$	003
	$T_{кв} = 11$ при $10 > R_a \geq 2,5$	004
	$11 > T_{кв} \geq 9$ при $5 > R_a \geq 1,25$	005
	$9 > T_{кв} \geq 7$ при $2,5 > R_a \geq 0,32$	006
	$T_{кв} = 7$ при $1,25 > R_a \geq 0,08$	007
	$T_{кв} < 7$ при $R_a < 0,08$	008
9.	Особенности формирования основных видов промежуточных заготовок	190—259
9.1.	Формирование технологических баз:	
	отсутствие необходимости в формировании технологических баз	190
	необходимость в формировании технологических баз с реализацией этапа на стадии обработки, в том числе	191—197
	черновой	192
	чистой	193
	тонкой	194
	отделочной	195
	доводочной	196
	определение алгоритмической необходимости в формировании технологических баз с конкретизацией стадий обработки	199
	...	...

051—055 означают материалы из неметаллов). В данном случае рассматриваемые условия с использованием операции отрицания показывают, что код КЭ (73) выбирается только для изготовления деталей из металлов; 102, 103 — характеристика детали по жесткости (условие с кодом 103 означает, что деталь нежесткая, а условие с кодом 102 — с «критической» жесткостью); 760 — характеризует условия об искусственном старении заготовки (условие с кодом 760 показывает отсутствие необходимости в искусственном старении).

Аналогично разработаны алгоритмы формирования ранее описанных типовых этапов обработки деталей (см. табл. 7) различных технологических групп с учетом характеристик и условий в выборе этих этапов (табл. 8, фрагмент). Все алгоритмы по формированию типовых этапов обработки деталей объединены для удобства использования в отдельные таблицы по стадиям обработки с выделением в них частных комплексных маршрутов типа А (с алгоритмическим принятием решения) и типа В (с включением условий, связанных с «волевыми решениями» и имеющих субъективный характер).

Отметим, что качество проектируемых в условиях САПР ТП маршрутов обработки конкретных деталей в основном зависит от качества положенного в их основу комплексного маршрута обработки, правильности и полноты описания исходной информации об анализируемых деталях, а также особенностей реализации поиска маршрутов обработки конкретных деталей с помощью комплексного маршрута. В рассмотренной работе сделана попытка решить первую задачу этой проблемы — предложены универсальные алгоритмы выбора маршрута (плана) обработки различных классов деталей в виде типовых этапов. При этом обращено внимание на создание алгоритмов, требующих различного участия технолога в процессе проектирования с использованием комплексных маршрутов типа А и В, что, на наш взгляд, позволит в будущем обеспечить лучшую приспособляемость создаваемых САПР ТП к различным условиям производства.

4. Выбор припусков и операционных размеров

Определение припусков на обработку и допусков на промежуточные операционные размеры, обеспечивающих возможность получения требуемого качества деталей, имеет важное технико-экономическое значение. Завышенные припуски на обработку ведут к перерасходу материала, увеличению трудоемкости, снижают качество поверхности за счет удаления наиболее износостойких поверхностных слоев, повышают затраты на электроэнергию. В то же время заниженные припуски ухудшают качество обработки, так как не позволяют полностью удалить дефектный слой, затрудняют достижение требуемой точности и шероховатости поверхности. В связи с этим необходимо технически обосновать выбор общего и операционных припусков на обрабатываемые поверхности.

Общим припуском в дальнейшем назовем слой металла, необходимый для выполнения всей совокупности технологических переходов, т. е. всего процесса обработки данной элементарной поверхности —

от черновой заготовки до готовой детали. В качестве элементарных поверхностей рассматриваются наружные, внутренние поверхности вращения и плоские поверхности.

Общий припуск для любой из названных поверхностей может быть определен как сумма операционных припусков

$$Z_o = \sum_{i=1}^n Z_i, \quad (2.28)$$

где Z_i — припуск на обработку рассматриваемой поверхности на i -й операции.

Для определения операционных припусков используют три метода: дифференциально-интегрально-аналитический и нормативный [19].

Дифференциально-аналитический метод определения припусков является наиболее точным и базируется на анализе производственных погрешностей и дифференцированно учитывает влияние на величину припуска конфигурации и размеров детали, качества заготовки, погрешностей, возникающих при механической и термической обработке [28]. Наиболее общий вид формулы для определения минимального припуска на обработку на i -й операции можно представить в виде

$$Z_{\min i} = k(R_{Z(i-1)} + T_{i-1} + \bar{p}_{i-1} + \bar{e}_i), \quad (2.29)$$

где $R_{Z(i-1)}$ — высота шероховатости; T_{i-1} — глубина дефектного слоя на предшествующей операции; $\bar{p}_{i-1}$ — векторная сумма пространственных отклонений взаимосвязанных поверхностей обрабатываемой заготовки, получившихся на предшествующей операции; $\bar{e}_i$ — векторная сумма погрешностей базирования и закрепления; k — коэффициент, учитывающий характер припуска (для односторонних припусков $k = 1$, для симметричного — $k = 2$). Автоматизация расчета припусков по этому методу затруднена из-за необходимости использования большого объема справочно-нормативной информации, особенно для определения погрешностей базирования, закрепления, пространственных отклонений в связи с большим их многообразием в зависимости от конкретных условий обработки.

Более удобным с точки зрения формализации является интегрально-аналитический метод определения припусков, которые рассчитываются по эмпирическим уравнениям следующего типа:

$$Z_{\min i} = a + bD^m + cL^n, \quad (2.30)$$

Коэффициент a представляет собой часть припуска, которую необходимо снять, чтобы удалить дефектный слой T_{i-1} и микронеровности $R_{Z(i-1)}$. Сумма $(bD^m + cL^n)$ соответствует части припуска, которая вводится для компенсации неравномерности, обусловленной пространственными отклонениями отдельных участков обрабатываемой поверхности и зависящей от габаритных размеров заготовки D и L . Коэффициенты a , b , c и показатели степени m и n определялись путем анализа и обработки справочно-нормативных таблиц операционных припусков с использованием метода наименьших квадратов. Такой подход позволил установить эмпирические зависимости типа $Z_{\min} = f(D, L)$ для определения минимальных операционных припусков для различных поверхностей и методов обработки (табл. 9—11) [6].

Таблица 9. Эмпирические формулы для расчета минимальных операционных припусков при обработке наружных поверхностей вращения

Код операции	Наименование операции	Вид зависимости $Z_{\min} = f(D, L)$, мм
1	Черновая токарная	Горячая штамповка $Z_{\min} = 0,2 + 0,684D^{0,168} + 0,0235L^{0,7}$, прокат обычной точности $Z_{\min} = 0,155 + 0,527D^{0,168} + 0,0181L^{0,7}$, прокат повышенной точности $Z_{\min} = 0,124 + 0,383D^{0,168} + 0,0132L^{0,7}$, литье в песчаные формы $Z_{\min} = 2,03D^{0,2} - 2,51$, литье в кокиль $Z_{\min} = 1,9D^{0,1} - 1,42$, литье в оболочковые формы $Z_{\min} = 1,72D^{0,1} - 1,28$
2	Получистовая токарная	$Z_{\min} = 1,01D^{0,1} + 0,0007L - 0,821$
3	Чистовая токарная	$Z_{\min} = 0,16 + 0,013D^{0,5} + 0,00074L$
4	Черновая шлифовальная	$Z_{\min} = -0,0127 + 0,0713D^{0,15} + 0,00021L$
5	Тонкая токарная	$Z_{\min} = 0,133 + 0,00435D^{0,5} + 0,000248L$
6	Однократное шлифование	$Z_{\min} = -0,019 + 0,107D^{0,15} + 0,00032L$
8	Чистовая шлифовальная	$Z_{\min} = -0,0064 + 0,0356D^{0,16} + 0,00011L$
9	Тонкая шлифовальная	$Z_{\min} = -0,0011 + 0,021D^{0,15} + 0,000043L$
10	Полировальная	$Z_{\min} = 0$
11	Накатная	
12	Суперфинишная	

Таблица 10. Эмпирические формулы для расчета минимальных операционных припусков при обработке внутренних поверхностей вращения

Код операции	Наименование операции	Вид зависимости $Z_{\min} = f(D, L)$, мм
1	Черновое растачивание	Горячая штамповка $Z_{\min} = 0,22 + 0,5D^{0,16} + 0,022L^{0,7}$
2	Рассверливание	литье в песчаные формы $Z_{\min} = 2,03L^{0,2} - 2,51$
3	Черновое зенкерование	литье в кокиль $Z_{\min} = 1,9L^{0,1} - 1,42$, литье в оболочковые формы $Z_{\min} = 1,72L^{0,1} - 1,28$

Продолжение табл. 10

Код операции	Наименование операции	Вид зависимости $Z_{\min} = f(D, L)$, мм
4	Получистовое растачивание	$Z_{\min} = 1,52D^{0,1} - 1,33$
5	Чистовое зенкерование	$Z_{\min} = 0,191D^{0,32}$
6	Чистовое растачивание	$Z_{\min} = 0,22 + 0,052D^{0,5}$
7	Черновое шлифование	$Z_{\min} = 0,044D^{0,3}$
8	Черновое развертывание	$Z_{\min} = 0,044D^{0,3}$
9	Тонкое растачивание	$Z_{\min} = 0,022D^{0,3}$
11	Чистовое шлифование	
12	Тонкое развертывание	
10	Чистовое протягивание	$Z_{\min} = 0,001D^{1,25} + 0,327$
14	Тонкое шлифование	$Z_{\min} = 0,01D^{0,3}$
17	Тонкое развертывание	$Z_{\min} = 0,01D^{0,3}$
13	Хонингование	$Z_{\min} = 0$
14	Притирка	
16	Калибрование шариком	

Таблица 11. Эмпирические формулы для расчета минимальных операционных припусков при обработке плоских поверхностей

Код операции	Наименование операции	Вид зависимости $Z_{\min} = f(L, L_1)$, мм
1	Черновое фрезерование	Штамповка, литье в песчаные формы $Z_{\min} = 0,00164L_1 + 0,875$
2	Черновое строгание	литье в кокиль $Z_{\min} = 0,0011L_1 + 0,683$, литье в оболочковые формы $Z_{\min} = 0,00082L_1 + 0,613$, литье по выплавляемым моделям $Z_{\min} = 0,011L_1 + 0,383$
3	Чистовое фрезерование	$Z_{\min} = 0,001L + 0,4$
4	Чистовое строгание	
5	Предварительное шлифование	
7	Тонкое фрезерование	$Z_{\min} = 0,000548L + 0,0918$
8	Тонкое строгание	
6	Предварительное протягивание	$Z_{\min} = 0,00182L + 0,0918$
9	Отделочное протягивание	$Z_{\min} = 0,00053L + 0,0918$
10	Чистовое шлифование	$Z_{\min} = 0,00035L + 0,05$
11	Тонкое фрезерование	$Z_{\min} = 0,0004L + 0,07$
12	Тонкое строгание	
15	Тонкое шлифование	$Z_{\min} = 0,00023L + 0,0261$
13	Притирка	
14	Полирование	$Z_{\min} = 0,000041L + 0,00917$

Код операции	Наименование операции	Вид зависимости $Z_{\min} = f(L, L_1)$, мм
17	Виброполирование	
16	Вибронакатывание	$Z_{\min} = 0$.

При общем подходе к задаче выбора оптимальных припусков с целью обеспечения в процессе обработки заготовки требуемого качества поверхности и точности при минимальной себестоимости изготовления детали возникает необходимость анализа различных вариантов маршрутов обработки элементарных поверхностей. Применительно к таким поверхностям удобно использовать ранее рассмотренное понятие стадий обработки, под которыми понимаются укрупненные группы операций, включающие однородную по характеру, точности и качеству обработку элементарных поверхностей. Для элементарных поверхностей обычно стадия обработки совпадает с операцией или проходом. Причем одни и те же характеристики качества детали обеспечиваются различными операциями в пределах одной стадии (табл. 12—14) [6].

Для достижения определенной точности и шероховатости обрабатываемой поверхности детали существуют различные элементарные технологические маршруты. Для их описания наиболее удобно использовать теорию графов. В этом случае технологический маршрут обработки элементарной поверхности представляют в виде графа, в котором вершинам сопоставлены характеристики точности и шероховатости, соответствующие определенной стадии обработки, а ребрам — коды операций согласно табл. 12—14. На основе общих правил проектирования маршрутов обработки определенного типа элементарной поверхности были построены графы технологических маршрутов

Таблица 12. Массив операций обработки наружных поверхностей вращения

Стадия обработки	Наименование операции	Код операции	Точность, квали-тет	Параметр шероховатости, мкм	
				R_z	R_a
1	Черновая токарная	1	14	160	—
2	Получистовая токарная	2	12	60	—
3	Чистовая токарная	3	10	—	2,5
	Черновая шлифовальная	4	10	—	2,5
4	Тонкая токарная	5	7	—	0,8
	Однократное шлифование	6	7	—	1,25
5	Чистовая шлифовальная	8	7	—	0,63
6	Тонкая шлифовальная	9	6	—	0,25
7	Полировальная	10	6	—	0,04
	Накатная	11	5	—	0,16
	Суперфинишная	12	5	—	0,08

Таблица 13. Массив операций обработки внутренних поверхностей вращения

Стадия обработки	Наименование операции	Код операции	Точность, квали-тет	Параметр шероховатости, мкм	
				R_z	R_a
1	Черновое растачивание	1	14	80	—
	Рассверливание	2	12	63	—
	Черновое зенкерование	3	12	30	—
2	Получистовое растачивание	4	12	20	—
	Чистовое зенкерование	5	11	—	3,2
3	Чистовое растачивание	6	10	—	2,0
	Черновое шлифование	7	10	—	3,2
	Черновое развертывание	8	10	—	2,5
4	Тонкое растачивание	9	8	—	0,8
	Чистовое протягивание	10	8	—	0,63
	Чистовое шлифование	11	8	—	0,63
	Тонкое развертывание	12	8	—	0,63
5	Хонингование	13	6	—	0,08
	Тонкое шлифование	14	6	—	0,16
	Притирка	15	6	—	0,08
	Калибрование шариком	16	7	—	0,16
	Тонкое развертывание	17	6	—	0,32

Таблица 14. Массив операций обработки плоских поверхностей

Стадия обработки	Наименование операции	Код операции	Точность, квали-тет	Параметр шероховатости, мкм	
				R_z	R_a
1	Черновое фрезерование	1	12	80	—
	Черновое строгание	2	12	80	—
2	Чистовое фрезерование	3	10	—	2,5
	Чистовое строгание	4	10	—	2,5
	Предварительное шлифование	5	9	—	1,6
3	Предварительное протягивание	6	8	—	1,6
	Тонкое фрезерование	7	7	—	0,8
	Тонкое строгание	8	7	—	0,8
4	Отделочное протягивание	9	6	—	0,32
	Чистовое шлифование	10	7	—	0,63
	Тонкое фрезерование	11	6	—	0,32
	Тонкое строгание	12	6	—	0,32
5	Притирка	13	5	—	0,08
	Полирование	14	5	—	0,08
	Тонкое шлифование	15	5	—	0,08
	Вибронакатывание	16	5	—	0,16
	Виброполирование	17	5	—	0,05

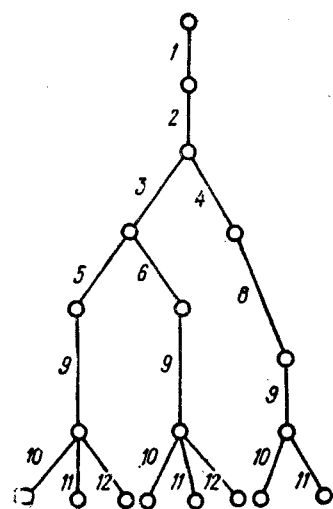
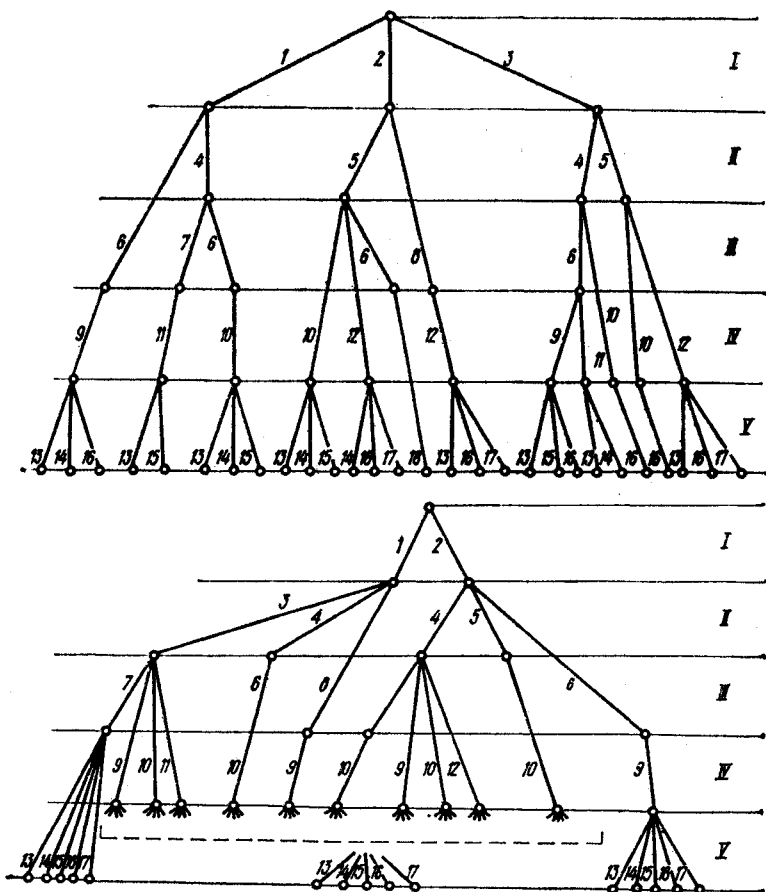


Рис. 10. Граф возможных вариантов элементарных технологических процессов обработки наружных поверхностей вращения.

Рис. 11. Граф возможных вариантов элементарных технологических процессов обработки внутренних поверхностей вращения.

Рис. 12. Граф возможных вариантов элементарных технологических процессов обработки плоских поверхностей.



обработки наружных, внутренних поверхностей вращения и плоских поверхностей (рис. 10—12) [6]. Анализ этих графов показывает, что для каждого типа элементарной поверхности существует различное число маршрутов обработки. Применительно к приведенным графам для наружных поверхностей можно синтезировать 8 маршрутов, для внутренних — 32 и для плоских поверхностей — 60. При этом встает задача выбора возможных вариантов маршрутов обработки и из них одного, для которого величина припуска будет минимальной.

Наиболее компактной формой математического представления графов возможных ТП при составлении алгоритмов программ является матричная форма записи. Например, граф, представленный на рис. 13, а, будет записан в виде двумерной матрицы (рис. 13, б).

Поиск возможных вариантов технологических процессов начинается с просмотра матрицы по строкам. Анализ нулевой строки показывает, что после заготовки ($I = 0$) будет выбрана первая операция — черновая токарная ($I = 1$). Далее переходим к просмотру первой строки матрицы. Снова анализируем строку и видим, что будет выбрана вторая операция — получистовая токарная ($I = 2$). Просматривается вторая строка. В этом случае может выбираться операция третья — чистовая токарная ($I = 3$) и четвертая — шлифовальная ($I = 4$). Если выбирается третья операция, то переходим к просмотру третьей строки, если выбирается четвертая, то пропускается третья строка и анализируется сразу четвертая и т. д. После выбора каждой операции идет сравнение качества, достигаемого на выбранной операции E_i с требуемым качеством детали $E_{тр}$, где E_i —

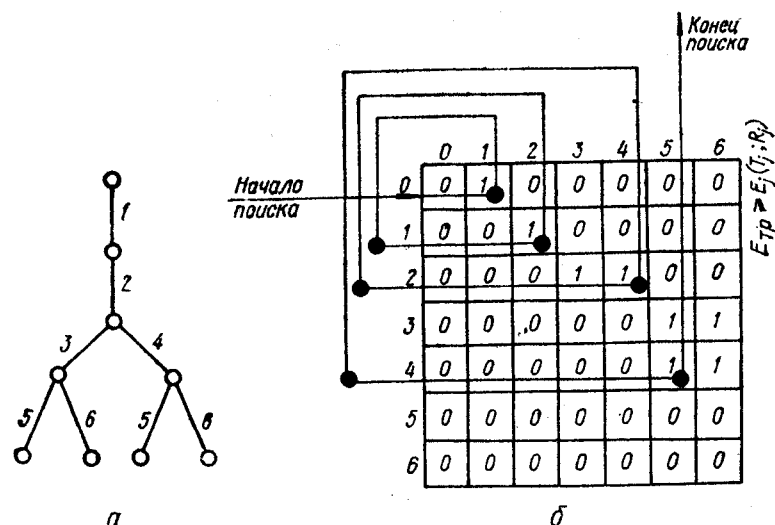


Рис. 13. Способы представления маршрутов обработки элементарной наружной поверхности вращения:

а) в виде графа; б) в виде матрицы, поле которой заполнено цифрами 0 и 1 (0 — операция не выбирается, 1 — операция выбирается). Ребра графа (а), столбцы и строки матрицы (б) соответствуют следующим операциям:
1 — черновая токарная; 2 — получистовая токарная; 3 — чистовая токарная; 4 — шлифовальная; 5 — тонкая шлифовальная; 6 — суперфинишная.

комплексный показатель качества заготовки после I -й операции, $E_{тр}$ — комплексный показатель требуемого качества детали. Если качество поверхности, достигаемое на I -й операции, удовлетворяет необходимым требованиям $E_{тр} \geq E_i$, то дальнейший выбор операции не производится и выдается один из возможных вариантов ТП обработки. В качестве исходных данных при решении рассматриваемой задачи используются общие сведения о детали (материал, габаритные размеры, вид термообработки), размеры, точность и шероховатость обрабатываемой поверхности, тип заготовки и др.

При решении многих технологических задач на ЭВМ в настоящее время преимущественно используется диалоговый режим проектирования. В этих случаях исходя из особенностей процесса проектирования конкретного объекта и возможностей формализации отдельных его этапов предварительно составляется схема проектирования в диалоговом режиме, в которой заранее определяется круг задач, решаемых инженером-проектировщиком (технологом) и ЭВМ с соответствующим набором периферийных устройств. При этом технолог решает наиболее трудноформализуемые задачи, такие, как оценка результатов и выбор оптимальных решений, управление процессом проектирования, а также ввод исходных данных (рис. 14).

Общий алгоритм проектирования элементарных технологических процессов, расчетов припусков и операционных размеров в диалоговом режиме наиболее удобно представить в виде блок-схемы (рис. 15). В зависимости от заданной точности и шероховатости поверхности детали определяется конечная стадия STMAX (оператор 2), а в зависимости от вида заготовки и ее точности — начальная стадия STMIN (оператор 5) процесса обработки. После этого на основе анализа графа технологического маршрута обработки (рис. 10—12) с усеченными вершинами или данных табл. 12—14 формируется множество M возможных маршрутов $\langle M_1, M_2, \dots, M_N \rangle$. Далее производятся их последовательный анализ и расчет. Для этого на экран дисплея выводится маршрут обработки рассматриваемой поверхности (оператор 8). Если предлагаемый маршрут принимается, то производится расчет операционных припусков и размеров (оператор 11) по специальной подпрограмме, алгоритм которой будет рассмотрен ниже. Результаты проектирования выводятся на экран дисплея и после их анализа принимается решение о выборе оптимального варианта (операторы 12, 13). В тех случаях, когда проектировщик отвергает предлагаемый I -й вариант маршрута обработки (оператор 9 и 13), на экран дисплея выдается $(I + 1)$ -й вариант, для которого аналогично проводятся анализ и расчет операционных припусков и размеров.

Отдельно рассмотрим для примера частный алгоритм расчета минимальных операционных припусков и размеров для наружных поверхностей вращения, входящий в состав оператора 11 (рис. 15). Этот алгоритм также наиболее удобно представить в виде блок-схемы (рис. 16). В данном случае в качестве исходной информации используется ранее принятый технологический маршрут, с учетом которого рассчитываются припуски для всех операций. Процесс вычисления припусков начинается с последней k -й операции маршрута обработки

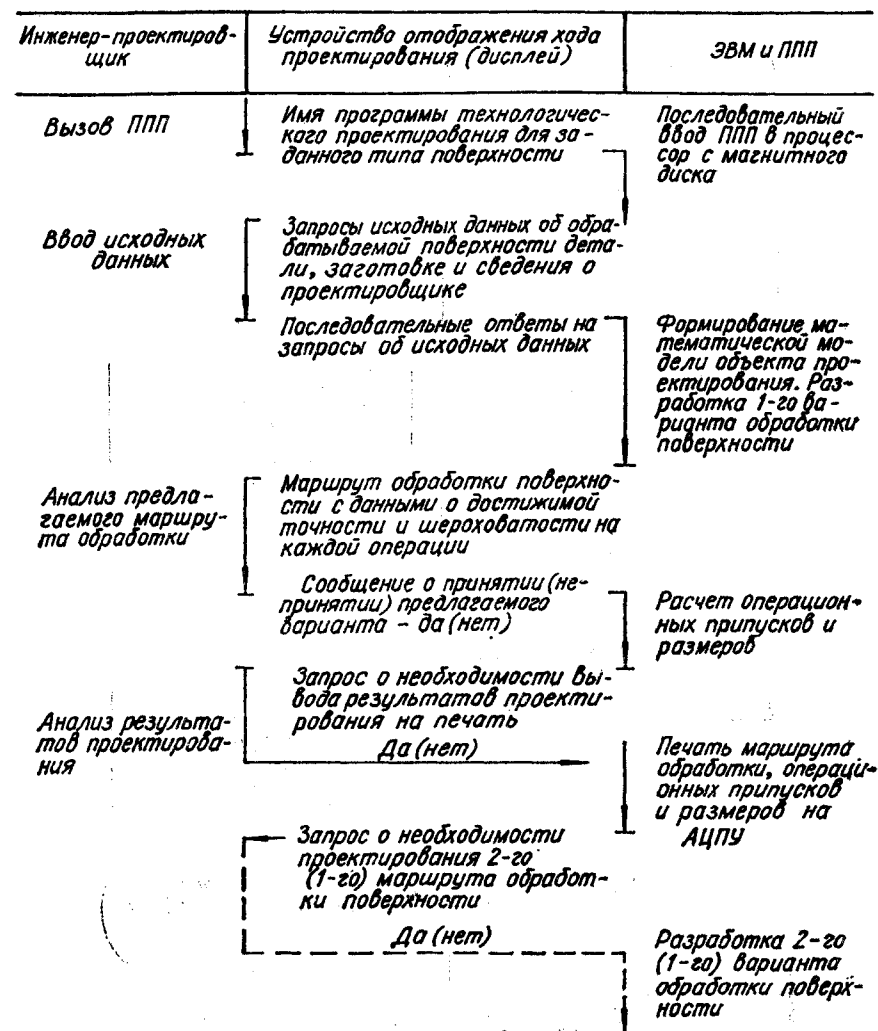


Рис. 14. Схема процесса проектирования маршрута обработки, расчетов припусков и операционных размеров в диалоговом режиме.

элементарной поверхности. Первоначально определяется минимальный диаметр детали после выполнения k -й операции $D_{\min k}$ (оператор 2). Затем определяется припуск $Z_{\min i}$ для i -й операции по зависимостям из табл. 9 (оператор 4). Расчет величин допуска δ_i для операционных размеров при выполнении различных операций производится по специальной подпрограмме (оператор 5) по известным зависимостям [28]. После определения $D_{\max i}$ (оператор 6) проверяется количество рассчитанных операций, и если $I > 1$, то происходит переход к $(I - 1)$ -й операции и цикл повторяется. Процесс вычисления

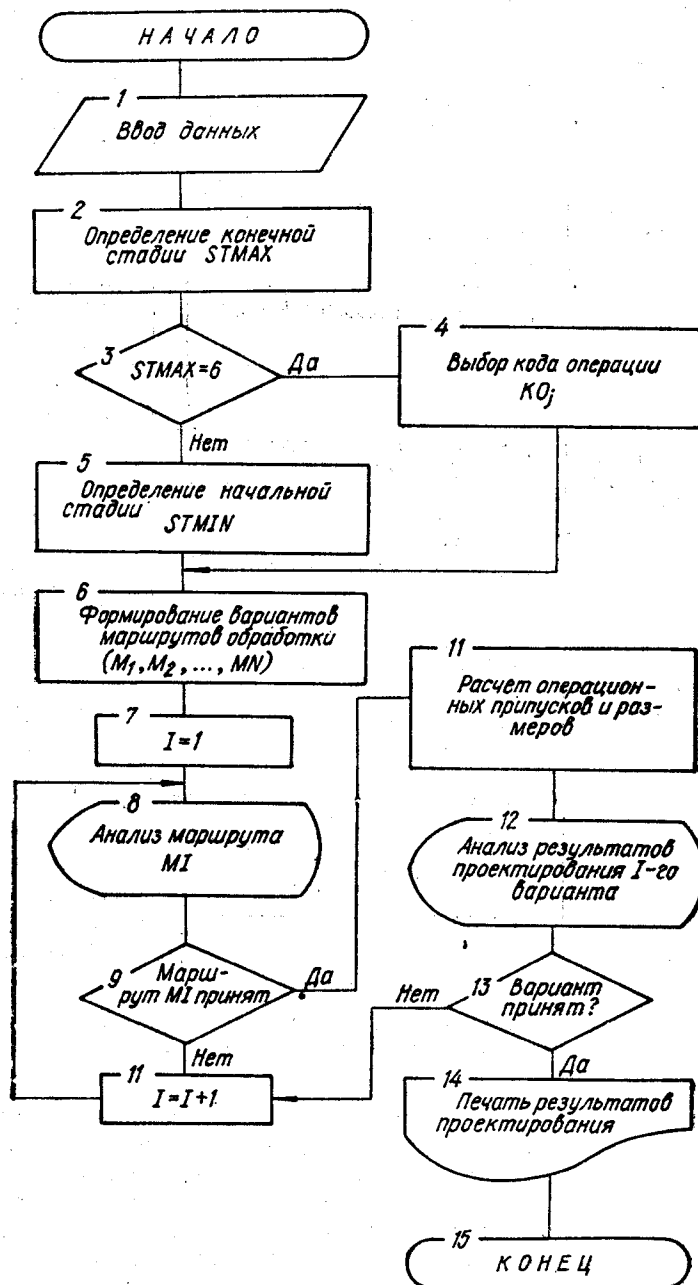


Рис. 15. Алгоритм выбора элементарных технологических процессов.

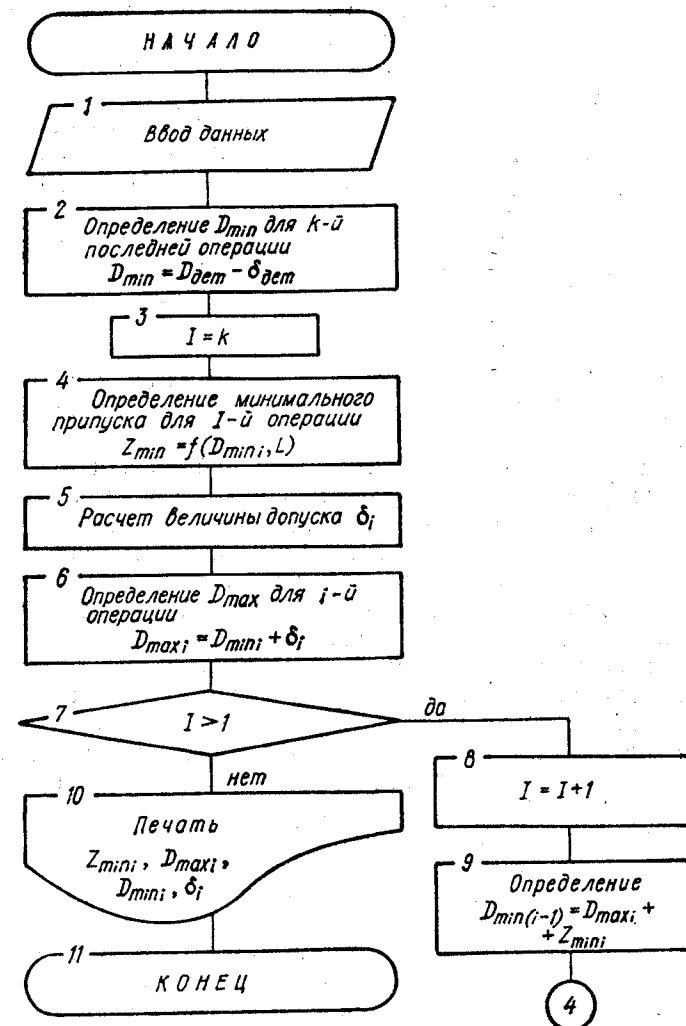


Рис. 16. Алгоритм расчета минимальных операционных припусков и размеров.

заканчивается выводом на печать в форме специальных бланков значений $Z_{\min i}$, $D_{\max i}$, $D_{\min i}$, δ_i — для всех принятых операций маршрута обработки элементарной поверхности.

5. Выбор технологических операций

Одним из наиболее важных этапов структурной оптимизации ТП является выбор технологических операций механической обработки. Вид операции и применяемое оборудование существенно влияют на трудоемкость обработки и связанную с ней технологическую себесто-

имость. Последний показатель обычно используется в качестве критерия для выбора вариантов изготовления изделий. Технологическая себестоимость в рассматриваемой задаче может определяться уточненным способом, который базируется на расчете величины расходов по каждому элементу технологической себестоимости операции, различающемуся по сопоставляемым вариантам, и приближенным способом на основании укрупненных затрат, приходящихся на час работы оборудования и рабочих мест.

При расчетах на стадии эскизного проектирования при выборе операции механической обработки технологическая себестоимость определяется приближенно по следующей формуле:

$$C_{оп i} = C_{ч i} t_{шт.к i}, \quad (2.31)$$

где $C_{ч i}$ — норматив приведенных производственных затрат, приходящихся на 1 ч работы оборудования, занятого при выполнении i -й операции.

Как показывает анализ зависимости, ее минимизацию за счет одновременного уменьшения удельных производственных затрат на оборудование $C_{ч i}$ и штучно-калькуляционного времени обработки $t_{шт.к i}$ осуществить, как правило, невозможно, так как использование более высокопроизводительного оборудования приводит к уменьшению $t_{шт.к i}$ при одновременном росте удельных расходов на его содержание и эксплуатацию. Очевидно, что из ряда сравниваемых вариантов обработки оптимальным будет тот, при осуществлении которого рост производительности превысит рост удельных затрат.

Таким образом, задача определения технологической себестоимости обработки сводится к решению двух взаимосвязанных подзадач: определению возможных для заданных условий вариантов обработки детали с выбором соответствующих моделей станков и величины $C_{ч i}$ на 1 ч их работы; определению трудоемкости обработки $t_{шт.к i}$ применительно к выбранным видам технологических операций.

Выбор возможных для заданных условий операций обработки поверхностей детали производится на основе анализа конструктивно-технологических признаков, к которым относятся следующие: тип поверхностей детали, подлежащих обработке; стадии обработки (черновая, чистовая, тонкая, отделочная); габаритные размеры детали; точность и шероховатость поверхностей для рассматриваемой стадии обработки; твердость поверхностей, обрабатываемых на рассматриваемой стадии; конструктивная сложность поверхностей, обрабатываемых на соответствующей стадии; годовая программа выпуска деталей.

По общности методов, используемых при обработке, все поверхности, образующие конфигурацию деталей машин, разбиты на группы. Как правило, на начальных этапах проектирования технологических процессов решаются вопросы выбора рациональных способов обработки групп однородных поверхностей — наружных поверхностей вращения, внутренних, плоских, зубчатых, резьбовых, шлицевых и т. д. Такое группирование позволяет использовать единую методическую основу для укрупненной оценки эффективности различных методов

Таблица 15. Выбор стадий обработки наружных поверхностей вращения в зависимости от требований по точности и шероховатости

Стадия обработки	Код стадии	Достижимые качества $R_a (R_z)$, мкм			
		12/(80)	10/(20)	7/0,63	6/0,16 и менее
Черновая	1	1	1	1	1
Чистовая	2	—	2	2	2
Тонкая	3	—	—	3	3
Отделочная	4	—	—	—	4

обработки уже на ранних этапах проектирования, когда у технолога еще отсутствует вся необходимая информация для точной оценки трудоемкости обработки.

Далее рассматривается выбор конструктивно-технологических признаков для определения возможных вариантов обработки на примере наружных и торцовых поверхностей вращения деталей класса «валы» с $L > 2D$. Применительно к этому классу деталей их общая конфигурация определяется различным числом элементарных наружных поверхностей вращения. В зависимости от требований чертежа детали каждая поверхность должна пройти ряд стадий обработки, под которыми понимаются укрупненные группы операций, включающие однородную по характеру, точности и качеству обработку элементарных поверхностей. Стадии обработки могут выбираться на основе алгоритма, представленного в виде табл. 15.

Габаритные размеры детали, точность и шероховатость поверхностей, а также твердость указываются на чертеже и принимаются в качестве исходных данных. Значительно большую трудность представляет определение конструктивной сложности обрабатываемых поверхностей.

Конструктивная сложность детали — это сложность ее как геометрического тела. Количественная ее оценка может быть выражена общим числом поверхностей, обрабатываемых на i -й стадии. Для каждой стадии обработки следует различать основные поверхности (P), образующие основной контур детали (для валов P — это число ступеней), торцовые (MT) и дополнительные поверхности M (фаски, галтели, пазы), образующие как бы рельеф на основном контуре.

Конструктивная сложность определяется по исходным данным чертежа и может быть представлена некоторой функциональной зависимостью в виде суммы всех обрабатываемых поверхностей. Учитывая разную трудоемкость обработки основных и дополнительных поверхностей вследствие отличия их размеров и точности обработки на основе статистического анализа наиболее типовых деталей класса «валы», получена зависимость для определения конструктивной сложности рассматриваемых деталей, приведенной к трудоемкости обработки основных поверхностей на i -й стадии в следующем виде:

$$Q_i = P_i + 0,5MT_i + 0,1M_i. \quad (2.32)$$

Одним из важнейших признаков, от которого зависит правильный выбор вида технологической операции, ее структуры и соответствующего ей оборудования, является серийность или тип производства. В соответствии с ГОСТ 14.004—82 тип производства определяется по коэффициенту закрепления операции $k_{з.о.}$, который описывается отношением числа всех различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест. В свою очередь, $k_{з.о.}$ главным образом зависит от заданной программы выпуска деталей и трудоемкости ее изготовления $t_{шт.к.}$.

Вычисление на ранних стадиях технологического проектирования значения $t_{шт.к.}$ представляет определенную трудность. Учитывая, что на этой стадии не может быть получен операционный ТП, содержащий необходимые сведения для расчета норм времени, необходимо использовать методы укрупненного нормирования. В рассматриваемом случае приняты наиболее укрупненные методы с выявлением функциональных зависимостей между штучно-калькуляционным временем и наиболее общими параметрами детали, учитывающими ее конструктивную сложность Q и размерные характеристики. Для определенных типов деталей размерные характеристики имеют корреляционную связь с массой детали M_d . На основе статистического анализа процессов обработки различных классов деталей установлены функциональные зависимости следующего вида:

$$t_{шт.к.} = k_1 M_d^{\alpha} Q^{\beta}. \quad (2.33)$$

Таблица 16. Выбор кода типа производства

Коэффициент закрепления операции	Тип производства	Код
$k_{з.о.} > 20$	Единичное и мелкосерийное	1
$10 < k_{з.о.} \leq 20$	Серийное	2
$1 < k_{з.о.} \leq 10$	Крупносерийное	3
$k_{з.о.} \leq 1$	Массовое	4

Таблица 17. Алгоритм кодов технологических операций по обработке наружных поверхностей вращения валов

Стадия обработки и код															
Черновая (1)				Черновая (2)				Тонкая (3)				Отделочная (4)			
Серийность производства															
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Коды операций															
009	010	012	012	009	012	012	012	021	021	103	104	102	102	103	109
010	013	013	013	010	013	013	013	011	011	105	105	103	103	109	127
014	014	022	022	014	014	022	022	101	101	106	106	018	123	127	129
				101	101	103	104	103	103	107	019	019	129		
				103	103						023				

Используя известные зависимости для определения числа операций, закрепляемых за одним рабочим местом с учетом коэффициента загрузки и коэффициента выполнения норм времени ($k_n = 1,3$) для двухсменной работы, применительно к обработке наружных поверхностей вращения деталей класса «валы» получено

$$k_{з.о.} = \frac{46,2 \cdot 10^8}{NM_d^{0,36} Q^{0,51}}.$$

Далее на основе рассчитанных значений $k_{з.о.}$ для конкретной детали тип производства определяется по табл. 16. Если тип производства заранее известен, то его код, согласно табл. 16, может быть введен при автоматизированном проектировании в ЭВМ в диалоговом режиме.

При выборе оптимальной технологической операции возникает задача генерации или составления возможных видов операций применительно к обработке конкретных поверхностей, заданной стадии и серийности производства. Для решения этой задачи на основе производственного опыта и анализа литературных данных по видам и возможностям различных методов обработки составлена

таблица соответствия выбора видов технологических операций (табл. 17). В ней для черновой, чистовой, тонкой и отделочной стадий и для различной серийности производства представлены коды возможных технологических операций согласно табл. 18.

Нетрудно заметить, что для определенных стадий обработки и серийности производства имеется возможность выбрать для анализа от трех до пяти видов операций, которые отличаются между собой главным образом структурой. Структуры технологической операции могут быть одно- и многоинструментальными, одно- и многопозиционными, прерывными и непрерывными [54]. Это многообразие структур технологических операций существенно отличается по производительности

Таблица 18. Выбор кода структуры технологических операций обработки наружных поверхностей вращения валов

Код операции	Наименование операции	Код структуры
009	Токарно-винторезная	1
010	Токарная с ЧПУ центровая	2
011	Токарно-винторезная высокой точности	1
012	Токарная полуавтоматная многошпиндельная одношпиндельная	4
013	Токарно-копировальная	3
014	Токарная с ЧПУ патронно-центровая	2
018	Токарная обкатная	1
019	Токарная выглаживательная	1
021	Токарная с ЧПУ высокой точности	2
022	Токарная полуавтоматная многошпиндельная многошпиндельная непрерывного действия	5
101	Круглошлифовальная продольная	1
102	Круглошлифовальная продольная высокой точности	1
103	Круглошлифовальная с ЧПУ	2
104	Круглошлифовальная врезная полуавтоматная многошпиндельная	7
105	Круглошлифовальная врезная полуавтоматная	10
106	Торцекруглошлифовальная врезная полуавтоматная	6
107	Бесцентровошлифовальная	8
109	Бесцентроводоводочная	8
123	Доводочно-притирочная	1
127	Суперфинишная	9
129	Полировальная лепестковыми кругами	9
128	Алмазно-выглаживательная	1

и себестоимости обработки, что связано с их влиянием на трудоемкость обработки. Образование структур технологических операций может вестись в двух направлениях: за счет совмещения элементов основного времени t_o (последовательная, параллельно-последовательная и параллельная обработки); за счет совмещения элементов вспомогательного времени $t_b = t_{из} + t_{с.у} + t_x$, затрачиваемого на измерение и ручную подналадку оборудования методом пробных проходов ($t_{из}$), на сьем и установку деталей ($t_{с.у}$), на выполнение холостых ходов (t_x).

Применительно к обработке наружных и торцовых поверхностей вращения деталей класса «валы» выделены и закодированы структуры технологических операций (табл. 19), которые характеризуют все

Таблица 19. Структуры технологических операций обработки наружных поверхностей вращения

Характеристика структуры операций	Код структуры
Последовательная обработка методом пробных проходов и промеров, ручное управление станком, ручное закрепление заготовки, однопозиционная (универсальные станки)	1
Последовательная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (станки с ЧПУ)	2
Последовательно-параллельная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (гидрокопировальные станки)	3
Параллельная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (многолезцовые полуавтоматы)	4
Параллельная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, многопозиционная (многошпиндельные полуавтоматы непрерывного действия)	
Параллельно-последовательная обработка врезанием по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (торцекрышшлифовальные врезные полуавтоматы)	6
Параллельная обработка врезанием по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (многокаменные шлифовальные врезные полуавтоматы)	7
Последовательная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, автоматизированное закрепление заготовки, непрерывная (бесцентровошлифовальные станки)	8
Последовательная обработка по настройке, ручное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (суперфинишные, полировальные станки)	9
Последовательная обработка врезанием, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (круглошлифовальные врезные полуавтоматы)	10

Таблица 20. Выбор кодов моделей станков для токарно-винторезной операции

D, мм не более	L, мм не более			
	250	500	700	1400
40	001	001	002	002
100	001	011	002	002
160	001	001	002	002
300	003	003	003	003

Таблица 21. Массив характеристик токарно-винторезных станков MST

Код станка	Модель станка	Габаритные размеры, м	Цена, руб.	Приведенные часовые затраты, к/ч
001	1M61	2,05×1,1	1890	128,2
002	1K62	3,2×1,2	5620	206,6
003	1M63	3,5×1,7	6220	218,2
...	...	...	...	...

возможные, ранее описанные в табл. 18, операции обработки рассматриваемого типа поверхностей. Эти операции разделены на две группы и закодированы трехзначным кодом. Первая включает коды 001...099, соответствующие операциям с использованием традиционного лезвийного инструмента и обеспечивающим обработку незакаленных материалов. На операциях с кодами более 100 обработка осуществляется абразивным, алмазным (в том числе и лезвийным из синтетических сверхтвердых материалов) инструментом, в связи с чем возможна обработка как закаленных, так и незакаленных материалов. Черновая и чистовая обработки производятся на станках нормальной (или повышенной) точности, тонкая и отделочная — на станках высокой точности.

Следующей задачей, которая должна быть решена, является выбор моделей станков для принятой группы возможных операций. Эта процедура выполняется на основе анализа массива станков MST. Определение конкретной модели станка производится с использованием таблиц выбора решений с учетом вида операции и габаритных размеров обрабатываемой детали. В качестве примера может быть показана одна из таких таблиц для выбора моделей станков для токарно-винторезной операции (табл. 20).

По коду станка из массива определяются его габаритные размеры, стоимость и приведенные часовые затраты $c_{чi}$ (табл. 21, фрагмент). Выбор оптимальной технологической операции, как уже отмечалось, предшествует попереходному проектированию операции с определением режимов резания. Это приводит к тому, что в рассматриваемой задаче не могут быть использованы точные методы микроэлементного или элементного нормирования. Однако на этом этапе представляется возможным использовать более точные методы укрупненного нормирования по сравнению с формулой (2.33). Структура таких нормативов должна быть максимально приближена к норме штучного времени и представлена в виде зависимостей, включающих минимальное число факторов. Степень укрупнения нормативов определяет их универсальность и относительную точность, поэтому в каждом конкретном случае приходится отыскивать оптимальную сложность их структуры.

Известно, что трудоемкость выполнения операций по обработке детали может быть представлена в виде суммы элементов норм времени

$$t_{шт.к} = (t_{о.р} + t_{о.м}) + t_b + t_{с.у} + t_{обс} + T_{п.з}/N, \quad (2.34)$$

Т а б л и ц а 22. Коэффициенты режимов резания k_p

Стадия обработки	Метод обработки	k_p
Черновая	Точение	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Чистовая	Точение	$0,175 \cdot 10^{-3}$
	Шлифование	$0,12 \cdot 10^{-3}$
Тонкая	Точение	$0,2 \cdot 10^{-3}$
	Шлифование	$0,18 \cdot 10^{-3}$
Отделочная	Шлифование	$0,3 \cdot 10^{-3}$
	Доводка	$0,8 \cdot 10^{-3}$
	Суперфиниширование	$0,35 \cdot 10^{-3}$
	Обкатывание	$0,1 \cdot 10^{-3}$
	Выглаживание	$0,45 \cdot 10^{-3}$
	Полирование лепестковыми кру-гами	$0,3 \cdot 10^{-3}$

где $(t_{o,p} + t_{o,m})$ — основное время обработки соответственно основных и вспомогательных поверхностей.

В условиях укрупненного нормирования основное время обработки отдельных цилиндрических поверхностей может определяться по эмпирическим зависимостям вида

$$t_o = k_p k_m D L, \quad (2.35)$$

где D , L — соответственно диаметр и длина обрабатываемой поверхности; k_p — коэффициент, отражающий среднестатистический уровень режимов различных методов и стадий обработки поверхностей детали из стали 45 стандартным инструментом

(табл. 22), k_m — коэффициент материала, учитывающий отличие обрабатываемости данного материала от обрабатываемости стали 45. В зависимости от вида обработки различают коэффициент $k_{m,l}$ для лезвийного инструмента и $k_{m,a}$ для абразивного.

В результате статистического анализа норм времени технологических операций изготовления валов и с учетом формулы (2.35) установлена следующая зависимость для определения времени обработки основных поверхностей детали в целом для отдельной операции:

$$t_{o,p} = k_p k_m k_3 k_{tr} D_{np} \sum_{i=1}^p L_i,$$

где k_3 — коэффициент, учитывающий дополнительное время, которое необходимо затратить, чтобы придать принятой заготовке форму и размеры унифицированной заготовки. В качестве этой заготовки для ступенчатых валов принята штамповка нормальной точности. Этот коэффициент вводится в расчет только на черновой стадии обработки и определяется в зависимости от соотношения массы заготовки $M_{заг}$ и детали M_d по формуле $k_3 = 0,787 \left(\frac{M_{заг}}{M_d} \right)^{0,67}$; k_{tr1} — коэффициент трудоемкости по основному времени обработки основных поверхностей, учитывающий вид структуры выполняемой операции (табл. 19); D_{np} — приведенный диаметр основных поверхностей, определяемый по формуле

$$D_{np} = \sum_{i=1}^p D_i L_i / \sum_{i=1}^p L_i.$$

Аналогично получены зависимости для остальных элементов нормы времени, входящие в формулу (2.34)

$$\begin{aligned} t_{o,m} &= k_m k_{tr2} D_{np} M \cdot 10^3, \\ t_{c,y} &= k_{tr3} (0,44 + 0,4 M_d), \\ t_b &= 0,666 k_{tr4} D_{np}^{0,277} L_d Q^{0,854}, \\ t_{обс} &= k_{tr5} (t_{o,p} + t_{o,m} + t_{c,y} + t_b), \\ T_{п.з} &= 22 k_{tr6}, \end{aligned}$$

где k_{tr2} , k_{tr3} , k_{tr4} , k_{tr5} , k_{tr6} — коэффициенты трудоемкости соответственно по основному времени обработки дополнительных поверхностей, времени на снятие и установку заготовки, вспомогательного времени на выполнение операции, времени на обслуживание станка и отдых и подготовительно-заключительного времени в зависимости от структуры операции (табл. 23).

Для определения штучно-калькуляционного времени $t_{шт.к}$ по формуле (2.34) для условий серийного производства необходимо дополнительно определить величину партии запуска заготовок в производство — n . Известно, что число заготовок в партии зависит от габаритных размеров детали и ее конструктивной сложности, определяемой в этом случае числом обрабатываемых поверхностей.

Т а б л и ц а 23. Коэффициенты трудоемкости по элементам норм времени

Код структуры операции	k_{tr1}	k_{tr2}	k_{tr3}	k_{tr4}	k_{tr5}	k_{tr6}
1	1,0	1,2	1,0	1,0	0,04	1,0
2	0,8	0,8	0,8	0,1	0,04	0,5
3	0,8	0	0,8	0,1	0,07	$0,68 + 0,1M$
4	$\frac{1,3L_{i\max}}{5\Sigma L_i}$	0	0,8	0,1	0,08	$0,45 + 0,22P + 0,1M$
5	$\frac{1,3L_{i\max}}{5\Sigma L_i}$	0	0	0,1	0,10	$0,45 + 1,1P + 0,5M$
6	$\frac{30P_i}{\Sigma L_i}$	0	0,8	0,1	0,125	1,0
7	$\frac{10P_i}{\Sigma L_i}$	0,3	0,8	0,1	0,125	5,0
8	$\frac{36}{D_{np}}$	0	0,1	0	0,155	1,0
9	$\frac{1,0}{30P_i}$	0	0,8	0,1	0,10	1,0
10	$\frac{30P_i}{\Sigma L_i}$	0,8	0,8	0,1	0,125	1,0

Таблица 24. Классификация деталей по габаритам

Наименование группы деталей	Размер деталей		Код
	$D_{\max}$	$L_{\max}$	
Мелкие	≤ 40	≤ 250	1
Небольшие	≤ 100	≤ 500	2
Средние	≤ 300	≤ 700	3
Крупные	> 300	> 700	4

Таблица 25. Классификация деталей по конструктивной сложности

Наименование группы деталей	Число обрабатываемых поверхностей	Код
Простейшие	≤ 3	1
Простые	≤ 20	2
Средней сложности	≤ 40	3
Сложные	> 40	4

Для упрощения построения алгоритмов определения партии запуска для деталей типа «валов» введена классификация по габаритам (табл. 24) и конструктивной сложности деталей Q' (табл. 25). Число заготовок в партии запуска определяется в долях программы годового выпуска деталей: $n = \gamma_i N_r$, где γ_i — коэффициент пропорциональности, являющийся функцией габаритов и конструктивной сложности детали, определяемый на основе регрессионного анализа и представленный в табл. 26.

При разработке алгоритма решения задачи предварительно должна быть проанализирована и систематизирована вся исходная информация, включающая общие данные о детали (наименование, материал, твердость, число основных и вспомогательных поверхностей, масса, наличие термообработки и годового объема выпуска) и об отдельных поверхностях (размеры, качество и шероховатость).

Алгоритм рассмотренной задачи выбора технологической операции представлен в виде блок-схемы на рис. 17. Программа автоматизации выбора оптимальных технологических операций для различных стадий построена на основе диалогового режима для ввода исходной информации и проектирования и предусматривает, наряду с автоматизированным решением задачи, окончательную оценку результатов проектирования проектировщиком.

6. Выбор количества и последовательности переходов в операции

Определение рационального количества и последовательности переходов для многих операций механической обработки — сложная комбинаторная задача, решение которой наиболее эффективно может

Таблица 26. Коэффициент пропорциональности γ_i

Код деталей по габаритам	Код деталей по сложности	γ_i
1	1	0,10
	2	0,09
	3	0,08
	4	0,07
2	1	0,08
	2	0,07
	3	0,06
	4	0,05
3	1	0,06
	2	0,05
	3	0,04
	4	0,03
4	1	0,035
	2	0,03
	3	0,025
	4	0,02

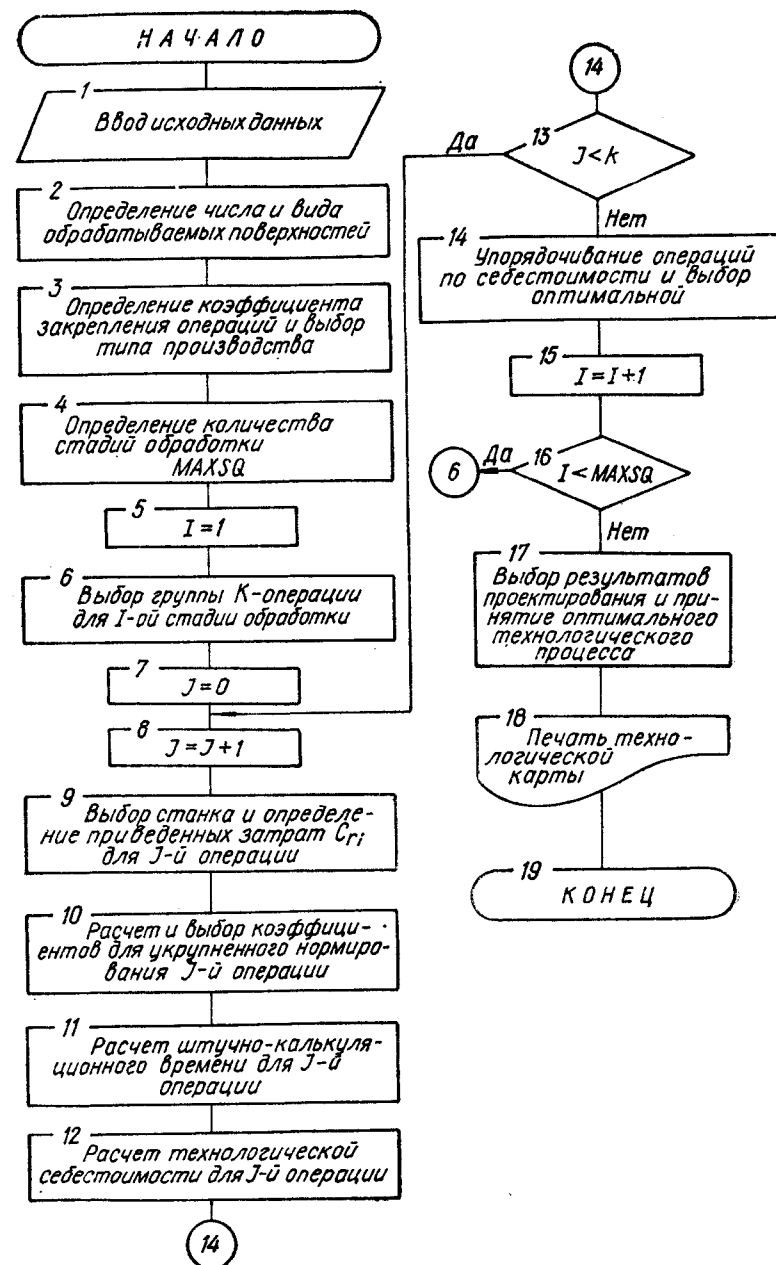


Рис. 17. Блок-схема алгоритма выбора оптимальной технологической операции.

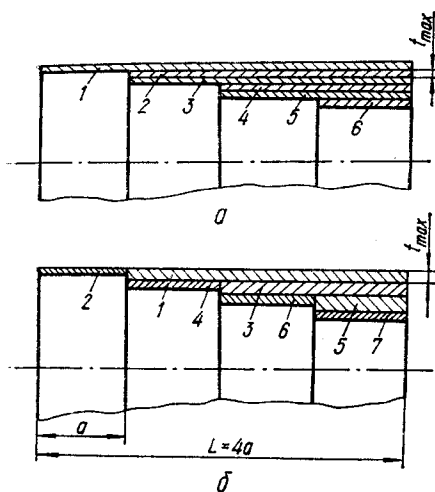


Рис. 18. Варианты последовательности обработки ступенчатых поверхностей детали.

На рис. 18 показаны два варианта последовательной обработки ступенчатых цилиндрических поверхностей. По первому варианту (рис. 18, а) производится последовательная обработка по всей длине вала, начиная от наибольшего диаметра и заканчивая наименьшим. Причем первый проход выполняется с максимально допустимой глубиной резания $t_{\max}$, а второй — с величиной, равной $t_i = Z_i - t_{\max}$, где Z_i — величина припуска на i -й ступени вала. Это выполняется при условии $t_i \leq t_{\max}$, в противном случае второй проход должен быть повторно выполнен с глубиной $t_{\max}$, а затем снят остаток припуска i -й ступени.

Наиболее прогрессивен с точки зрения теории резания второй вариант последовательности обработки (рис. 18, б). В его основе лежит выполнение максимально возможного числа переходов с глубиной резания $t_{\max}$, что обеспечивает наибольшую производительность обработки. Такой подход к решению задачи обеспечивает наименьшую длину рабочего хода, что, как известно, определяет основное время обработки.

Если принять длину всех ступеней вала $l_1 = a$, то нетрудно определить длину рабочего хода (без расчета перемещений инструмента на врезание) для рассматриваемых вариантов последовательности обработки. Для первого варианта (рис. 18, а) она будет равна $L_{\text{раб.х}} = 15a$, а для второго (рис. 18, б) — $L_{\text{раб.х}} = 10a$. Таким образом, второй вариант является более производительным в связи с меньшей в 1,5 раза длиной резания. Это соотношение зависит от числа и размеров вала и требует расчета в каждом конкретном случае.

Выбор оптимальной структуры операции, состоящей из различного количества и последовательности переходов применительно к рассмотренным схемам (без учета времени выполнения вспомогательных приемов) может быть описан в виде следующего алгоритма:

быть получено при использовании методов эвристического программирования [8]. Наиболее часто рассматриваемую задачу решают при определении оптимальной последовательности переходов обработки ступенчатых поверхностей детали (плоских, цилиндрических наружных и внутренних). Для примера будет рассмотрено построение алгоритма выбора оптимального количества и последовательности переходов в черновых токарных операциях для ступенчатых валов. При этом рассмотрим наиболее сложный случай, когда в качестве заготовки принимается горячекатаный прокат и каждая ступень вала имеет различный по величине напуск.

1. Ввод и корректировка данных о заготовке.
2. Выбор допустимого значения максимальной глубины резания $TMAX$ для рассматриваемых условий обработки (материал и вид заготовки, тип режущего инструмента и др.).
3. Определение наибольшего обрабатываемого диаметра заготовки.
4. Проверка необходимости двухсторонней обработки заготовки и выбор соответствующей подпрограммы управления вычислительным процессом.
5. Определение числа и последовательности переходов, расчет межоперационных размеров $DЗ(I)$ и определение длины обработки LR для первой схемы (программа ОРТОВ-1).
6. То же для второй схемы (программа ОРТОВ-2).
7. Выбор оптимальной схемы по критерию минимума длины обработки $MIN(LR)$.
8. Печать результатов проектирования.

Рассмотрим более подробно построение алгоритма выбора последовательности обработки детали для второй схемы (рис. 18, б). При этом учитывались следующие принципы [8]: для сокращения суммарной длины резания обработку вести по возможности с наибольшей допустимой глубиной резания, определяемой видом обрабатываемого материала, типом инструмента, жесткостью системы СПИД и типоразмером станка; для сохранения жесткости детали обработку желательно начинать со ступеней, имеющих наибольший диаметр; для сокращения вспомогательного времени стремиться обработать деталь за меньшее число переходов.

На рис. 19 приведена схема алгоритма выбора последовательности переходов в операции (программа ОРТОВ-2). В качестве входных данных для рассматриваемой задачи используются: диаметр заготовки $DЗ$, диаметры D_i и длины L_i всех ступеней вала и максимальной допустимая глубина резания $TMAX$. Выделяется первая ступень $I = 1$, начиная с наибольшего диаметра вала, последней ступенью $I = N$ будет наименьший диаметр вала. Определяется припуск $PRIP(I)$ для I -й ступени как разность диаметра заготовки $DЗ(I)$ и детали $D_i(I)$.

В логическом операторе 4 сравнивается величина припуска I -й ступени с максимально допустимой глубиной резания. Если она не превышает величину $PRIP(I)$, то выполняется первый переход с глубиной $TMAX$ (оператор 5), в противном случае происходит переход к анализу $(I + 1)$ ступени с помощью операторов 17, 19. Специальная подпрограмма (оператор 6) выполняет определение длины резания LR для каждого перехода.

Введение дополнительной переменной $J = 1$ в операторе 7 позволяет определять остаток припуска на предшествующей ступени $(J - 1)$, если на ней оставшаяся величина припуска $PRIP(J) \leq TMAX$. Съем оставшейся части припуска, выполняемый с глубиной резания T_i , определяется оператором 14. Далее для этого перехода находится длина резания $LR(J)$, которая добавляется (оператор 16) к ранее определенной длине. В результате проектирования на

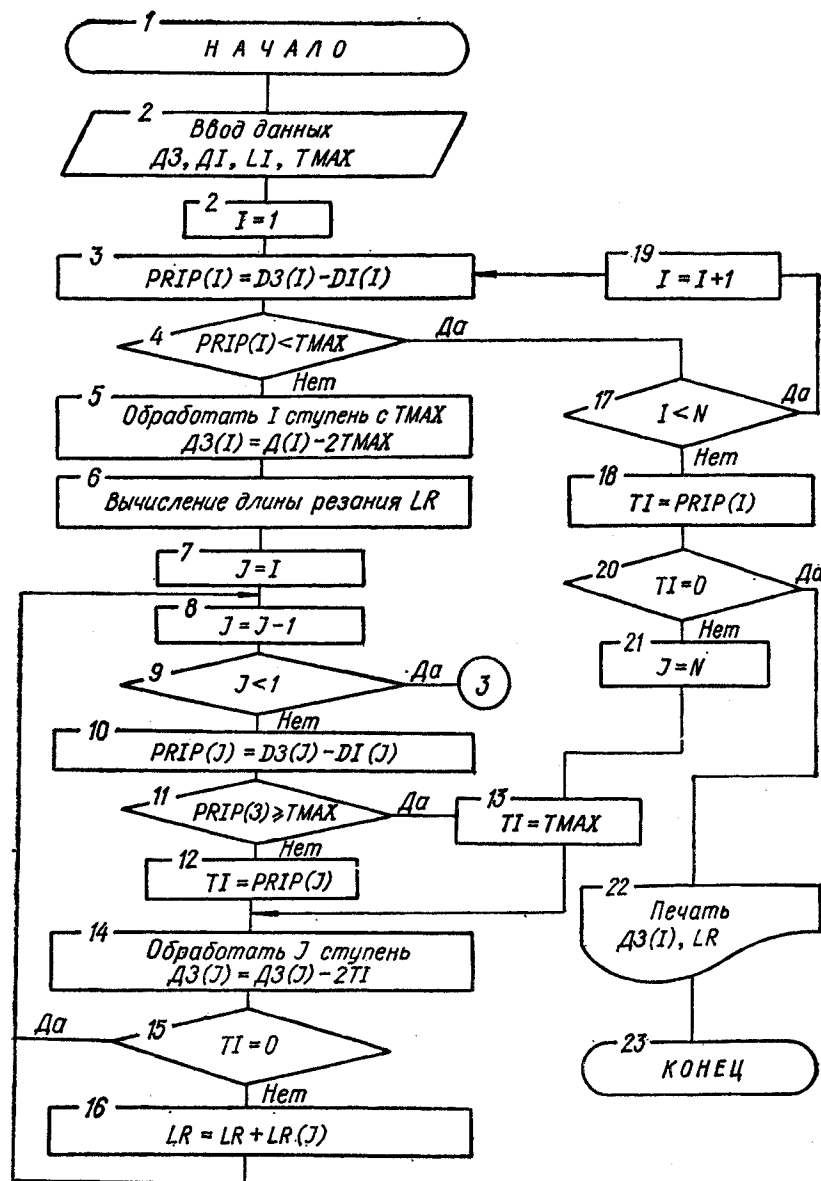


Рис. 19. Алгоритм выбора последовательности переходов в операции (программа OPTOV-2).

печать выводятся данные о диаметрах заготовки $ДЗ(I)$ для каждой ступени после выполнения всех переходов и суммарная длина резания LR , на основе которой может быть выполнено сравнение последовательности обработки для выбора оптимального варианта.

Отметим, что рассмотренный алгоритм выбора последовательности переходов в операции для одностороннего расположения ступеней вала может использоваться для более сложных деталей с двухсторонним расположением ступеней. В этом случае последовательно определяется количество переходов для одной, а затем для другой стороны вала. Описанный алгоритм может быть также использован при выборе количества и последовательности переходов при обработке ступенчатых отверстий.

7. Оптимизация процессов механической обработки с учетом действия технологической наследственности

Анализ работ по технологии машиностроения и реально существующих процессов обработки показывает, что любой ТП может характеризоваться как процесс качественного и количественного изменения объектов производства. На основе изученных явлений технологической наследственности [15, 59] можно предположить, что отдельные характеристики качества поверхности, точности обработки и формы заготовки могут переходить — наследоваться — от одной операции к другой. В дальнейшем под технологической наследственностью будет пониматься явление переноса свойств обрабатываемого объекта (заготовки) от предшествующих операций к последующим и далее к эксплуатационным качествам деталей машин. При этом изменение эксплуатационных свойств определяется методами и режимами, применяемыми на отдельных операциях термической и механической обработки, видом и состоянием инструмента, условиями охлаждения, размерами операционных припусков, последовательностью и содержанием операций ТП в целом и др. [41, 59].

В этом случае общую структуру технологического процесса можно представить как сложную многомерную систему, в которой на вход поступают различные характеристики заготовки $\{R_{10}, R_{20}, \dots, R_{m0}\}$, а на выходе обеспечивается соответствующий набор характеристик для готовой детали $\{R_{1p}, R_{2p}, \dots, R_{mp}\}$. Эти изменения определяются действием совокупности технологических факторов $\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{in}\}$ для каждой операции φ_i ТП (рис. 20).

Математическая модель элементарного ТП обработки, как отмечается в [53], может быть представлена в виде графа $G_n(C, \varphi)$. Вершина графа C_{11} соответствует определенному состоянию качества обработки (точности размеров и формы, шероховатости, волнистости, физико-

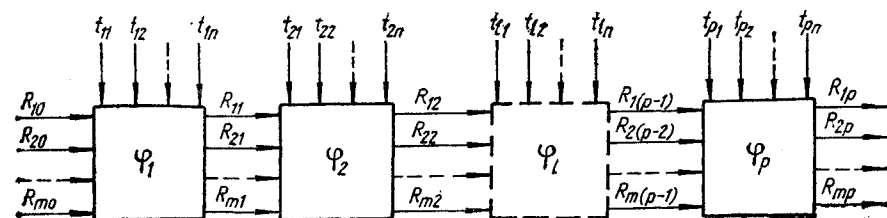


Рис. 20. Структурная схема многомерной модели ТП.

механическим свойствам поверхностных слоев), а множество дуг ϕ_l — технологическим переходам или операциям. Применительно к подобной модели проявление технологической наследственности может быть описано выражением

$$X_l = aX_{l-1}^b, \quad (2.36)$$

где X_{l-1} , X_l — характеристики качества для $(l-1)$ и l — операции ТП обработки; a , b — коэффициенты технологической наследственности.

Так, для описания влияния технологической наследственности на изменение характеристики шероховатости R_a получим

$$R_a = aR_{\text{апред}}^b. \quad (2.37)$$

Коэффициенты a и b для различных методов обработки могут быть определены на основе многофакторного анализа с получением уравнения регрессии мультипликативного вида. Так, в работе [59] для окончательной ЭМО роликом деталей из высоколегированных конструкционных сталей с введением в качестве входного фактора значения $R_{\text{апред}}$ получены выражения для предварительной обработки точением

$$R_a = \frac{0,303R_{\text{апред}}^{0,56}s^{0,34}(HB)^{0,7}}{I^{0,28}Q^{0,02}v^{0,26}i^{0,6}}$$

и шлифованием

$$R_a = \frac{0,0053R_{\text{апред}}^{0,54}I^{0,66}s^{0,41}i^{0,16}(HB)^{0,32}}{Q^{0,1}v^{0,15}},$$

где I — сила тока, А; Q — давление, Н; v — скорость, м/мин; s — подача, мм/об; i — число проходов.

После соответствующих обозначений получены коэффициенты технологической наследственности для предварительной обработки точением

$$b_{\text{точ}} = 0,56, a_{\text{точ}} = \frac{0,33s^{0,34}(HB)^{0,7}}{I^{0,28}Q^{0,02}v^{0,26}i^{0,6}} \quad (2.38)$$

и шлифованием

$$b_{\text{шл}} = 0,54, a_{\text{шл}} = \frac{0,0053I^{0,66}s^{0,41}i^{0,16}(HB)^{0,32}}{Q^{0,1}v^{0,15}}. \quad (2.39)$$

Сравнение коэффициентов $b_{\text{точ}}$ и $b_{\text{шл}}$ для различных характеристик качества поверхности показывает их незначительное отличие, что говорит об их относительной стабильности для конкретного метода окончательной обработки. Следовательно, можно сделать предположение, что количественные связи технологической наследственности, зависящие от выбора метода обработки, определяются в формуле (2.37) коэффициентом b , а основные условия обработки внутри этого метода — коэффициентом a . Кроме того, коэффициент «а» может учитывать изменения, происходящие в процессе предыдущей обработки. Так, например, как видно из формул для определения

$a_{\text{точ}}$ и $a_{\text{шл}}$, полученная на операции термообработки более высокая твердость материала оказывает влияние на величину этих коэффициентов наследственности.

В этой связи необходимо также отметить, что технологическая наследственная связь проявляется не только в изменении одноименных характеристик, но и во взаимодействии характеристик, на первый взгляд не связанных корреляционной связью между собой. В рассматриваемом эксперименте величина исходной шероховатости $R_{\text{апред}}$ определяла некоторым образом практически все исследуемые параметры, даже такие, как величину упрочнения поверхностного слоя H_{μ} .

Существенное отличие коэффициента технологической наследственности a проявляется не только в разнице значений коэффициентов для отдельных факторов в зависимостях (2.38) и (2.39), но и в характере действия самих факторов. Для принятых диапазонов варьирования факторов возрастание силы тока I приводит при предварительной обработке точением к снижению значений R_a , а при шлифовании наблюдается обратное действие. Физический смысл этого явления объясняется сильным влиянием высоты и формы микрогеометрии на величину электрического сопротивления контакта инструмента и детали и связанного с этим выделением разного количества тепла, которое в одном случае улучшает, а в другом — затрудняет процесс пластического деформирования и получения шероховатости с меньшими значениями R_a .

Получение многочисленных частных зависимостей типа (2.37) для различных характеристик качества поверхности представляет ряд сложностей при планировании и проведении эксперимента. Более универсальным решением является использование в качестве одного из входных факторов некоторых комплексных выражений, например безразмерного комплекса $\Delta = R_{\text{max}}/\rho \cdot b^{1/\nu}$, где R_{max} , ρ , b , ν — характеристики шероховатости (высота микронеровностей, радиус выступов и параметры кривой опорной поверхности). В этом случае выражение (2.36) может быть записано как $R_a = a\Delta_{\text{пред}}^b$.

Применительно к ЭМО эти коэффициенты технологической наследственности будут равны при предварительной обработке точением

$$b_{\text{точ}} = 0,32; a_{\text{точ}} = \frac{s^{0,31}(HB)^{0,71}}{I^{0,31}Q^{0,06}v^{0,25}i^{0,57}},$$

и шлифованием

$$b_{\text{шл}} = 0,42, a_{\text{шл}} = \frac{0,02I^{0,71}s^{0,38}i^{0,2}(HB)^{0,23}}{Q^{0,07}v^{0,15}}.$$

Для автоматизации проектирования ТП необходимо построение математических моделей, описывающих основные функциональные связи между технологическими факторами и параметрами качества поверхности и точности обработки. При проектировании технологических маршрутов обработки должны быть учтены также закономерности изменения основных параметров от одной операции к другой. Как было показано в работе [59], подобные закономерности могут быть

описаны в виде коэффициентов технологической наследственности, полученных преобразованием регрессионных зависимостей, найденных методами планирования экстремальных экспериментов.

Общую структуру ТП можно представить в виде последовательности изменения основных параметров формы, точности и качества поверхности ($R_{1l}, R_{2l}, \dots, R_{ml}$) от заготовки к готовой детали. Эти изменения определяются действием технологических факторов ($t_{1l}, t_{2l}, \dots, t_{ln}$) для каждой операции ТП φ_l ($l = 1, 2, \dots, p$).

Учитывая, что изменение отдельного параметра R_{jl} на операции φ_l может быть описано значениями коэффициентов технологической наследственности a_{jl}, b_{jl} , представляется возможным показать изменение параметра R_{jl} на протяжении всего технологического процесса в виде соответствующего набора коэффициентов технологической наследственности. Так, один из параметров качества обработки после окончательной операции может быть выражен в виде

$$R_p = a_p R_{p-1}^{b_p}, \quad (2.40)$$

здесь a_p, b_p — коэффициенты технологической наследственности для операции φ_p ; R_{p-1} — параметр качества обработки (характеристики точности или качества поверхности) после операции φ_{p-1} .

В свою очередь, параметр R_{p-1} может быть выражен аналогичной зависимостью

$$R_{p-1} = a_{p-1} R_{p-2}^{b_{p-1}}. \quad (2.41)$$

Здесь R_{p-2} — параметр качества обработки после операции φ_{p-2} .

Аналогично могут быть получены зависимости для всех операций ТП, включая и первую операцию φ_1 по обработке заготовки:

$$R_1 = a_1 R_0^{b_1}, \quad (2.42)$$

здесь R_0 — исходное значение j -го параметра качества заготовки.

Имея набор рассмотренных параметров и делая последовательную подстановку зависимости типа (2.41) в выражение типа (2.40) для всех p операций, получаем

$$R_p = a_p (a_{p-1} R_{p-2}^{b_{p-1}})^{b_p} = a_p a_{p-1}^{b_p} R_{p-2}^{b_p \cdot b_{p-1}}, \quad (2.43)$$

которое показывает изменение рассматриваемого параметра для двух последних операций — φ_p и φ_{p-1} .

Выполнив подобные преобразования для последующих операций $\varphi_{p-2}, \varphi_{p-3}, \dots, \varphi_1$, можно получить общую математическую модель изменения параметров качества обработки для всего ТП

$$R_p = a_p a_{p-1}^{b_p} a_{p-2}^{(b_p b_{p-1})} \dots a_1^{(b_p b_{p-1} \dots b_1)} R_0^{(b_p \cdot b_{p-1} \dots b_1)}. \quad (2.44)$$

Прологарифмировав выражение (2.44), получим

$$\ln R_p = \ln a_p + b_p \ln a_{p-1} + (b_p b_{p-1}) \ln a_{p-2} + \dots + (b_p b_{p-1} \dots b_1) \ln a_1 + (b_p b_{p-1} \dots b_1) \ln R_0. \quad (2.45)$$

Коэффициент технологической наследственности a_{li} , как было показано выше, описывает влияние технологических факторов t_{li} ,

$t_{12}, \dots, t_{ln}$ на рассматриваемый параметр качества обработки для операции φ_l и может быть представлен в следующем виде:

$$a_l = k_{l0} t_{l1}^{k_{l1}} t_{l2}^{k_{l2}} \dots t_{lin}^{k_{lin}}. \quad (2.46)$$

Подставим зависимость (2.46) в выражение (2.45):

$$\begin{aligned} \ln R_p = & \ln (k_{p0} t_{p1}^{k_{p1}} t_{p2}^{k_{p2}} \dots t_{pn}^{k_{pn}}) + \\ & + b_p \ln [k_{(p-1)0} t_{(p-1)1}^{k_{(p-1)1}} t_{(p-1)2}^{k_{(p-1)2}} \dots t_{(p-1)n}^{k_{(p-1)n}}] + \\ & + \dots + (b_p b_{p-1} \dots b_1) \ln [k_{10} t_{11}^{k_{11}} t_{12}^{k_{12}} \times \\ & \times \dots \times t_{1n}^{k_{1n}}] + (b_p b_{p-1} \dots b_1) \ln R_0. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Упрощая полученные выражения, вводим для обозначения обобщенные коэффициенты технологической наследственности:

$$\begin{aligned} C_1 &= b_p, \\ C_2 &= b_p b_{p-1}, \\ C_3 &= b_p b_{p-1} b_{p-2}, \\ &\dots \dots \dots \\ C_p &= b_p b_{p-1} b_{p-2} \dots b_1. \end{aligned} \quad (2.48)$$

После некоторых преобразований выражения (2.47) и соответствующих подстановок (2.48) получим

$$\begin{aligned} \ln R_p = & [\ln k_{p0} + k_{p1} \ln t_{p1} + \dots + k_{pn} \ln t_{pn}] + C_1 [\ln k_{(p-1)0} + \\ & + k_{(p-1)1} \ln t_{(p-1)1} + \dots + k_{(p-1)n} \ln t_{(p-1)n}] + \dots + \\ & + C_p [\ln k_{10} + k_{11} \ln t_{11} + \dots + k_{1n} \ln t_{1n}] + C_p \ln R_0. \end{aligned} \quad (2.49)$$

Достоинством полученного выражения являются наглядность элементарного представления всех технологических факторов рассматриваемых операций, составляющий ТП обработки. Анализ выражения (2.49) показывает, что он может быть выражен в виде суммы действия окончательной операции и некоторой доли влияния предшествующих операций и исходного состояния заготовки — R_0 , которое определяется обобщенными коэффициентами технологической наследственности $C_1, C_2, \dots, C_p$.

Если на какой-то операции φ_l коэффициент технологической наследственности $b_l = 0$, что соответствует отсутствию влияния исходного качества состояния детали на окончательное состояние после данной операции, то коэффициент $C_{p(l-1)} = b_p b_{p-1} \dots b_l$, а также последующие обобщенные коэффициенты $C_{p-l}, \dots, C_p$ будут равны нулю. Это может служить в выражении (2.49) математической интерпретацией действия операции φ_l как «технологического барьера».

В связи с тем, что при изготовлении деталей требуется обеспечить значительное число параметров точности, качества поверхности, формы деталей и т. д., то становится необходимым рассматривать более общие математические модели ТП, учитывающие влияние всех техно-

логических факторов на заданные параметры. Такая математическая модель может быть представлена системой уравнений, описывающих влияние технологических факторов на отдельные выходные параметры качества обработки:

$$\begin{aligned} \ln R_{1,p} &= [\ln k_{1,p0} + k_{1,p1} \ln t_{p1} + \dots + k_{1,pn} \ln t_{pn}] + C_{1,1} [\ln k_{1,(p-1)0} + \\ &+ k_{1,(p-1)1} \ln t_{(p-1)1} + \dots + k_{1,(p-1)n} \ln t_{(p-1)n}] + \dots + C_{1,p} [\ln k_{1,10} + \\ &+ k_{1,11} \ln t_{11} + \dots + k_{1,1n} \ln t_{1n}] + C_{1,p} \ln R_{1,0}, \quad (2.50) \\ \ln R_{2,p} &= [\ln k_{2,p0} + k_{2,p1} \ln t_{p1} + \dots + k_{2,pn} \ln t_{pn}] + C_{2,1} [\ln k_{2,(p-1)0} + \\ &+ k_{2,(p-1)1} \ln t_{(p-1)1} + \dots + k_{2,(p-1)n} \ln t_{(p-1)n}] + \dots + C_{2,p} [\ln k_{2,10} + \\ &+ k_{2,11} \ln t_{11} + \dots + k_{2,1n} \ln t_{1n}] + C_{2,p} \ln R_{2,0}, \\ &\dots \dots \dots \\ \ln R_{m,p} &= [\ln k_{m,p0} + k_{m,p1} \ln t_{p1} + \dots + k_{m,pn} \ln t_{pn}] + C_{m,1} [\ln k_{m,(p-1)0} + \\ &+ k_{m,(p-1)1} \ln t_{(p-1)1} + \dots + k_{m,(p-1)n} \ln t_{(p-1)n}] + \dots + C_{m,p} [\ln k_{m,10} + \\ &+ k_{m,11} \ln t_{11} + \dots + k_{m,1n} \ln t_{1n}] + C_{m,p} \ln R_{m,0}. \end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений затруднительно из-за большого числа переменных, изменяющихся на различных уровнях. При некоторых упрощениях эта задача может быть решена методами динамического программирования. Так, в работе [59] для подобных случаев предлагается метод многоуровневого итерационного проектирования ТП. Особенность этого метода, как отмечалось ранее, состоит в разделении процесса проектирования на ряд различных по детализации уровней и разбиении на каждом уровне общей задачи проектирования на ряд более простых подзадач с взаимной оптимизацией решений между подзадачами одного и разных уровней. Использование многоуровневого процесса проектирования и проводимой в его рамках оптимизации упрощает решение задачи, однако не дает возможности комплексного решения при оптимизации ТП в целом. Выполненные исследования явления технологической наследственности [59] и установление связей между отдельными элементами ТП — операциями — позволяют создать его математическую модель и разработать методы комплексной структурной оптимизации.

8. Выбор рациональной системы станочных приспособлений

Задача поиска рационального применения той или иной конструкции станочного приспособления в значительной степени определяет трудоемкость и себестоимость технологического процесса механической обработки. Автоматизированному поиску и конструированию технологической оснастки посвящен ряд работ Г. К. Горанского, А. Г. Раковича, А. С. Пухова и других, в которых сформулированы исходные теоретические положения автоматизации проектирования, разработаны конкретные проектирующие системы. Однако в этих исследованиях недостаточно освещены вопросы оптимизации выбора технологической оснастки с учетом всех влияющих факторов.

В настоящее время в машиностроении используются шесть основных ССП: универсально-безналадочные приспособления (УБП); универсально-наладочные приспособления (УНП); специализированные наладочные приспособления (СНП); универсально-сборные приспособления (УСП); сборно-разборные приспособления (СРП); неразборные специальные приспособления (НСП).

Каждый из существующих видов технологической оснастки имеет свою область эффективного применения.

1. УБП представляют собой законченные механизмы многократного использования и применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также в серийном производстве при оснащении малотрудоемких по подготовительному времени операций. Для подготовки УБП к работе требуются наименьшие затраты времени по сравнению с другими видами оснастки, кроме специальной. Однако эти приспособления не имеют в составе комплекта стандартных установочных, направляющих и других элементов, что ведет к значительным потерям вспомогательного времени, ограничивает универсальность, технологические возможности, получаемую точность.

2. УНП состоят из базовой единицы и наладочной части; применяются в условиях многономенклатурного мелкосерийного, серийного и крупносерийного производства в условиях групповой обработки деталей.

3. СНП состоят из специализированной, чаще всего механизированной, базовой сборочной единицы и специальных сменных наладок для установки близких по схемам базирования, закрепления обрабатываемых деталей и по характеру их обработки. СНП применяются в условиях от мелко- до крупносерийного производства.

4. УНП и СНП имеют следующие преимущества: эффективное использование группового метода обработки, меньшие удельные затраты при оснащении по сравнению с УСП и СРП, большой диапазон регулирования наладочных элементов; возможность эффективного применения на станках с ЧПУ. К недостаткам УНП и СНП относятся необходимость проектирования и изготовления специальных сменных наладок или наладочных регулируемых элементов; отсутствие взаимособираемости с элементами других, часто применяемых видов универсально-сборной и переналаживаемой оснастки; недостаточный уровень универсальности и степени унификации базисных агрегатов.

5. УСП используются в условиях единичного и мелкосерийного производства. Они собираются из заранее изготовленных деталей и сборочных единиц высокой прочности и точности без последующей их обработки. УСП имеют сравнительно большой срок службы (12—15 лет), что дает возможность многократно применять детали и сборочные единицы в разных компоновках. Поэтому, несмотря на высокую первоначальную стоимость комплектов УСП, себестоимость компоновок приспособлений невелика. Однако элементы УСП обладают в ряде случаев недостаточной жесткостью, из-за чего приходится изменять режимы резания. Компоновки УСП не всегда обеспечивают необходимую точность и стабильность точностных параметров при обработке крупных партий деталей, так как под воздействием сил

резания и наличия большого числа стыков, а также соединения паз — шпонка возникают смещения и вибрации, приводящие к недопустимым погрешностям. Вследствие этого не рекомендуется их использование в условиях серийного и крупносерийного производства.

6. СРП отличаются более высокой, чем в УСП, жесткостью и применяются в основном в мелкосерийном и серийном производстве. СРП имеют высокую оперативность сборки, уровень механизации, точность и производительность, возможность эффективного применения на станках с ЧПУ. Необходимость изготовления специальных наладок, отсутствие унификации с УСП и другими видами переналаживаемой оснастки требуют проектирования специальных деталей и переходных элементов, увеличивают время подготовки приспособлений к работе.

7. НСП являются приспособлениями одноцелевого назначения и представляют собой необратимые конструкции, не предназначенные для разборки с целью повторного использования. НСП применяют в основном в условиях крупносерийного и массового производства при редкой (не чаще, чем один раз в 3—5 лет) смене изделий.

Применение станочных приспособлений способствует решению двух основных задач: обеспечения заданной точности обработки и повышения производительности и облегчения труда рабочих.

Для выполнения операции ТП могут быть использованы приспособления, равноценные по точности, но различные по их сложности, себестоимости и производительности. Выбор системы оснащения для нового изделия зависит и от того, какими приспособлениями пользовался завод ранее и на какую серийность осваиваемых машин он может рассчитывать в дальнейшем.

В настоящее время ряд работ посвящен выбору рациональных систем станочных приспособлений и его автоматизации. Так, справочное приложение к ГОСТ 14.305—73 рекомендует определять эффективность применения систем приспособлений в зависимости от их загрузки, т. е. от коэффициента загрузки k_z и периода производства изделий $T_{\text{п}}$.

Наиболее полное описание и разработка методов ускоренной подготовки конструкций станочного оснащения приводится в работе [39]. В них дан анализ систем информационного поиска технологической оснастки, обоснован и разработан метод системной унификации станочных приспособлений, предложен и реализован на ЭВМ метод автоматизированного выбора рационального варианта оснащения. Однако в этих работах основное внимание уделено разработке и применению ИСП и унификации в автоматизированных системах подготовки технологической оснастки и недостаточно внимания уделено рациональному выбору самой ССП. Кроме того, в связи с тем, что в последние годы получены новые данные по определению затрат при оснащении технологических операций, алгоритм системы автоматизированного выбора, предложенный в работе [39], требует корректировки с учетом накопленной на сегодняшний день информации по выбору и рациональному применению ССП.

После оценки коэффициента загрузки приспособления на деталь операции первым ограничением применения для конкретного случая

использования систем УСП, УНП, СНП и СРП является продолжительность выпуска оснащаемых деталей $T_{\text{в}}$, сравниваемая с минимальным устанавливаемым сроком выпуска $T_{\text{мин}}$, для которого целесообразно создание специализированного оснащения. Вторым ограничением является стоимость оснащения C , приспособлениями той или иной системы, рассчитываемая на основе данных справочного массива.

Выбор типа ССП осуществляется на основе планово-организационных, технологических и конструктивных данных об обрабатываемой детали. Эти данные сравниваются с имеющимися в массивах информации сведениями о возможностях и конструктивных особенностях различных ССП. После анализа всех условий выбираются системы станочных приспособлений, которые по своим параметрам могут обеспечить при обработке деталей выполнение заданных требований. В случае получения более одного возможного варианта проектировщик принимает решение о выборе конкретной ССП на основе производственного опыта. При наличии уточняющих сведений применительно к рассматриваемому производственному предприятию этот этап проектирования может быть полностью автоматизирован. Алгоритм разработанной программы выбора ССП представлен в виде блок-схемы на рис. 21. После ввода данных в диалоговом режиме в блоке 3 выполняется расчет коэффициента загрузки приспособления по известным в технологии машиностроения зависимостям.

В блоке 4 выбирается ССП, станочные приспособления которой могут обеспечить требуемую точность обработки деталей, в 5 определяется возможность эффективного применения ССП на различных по степени универсальности станках: 1 — универсальные, 2 — автоматы и полуавтоматы, 3 — специализированные, 4 — специальные. В блоке 6 выполняется сравнение габаритных размеров обрабатываемой детали с предельно возможными их значениями для различных ССП на данной операции. При машинной реализации блоков 4—6

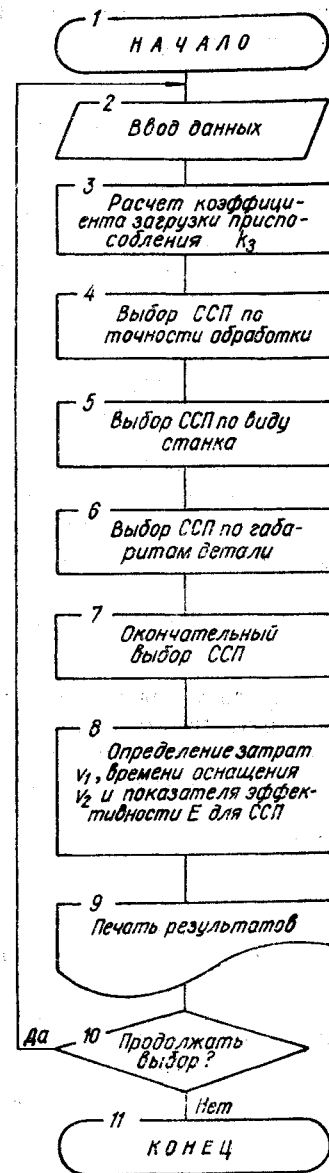


Рис. 21. Блок-схема алгоритма выбора рациональной ССП.

используются матричные формы представления массивов информации, соответствующие элементы которых заполняются нулями, если данная ССП не удовлетворяет условиям, и единицами, если условия удовлетворяются.

В блоке 7 выполняется окончательный выбор ССП, удовлетворяющий всем, заданным на входе в программу, условиям. Здесь же происходит расшифровка выбранных ССП. В блоке 8 в зависимости от периода изготовления детали и коэффициента загрузки по матрице затрат определяются величина относительных затрат и цикл оснащения. Для оценки рациональности выбранной ССП введен безразмерный показатель эффективности

$$E = \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2, \quad (2.51)$$

где V_1 — относительные затраты при оснащении операций; V_2 — относительный цикл оснащения; α_1 и α_2 — весовые коэффициенты. Значения V_1 и V_2 рассчитываются в отношении к затратам и времени оснащения НСП. Чем меньше величина E , тем более рациональным является применение данной ССП. Список допустимых ССП выводится на печать в порядке убывания по рациональности применения с указанием их технико-экономических показателей.

9. Конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости деталей

Среди методов повышения износостойкости узлов трения машин и инструментов особое место занимает управление этим эксплуатационным свойством на стадии конструирования и ТПП. Возможность заранее прогнозировать определенную величину износостойкости при задании характеристик качества поверхностного слоя, обеспечиваемых оптимальными методами обработки, позволяет повысить надежность выпускаемых машин и снизить себестоимость их изготовления. Однако решение этой проблемы во многом затруднено в настоящее время по следующим причинам: сложность математических моделей, связывающих показатели износостойкости с характеристиками качества поверхности и технологическими условиями обработки, различие подходов к описанию физики процессов износа, разрозненность и противоречивость сведений по обеспечению износостойкости, многовариантность при выборе решений, использование различных критериев при выборе условий износа, материалов, характеристик качества поверхности, методов обработки и др. Учитывая это, первоочередной задачей в условиях конструкторско-технологического обеспечения износостойкости деталей должна стать систематизация данных (информации) о математических моделях процессов износа и построения на их основе современных методов проектирования с использованием вычислительной техники.

В настоящее время ЭВМ находят широкое применение при исследовании процессов износа в АСНИ для получения математических моделей, связывающих параметры износостойкости с характеристиками качества поверхности деталей и технологическими режимами

процессов их обработки. Известны случаи применения ЭВМ для выполнения наиболее трудоемких расчетов, связанных с определением контактной жесткости и ряда других параметров, характеризующих износостойкость. Однако в целом следует отметить недостаточное использование вычислительной техники для управления износостойкостью деталей при выполнении проектно-конструкторских работ. Это во многом снижает роль конструктора и технолога при решении задачи обеспечения износостойкости деталей машин.

Появление в последние годы мини-, микроЭВМ и особенно персональных ЭВМ, характеризующихся значительным повышением оперативной памяти, быстродействия, надежности работы, наличием в них современных периферийных средств (дисплеев, графопостроителей, накопителей на гибких магнитных дисках и др.) и одновременным снижением их стоимости, открывает большие возможности их применения в различных областях инженерной практики. Одной из существующих особенностей современных ЭВМ является реализация на них диалоговых режимов проектирования. В этих случаях один инженер-проектировщик может решать как конструкторские, так и технологические задачи. Применительно к такому подходу разработана система автоматизации проектно-конструкторских работ по обеспечению износостойкости деталей машин. Эта система занимает по своему функциональному назначению промежуточное место между АСНИ, САПР конструирования деталей машин и САПР ТП. На основе АСНИ в системе формируется математическое и информационное обеспечение. В свою очередь, рассматриваемая система формирует промежуточную информацию для САПР-К и САПР ТП.

Система автоматизации проектно-конструкторских работ по обеспечению износостойкости деталей состоит из трех основных подсистем: «Эксплуатация», «Конструирование» и «Технология» (рис. 22). Две последние подсистемы непосредственно связаны с САПР-К и САПР ТП и могут при необходимости входить в их состав. При функционировании названных подсистем используются информационные массивы, хранящиеся в банке данных. Сюда входят данные об условиях износа, различные математические модели, характеристики материалов, возможные их сочетания в парах трения, сведения о технологических методах их обработки и др.

В качестве исходных данных в системе используются предварительно назначенные размеры сопрягаемых деталей и их рабочих поверхностей. Эти сведения могут быть получены при конструировании без ЭВМ или при использовании САПР-К. Кроме того, задается срок службы и (или) допустимая величина рабочего зазора.

После ввода данных выполняется проектирование с использованием подсистемы «эксплуатация» — блоки 2, 3. С помощью программного обеспечения выбираются из массива в банке данных условия износа: скорость v , давление p и вид смазки. Эта информация в отдельных случаях может быть введена в качестве исходной. Для определения конструкторско-технологических параметров трущихся поверхностей необходимо процесс износа регламентировать определенными показателями. Как отмечается в многочисленных исследованиях, наиболее

полно рассматриваемый процесс характеризуют: допустимая величина износа в период приработки и интенсивность износа в период установившегося износа. Допустимые величины этих показателей определяются на основе анализа исходных данных (блок 5). В тех случаях, когда для требуемых условий эксплуатации проектируемого изделия в банке данных не находится рекомендаций по выбору значений v , p и вида смазки, разрабатывается техническое задание на проведение исследований процесса износа с использованием АСНИ (блок 4).

Первая задача, решаемая подсистемой «конструирование» (см. рис. 22), связана с выбором сочетания материалов сопрягаемых деталей. Известно, что вид износа во многом определяется совместностью трущихся материалов. Так, при отдельных сочетаниях материалов возникает схватывание, приводящее к нарушению нормальных условий износа. После выбора материалов для первой пары трущихся деталей проводится их проверочный расчет на прочность. Если это условие удовлетворяется, то выбранная пара запоминается и подбирается следующая. В блоке 10 проводится выбор оптимального сочетания материалов сопрягаемых деталей. В качестве критериев в этом случае применяются: стоимость материалов, коэффициент трения и их обрабатываемость. В отдельных случаях для определения условий эксплуатации может быть не найдено сочетание известных материалов или неэкономично их использование (это условие проверяется в блоке 11). В этом случае могут быть выбраны материалы с нанесением покрытий на рабочие поверхности. Целесообразность применения таких деталей также проверяется в блоках 9 и 10.

Далее для ранее установленных условий износа и материала трущейся пары выбираются (блок 13) определенный вид износа и его модель. В блоке 14 на основе использования математических моделей связей износостойкости с характеристиками качества поверхности выбираются диапазоны их значений. Для проверки приемлемости выбранных конструктивных характеристик деталей рассчитываются теоретические значения показателей износостойкости деталей (блок 15). В случае значительного отличия теоретического значения показателей износостойкости от заданных возможна корректировка установленных конструктивных характеристик детали, в том числе габаритных размеров рабочих поверхностей. Завершающим блоком 16 подсистемы «Конструирование» является оператор вывода полученной информации на печать. На этом этапе при работе в условиях комплексных САПР информация передается в САПР-К.

В подсистеме «Технология» (см. рис. 22) первоначально выбирается оптимальный метод получения заготовки (блок 17). Следует иметь в виду, что способ получения заготовки определяет не только физико-механические свойства детали, но и ТП их изготовления. Критерием оптимальности в этом случае является себестоимость получения заготовки. Блок 18 формирует возможные элементарные маршруты обработки сопрягаемых поверхностей. Для каждой рабочей поверхности система представляет несколько маршрутов. Выбор оптимального проводится на основе параметрической и структурной оптимизации. Первый вид оптимизации (блок 19) затрагивает определение оптимальных

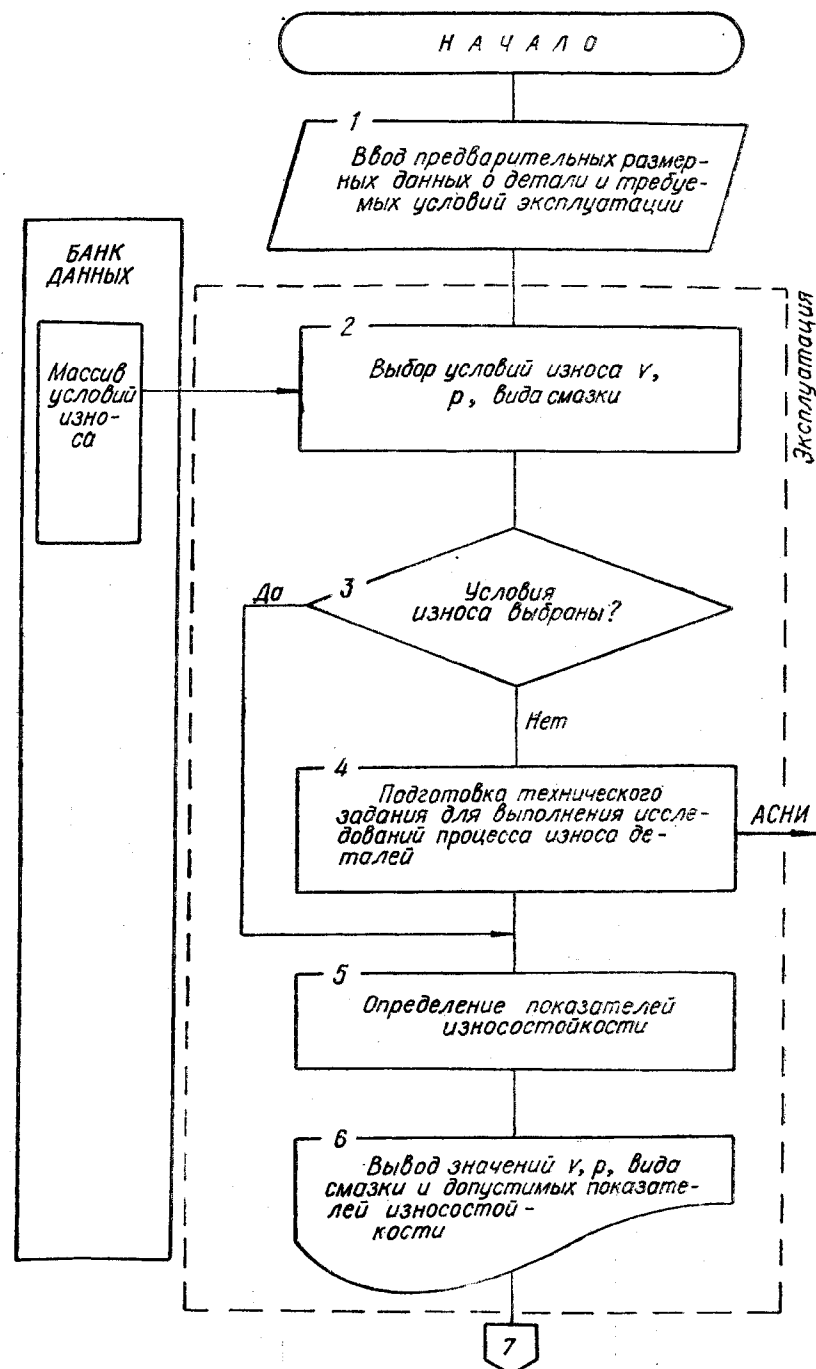
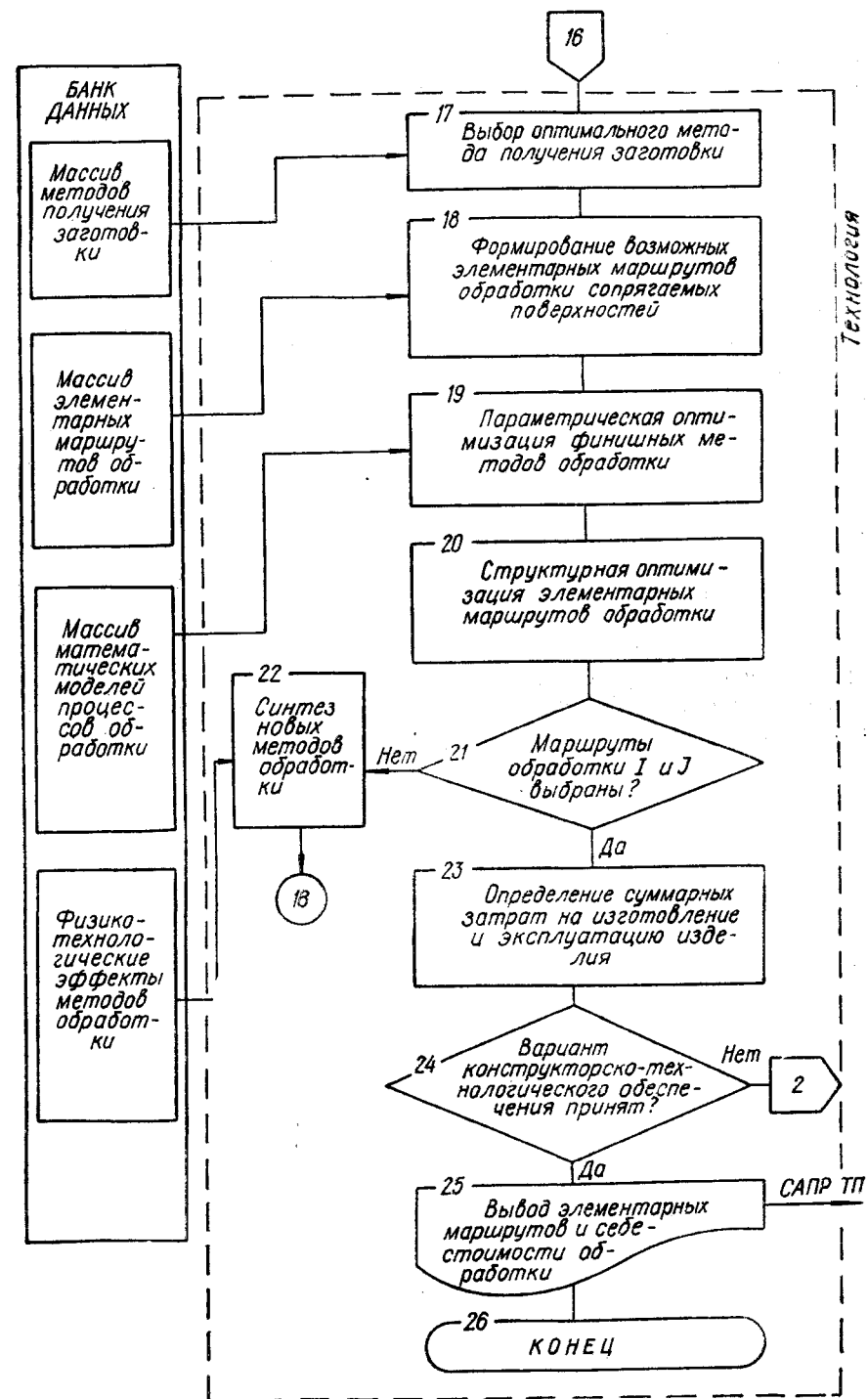
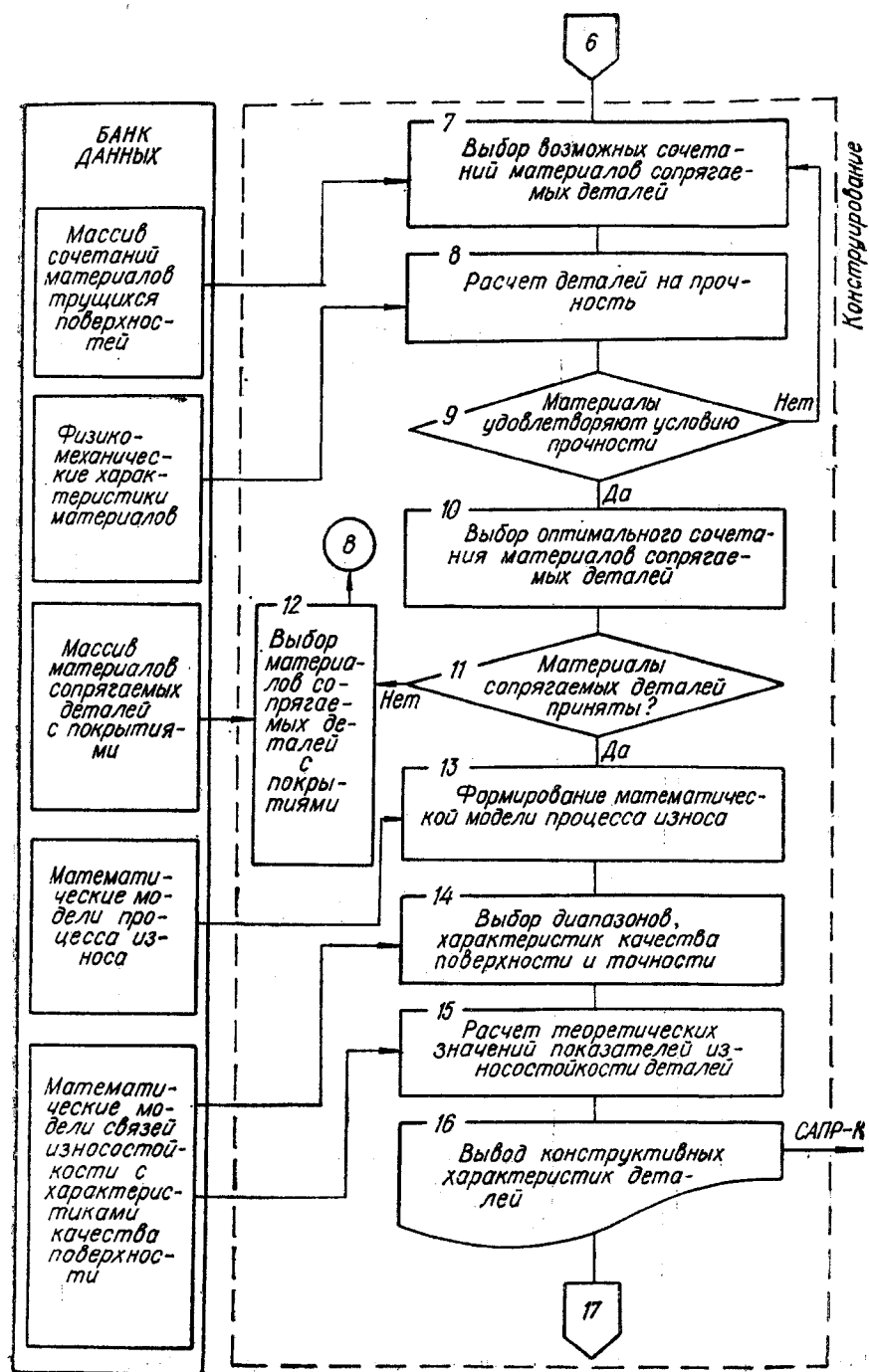


Рис. 22. Структурная схема автоматизации проектно-конструкторских работ по обеспечению износостойкости деталей машин.



режимов обработки на финишной операции, главным образом формирующей окончательное качество рабочей поверхности. Для предыдущих операций и в целом для всего элементарного маршрута проводится структурная оптимизация (блок 20). В качестве критерия в рассмотренных случаях использовалась минимальная себестоимость обработки. В тех случаях, когда для выбранных материалов не отыскивается оптимальный элементарный маршрут обработки рабочих поверхностей, возможно применение программ синтеза новых методов обработки, основанных на известных методах поискового конструирования (блок 22) [5].

Для комплексной оценки обеспечения износостойкости деталей машин необходимо определять суммарные затраты на изготовление и эксплуатацию изделия. Если рассматриваемая поверхность не является лимитирующей по сроку эксплуатации детали или изделия в целом, то необходимо обеспечивать ее срок службы, не превышающий срок для лимитирующих деталей в узле. В этом случае, очевидно, представляется возможным сократить стоимость детали за счет применения менее дорогих материалов и ТП ее изготовления. Такой интегральный подход к оценке затрат при изготовлении и эксплуатации выполняется в блоке 23. После окончательной оценки разработанных вариантов обработки рабочих поверхностей (блок 24) выбирается лучший, и вся информация о конструктивных характеристиках и технологии изготовления выводится на печать. Одновременно на этом этапе вся полученная информация передается в САПР ТП для проектирования операционных ТП изготовления сопрягаемых деталей и изделия в целом.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1. Выбор параметров оптимизируемых процессов обработки

В условиях многоуровневого выбора решений на различных этапах проектирования ТП первоначально решается вопрос структурной оптимизации. После выбора определенной структуры маршрута обработки, операции, позиции, перехода или различных видов технологической оснастки должна ставиться задача их параметрической оптимизации. Однако это в большинстве случаев не делается из-за отсутствия математических моделей, связывающих эти структурные составляющие ТП с некоторой группой параметров, определяющих технико-экономические показатели этих процессов.

Параметрическая оптимизация обычно выполняется после выбора структуры перехода и выражается главным образом в определении оптимальных режимов резания (скорости v , подачи s и глубины резания t) с позиций некоторого критерия [13, 20, 24, 32, 43, 58]. К параметрической оптимизации могут быть также отнесены: расчеты по выбору оптимальной геометрии режущего инструмента (резцов, сверл, фрез и т. д.); расчеты по выбору точностных, силовых и прочностных параметров станочных приспособлений; расчеты по выбору физико-механических свойств режущих инструментов; расчеты по определению оптимальных значений припусков и допусков на выполняемые размеры.

Основная задача, которую решают при параметрической оптимизации ТП, это расчет режимов обработки, при которых обеспечивается требуемое качество изделия при минимальных затратах общественного труда. Режимы обработки оказывают основное влияние на стоимость и производительность выполняемой операции, так как от них зависит в первую очередь штучное время, а значит, и доля себестоимости, пропорциональная времени. В значительной степени режимы обработки определяют точность и качество обработанных поверхностей.

При оптимизации процессов обработки в машиностроении рассматриваются методы, которые характеризуются различными управляемыми параметрами, часть из которых выступает в роли оптимизируемых режимов обработки. Число управляемых переменных зависит от методов обработки и может быть различным.

При оптимизации наиболее распространенных процессов механической обработки (точение, сверление, фрезерование и др.) под режимами обработки понимается совокупность глубины резания t , подачи s , скорости v , называемых элементами режимов резания. Эти управляемые переменные обеспечивают при минимальной себестоимости максималь-

но возможную для данной себестоимости производительность процесса обработки.

Для других методов характерно использование в качестве управляемых переменных других элементов режимов обработки. Например, при полировании цилиндрических поверхностей алмазными эластичными лентами основными управляемыми технологическими факторами является давление ленты на обрабатываемую поверхность p , скорость v и подача s , а при электрохимическом полировании основным фактором, определяющим процесс обработки, является плотность тока и т. д.

Степень влияния отдельных управляемых переменных на основные показатели оптимизируемого процесса различна, поэтому необходимо при выборе и построении критериев оптимальности учитывать наиболее значимые режимы обработки. Рассмотрим для примера влияние глубины резания t , подачи s и скорости v на повышение производительности обработки при наружном точении. Для сравнения влияния глубины резания и подачи на производительность процесса примем за основу постоянство площади срезаемого слоя, равной ts . Исследуем два режима резания: первый — $s_1 = s$, $t_1 = t$, второй — $s_2 = 2s$, $t_2 = t/2$. Площадь сечения, очевидно, для обоих режимов постоянна и равна ts .

Если обработка точением ведется за один проход, то основное технологическое время $t_0 = L/ns$, где L — длина рабочего хода. Для первого режима обработки

$$t_{01} = L/n_1 s. \quad (3.1)$$

Для второго режима обработки требуется два прохода

$$t_{02} = 2L/n_2 s_2 = L/n_2 s. \quad (3.2)$$

Скорость резания для первого и второго вариантов можно определить по известным зависимостям

$$v_1 = \frac{C_v}{t^{x_v} s^{y_v}}, \quad v_2 = \frac{C_v}{\left(\frac{t}{2}\right)^{x_v} (2s)^{y_v}} = \frac{C_v}{t^{x_v} 2^{(y_v - x_v)} s^{y_v}}.$$

Сравнение зависимостей v_1 и v_2 показывает, что они отличаются на величину $2^{(y_v - x_v)}$. Учитывая, что для основных случаев наружного точения $y_v > x_v$, можно предположить, что $v_1 > v_2$ и соответственно $n_1 > n_2$. Тогда сравнение зависимостей (3.1) и (3.2) для определения основного времени показывает, что $t_{01} < t_{02}$. Следовательно, более производительным является первый режим обработки и поэтому целесообразнее увеличивать глубину обработки t , чем подачу s .

Как отмечается в работе [10], имеет определенное значение целесообразность выбора, в первую очередь, подачи или скорости резания. Для этого рассмотрим влияние этих режимов обработки на производительность процесса, которую будем характеризовать количеством заготовок, обрабатываемых за период стойкости инструмента T . Без учета времени холостых ходов

$$П = T/t_0, \text{ шт./мин.} \quad (3.3)$$

Делая подстановку $t_0 = L/ns$ и $n = 1000 v/\pi D$, получаем

$$П = \frac{T 1000 v s}{\pi D L}. \quad (3.4)$$

Введем обозначение постоянной части $k = 1000 T/\pi D L$. Тогда $П = k v s$.

При постоянном периоде стойкости скорость и подача связаны зависимостью $t^{x_v} s^{y_v} v = C_v$, которая показывает, что без изменения подачи нельзя изменить скорость обработки и наоборот.

Рассмотрим случай, когда $t = \text{const}$. Выразим с помощью приведенной зависимости производительность обработки через скорость резания и подачу $v = C_v/t^{x_v} s^{y_v}$, $s = (C_v/t^{x_v} \cdot v)^{1/y_v}$. Тогда

$$П = k \frac{C_v s}{t^{x_v} s^{y_v}} = \frac{k C_v}{t^{x_v}} s^{1-y_v}, \quad (3.5)$$

$$П = k (C_v/t^{x_v})^{1/y_v} \frac{1}{v^{1/y_v-1}}. \quad (3.6)$$

Первая часть приведенных зависимостей постоянная, поэтому рассмотрим, как изменится величина $П$ в зависимостях (3.5) и (3.6) при увеличении подачи и скорости резания в два раза. При $y_v = 0,4$ величина производительности обработки по первой зависимости увеличится в 1,32 раза, а вторая уменьшится в 1,5 раза. Таким образом, увеличивать подачу s выгоднее, чем скорость резания v .

Проведенный анализ влияния элементов режима резания на основное время и производительность процесса наружного точения позволили установить степень их влияния, которая в дальнейшем может учитываться при построении критериев оптимальности. Для других методов обработки использовать подобный анализ часто не представляется возможным из-за отсутствия аналитических зависимостей. Поэтому в этих случаях могут учитываться результаты экспериментальных исследований степени влияния технологических факторов на производительность и другие показатели.

2. Постановка задачи расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием

Задача определения оптимальных режимов резания — одна из наиболее массовых и встречается при разработке различных видов ТП механической обработки заготовок. При этом исходя из конкретных условий обработки, целей и задач оптимизации процесса резания, возникает большое множество вариантов постановки этой задачи.

При описании процесса обработки выделяют входные и выходные параметры, которые между собой связаны сложными функциональными зависимостями. Совокупность этих зависимостей принято рассматривать как математическую модель процесса обработки. В общем случае процесс обработки носит вероятностный характер, но из-за сложности построения зависимостей, учитывающих случайный характер изменения целого ряда параметров, определяющих выбор режимов

резания, в настоящее время преимущественно используются детерминированные модели, построенные на основе усредненных характеристик процесса.

В задачах расчета режимов резания набор входных параметров разделяется на искомые (управляемые) и заданные (неуправляемые). Задача расчета оптимальных режимов заключается в определении таких значений искомых параметров из множества их возможных значений, которые являются наилучшими (по некоторым показателям) по совокупности выходных параметров при заданном значении неуправляемых параметров. В качестве искомых параметров при расчете оптимальных режимов обычно принимают скорость резания v , подачу s , глубину резания t . Помимо названного целесообразно включать в качестве искомых параметров стойкость и геометрические параметры режущего инструмента, которыми можно управлять при реализации процесса обработки.

В общем случае постановка задачи оптимизации режимов обработки включает: выбор искомых параметров; определение множества их возможных значений; выбор анализируемого набора выходных параметров процесса; установление функциональных зависимостей между искомыми и выходными параметрами при фиксированных значениях неуправляемых параметров; выделение целевой функции; назначение диапазонов возможных значений выходных параметров.

Набор искомых параметров может быть представлен в виде некоторого множества

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (3.7)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ — искомые параметры.

Тогда задача расчета оптимальных режимов резания сводится к следующей задаче математического программирования

$$\begin{aligned} F(X) &\rightarrow \min(\max), \\ R_i(X) &\leq \bar{R}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ X &\in \{x\}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Здесь $F(x)$ — зависимость для принятого критерия оптимальности; $R_i(X)$ — значение i -й характеристики процесса резания в зависимости от значений искомых параметров $\{x\}$; $\bar{R}$ — заданное предельное значение i -й характеристики процесса резания.

В зависимости от вида и сложности представления функций $F(X)$ и $R_i(X)$ используют различные математические модели расчета режимов резания. Эти модели могут быть классифицированы по следующим признакам [42]: составу набора X оптимизируемых переменных; составу учитываемых показателей процесса; принятому критерию оптимальности; виду функций $F(X)$ и $R_i(X)$, аппроксимирующих основные закономерности процесса; по степени учета индетерминированности процесса резания и неопределенности исходной информации.

Использование различных математических моделей приводит к необходимости разработки разнообразных методов и алгоритмов реше-

ния рассматриваемой задачи. Ниже будет описан подход к решению ряда наиболее важных задач определения оптимальных режимов резания.

3. Расчет оптимальных режимов резания методом линейного программирования

Один из первых подходов к параметрической оптимизации технологических процессов предложенный в [13, 32], касался вопроса оптимизации режимов резания методом линейного программирования. В основе этого метода лежит построение математической модели, включающей совокупность технических ограничений и упрощенный вид оценочной функции, приведенных к линейному виду логарифмированием. Для решения этой задачи на ЭВМ могут быть использованы различные численные методы (перебора, симплексный и др.), а также графический, наглядно представляющий математическую модель процесса резания. Ниже для примера покажем построение математической модели процесса резания для операций точения, сверления и фрезерования.

Следует отметить, что качество математической модели процесса резания металлов и в первую очередь ее достоверность зависят от выбора технических ограничений, которые в наибольшей степени определяют описываемый процесс. Выбор тех или иных технических ограничений зависит от вида обработки и определяется конкретными условиями технологического, конструкционного и организационно-производственного характера. Однако можно выделить ряд наиболее важных технических ограничений, которые составляют основу математических моделей процесса резания при точении, фрезеровании, сверлении и других методах обработки. Такими ограничениями являются следующие: режущие возможности инструмента; мощность электродвигателя привода главного движения; заданная производительность станка; наименьшая и наибольшая скорость резания и подача, допускаемые кинематикой станка; прочность и жесткость режущего инструмента; точность обработки; шероховатость обработанной поверхности и др.

Рассмотрим особенности построения технических ограничений для наиболее распространенных методов обработки — продольного наружного точения и фрезерования торцовыми и цилиндрическими фрезами.

Ограничение 1. Режущие возможности инструмента. Это ограничение устанавливает связь между скоростью резания, определяемой принятой стойкостью инструмента, его геометрией, глубиной резания, подачей и механическими свойствами обрабатываемого материала, с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка, — с другой.

Скорость резания для различных видов обработки определяется по формуле

$$v = \frac{C_v D^{2v_{k_v}}}{T^m t^{x_v} s^{y_v} z^{u_v} B_{\phi}^{f_v}}. \quad (3.9)$$

В то же время скорость резания определяется кинематикой станка согласно зависимости

$$v = \pi D n / 1000. \quad (3.10)$$

Приравняв правые части формул (3.9) и (3.10) и делая преобразования, получаем выражение первого технического ограничения в виде неравенства

$$n s^{y_v} \leq \frac{318 C_v k_v D^{2v-1}}{T^m f^{x_v} z^{u_v} B^{r_v}}. \quad (3.11)$$

Это техническое ограничение достаточно просто приводится к виду, описывающему конкретный вид обработки. Так, для продольного наружного точения можно получить при значениях коэффициентов $z_v = 0$, $u_v = 0$, $r_v = 0$ следующее неравенство:

$$n s^{y_v} \leq \frac{318 C_v k_v}{T^m D f^{x_v}}. \quad (3.12)$$

Ограничение 2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка. Этим ограничением устанавливается взаимосвязь между эффективной мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и мощностью электропривода главного движения станка. Эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания при различных видах обработки, определяется по формуле

$$N_{эф} = \frac{C_z f^{x_z} D^{z_z} n^{n_z} s^{y_z} \pi^{n_z} B^{r_z} z_{\phi}^{u_z} k_z}{k_{c_z}}. \quad (3.13)$$

Учитывая необходимое условие протекания процесса резания, получаем следующее неравенство:

$$N_{эф} \leq N_n \eta. \quad (3.14)$$

Приравняв правые части выражения (3.13) и (3.14), записываем второе техническое ограничение в виде неравенства

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{N_n \eta k_{c_z}}{C_z f^{x_z} D^{z_z} \pi^{n_z} B^{r_z} z_{\phi}^{u_z} k_z}. \quad (3.15)$$

Ограничение 3. Заданная производительность станка. Этим ограничением устанавливается связь расчетных скорости резания и подачи с заданной производительностью станка. Исходя из соотношения продолжительности цикла работы станка T_n , основного технологического t_o и вспомогательного непрерывного времени $t_{в.н}$ получаем выражение для третьего технического ограничения

$$n s \geq \frac{L_{p.x} R}{60 k_3 r_R - t_{в.н} R}, \quad (3.16)$$

где R — заданная производительность станка, шт./мин; k_3 — коэффициент загрузки станка; r_R — количество деталей, обрабатываемых одновременно на одной позиции.

Ограничения 4 и 5. Наименьшая и наибольшая допустимые скорости резания. Эти ограничения устанавливают взаимосвязь расчетной скорости резания с кинематикой станка по минимуму и максимуму. Они записываются в следующем виде:

$$n \geq n_{ст. \min}, \quad (3.17)$$

$$n \leq n_{ст. \max}. \quad (3.18)$$

Ограничения 6 и 7. Наименьшая и наибольшая допустимые подачи. Эти ограничения аналогично двум предыдущим устанавливают взаимосвязь расчетных величин подачи с подачами, допустимыми кинематикой станка по минимуму

$$s \geq s_{ст. \min}, \quad (3.19)$$

и максимуму

$$s \leq s_{ст. \max}. \quad (3.20)$$

Ограничение 8. Прочность режущего инструмента. Это ограничение устанавливает взаимосвязь между скоростью резания и подачей с допустимыми по прочности режущего инструмента. В основу построения этого ограничения закладывают условие нагружения режущего инструмента, например резца как консольной банки, с приложением на ее конце усилия, равного окружной составляющей силы резания P_z (рис. 23). В этом случае предел прочности материала державки резца при изгибе будет определяться зависимостью

$$\sigma_u \geq \frac{M_{изг} k_{з.п}}{W},$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент в месте закрепления державки резца на расстоянии $l_{в.р}$ вылета резца от точки приложения окружной силы $M_{изг} = P_z \cdot l_{в.р}$, МПа; $k_{з.п}$ — коэффициент запаса прочности; W — момент сопротивления сечения державки резца, мм³.

Выражая окружную силу резания в зависимости от элементов режимов резания, а также учитывая форму державки (для прямоугольного сечения шириной B_d и высотой H_d момент сопротивления равен $W = B_d H_d^2 / 6$) и значение предела прочности для незакаленной углеродистой конструкционной стали $\sigma = 200 \dots 240$ МПа, получаем после некоторых преобразований выражение для восьмого ограничения:

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{4 B_d H_d^2 (10^3)^{n_z}}{C_z f^{x_z} D^{z_z} \pi^{n_z} l_{в.р} k_{з.п} k_z}. \quad (3.21)$$

Ограничение 9. Жесткость режущего инструмента. Это ограничение устанавливает взаимосвязь скорости резания и подачи с допустимыми по жесткости режущего инструмента. Известно, что максимальная нагрузка,

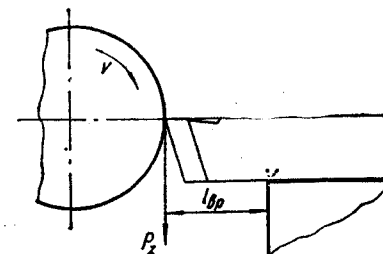


Рис. 23. Расчетная схема для построения технических ограничений по прочности и жесткости режущего инструмента (резца).

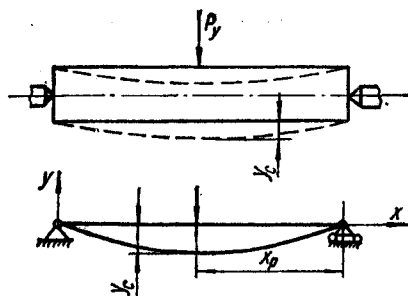


Рис. 24. Схема деформации заготовки при точении под действием радиальной составляющей силы резания.

Жесткость резца зависит от ее формы. Для прямоугольного сечения с шириной B_d и высотой H_d он определяется по формуле $I_M = B_d H_d^3 / 12$.

Из условия соотношения окружающей составляющей P_z и максимальной нагрузки, допускаемой жесткостью резца, и после соответствующего представления P_z через элементы режима резания получаем девятое ограничение в виде следующего неравенства:

$$P_z \leq P_{ж.доп}, \quad n^{n_z} s^{n_s} \leq \frac{(10^3)^{n_z+1} B_d H_d^3}{2 C_z f^{x_z} D^{n_z} \pi^{n_z} \beta_{в.р}^{k_z}}. \quad (3.22)$$

Ограничение 10. Жесткость заготовки. Это ограничение устанавливает взаимосвязь скорости резания и подачи с допустимыми по жесткости заготовки. Большое многообразие форм заготовок не позволяет получить общие зависимости для описания рассматриваемого вида технического ограничения, поэтому остановимся на его построении для точения при определенной схеме базирования и закрепления заготовки в центрах.

В основу этого ограничения положено условие, при котором величина прогиба y_c заготовки под действием радиальной составляющей силы резания P_y должна быть меньше и равна допустимому прогибу $y_{доп}$, т. е.

$$y_c \leq y_{доп}. \quad (3.23)$$

Из рис. 24 видно, что допустимый прогиб должен быть меньше величины допуска на размер $y_{доп} \leq 0,5\delta$, где δ — допуск на размер, мм.

Величина прогиба заготовки

$$y_c = \frac{P_y x_p^2 (L_{заг} - x_p)^2}{3 E I_M L_{заг}}, \quad (3.24)$$

где $L_{заг}$ — длина заготовки, мм; x_p — расстояние от правого торца до места приложения силы (до резца), мм; I_M — момент инерции сечения заготовки в месте искомого прогиба, мм⁴.

допускаемая жесткостью резца $P_{ж.доп}$, определяется по формуле

$$P_{ж.доп} = \frac{3 f E I_M}{\beta_{в.р}^3},$$

где f — допустимая стрела прогиба резца, мм; $E = (2 \dots 2,5) \cdot 10^5$ Ма; I_M — момент инерции державки резца, мм⁴.

Величина допустимого прогиба резца f зависит от требуемой точности обработки и может быть принята для чернового и получистового точения $f = 0,1$ мм и для чистового $f = 0,05$ мм. Момент инерции державки

Величина момента инерции определяется для рассматриваемого примера по формуле

$$I_M = \pi D_{пр}^4 / 64.$$

Здесь $D_{пр}$ — приведенный диаметр ступенчатого вала, мм.

После преобразования формулы (3.24) и подстановки в нее значения

$$P_y = \frac{C_y f^{x_y} s^{n_y} D^{n_y} \pi^{n_y} \beta_{в.р}^{k_y}}{(10^3)^{n_y}}$$

получим с учетом неравенства (3.23) техническое ограничение по жесткости заготовки

$$n^{n_y} s^{n_y} \leq \frac{1,5 \delta E \pi^{1-n_y} D_{пр}^4 (10^3)^{n_y} L_{заг}}{64 C_y f^{x_y} k_y D^{n_y} \pi^{n_y} x_p^2 (L_{заг} - x_p)^2}. \quad (3.25)$$

Ограничение 11. Прочность механизма подачи станка. Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетных скоростей резания и подачи с допустимыми по прочности механизма подачи станка. В [13] приведена обобщенная зависимость для определения силы подачи для различных видов обработки

$$P_s = \frac{C_s f^{x_s} s^{n_s} D^{n_s+2} \pi^{n_s} z^{n_z} u^{n_u} B^f k_s}{(10^3)^{n_s}}. \quad (3.26)$$

При продольном наружном точении коэффициенты z_s , u_s , r_s равны нулю, а при фрезеровании $n_s = 0$.

Основной смысл рассматриваемого ограничения выражается условием

$$P_s \leq P_{сдоп}. \quad (3.27)$$

Значение $P_{сдоп}$ находят в паспортных данных металлорежущего станка. Подставив в это неравенство выражение (3.26), получим выражение технического ограничения по прочности механизма подачи станка

$$n^{n_s} s^{n_s} \leq \frac{(10^3) P_{сдоп}}{C_s f^{x_s} D^{n_s+2} \pi^{n_s} z^{n_z} u^{n_u} B^f k_s}. \quad (3.28)$$

Ограничение 12. Требуемая шероховатость поверхности. Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетной скорости резания и подачи с допустимыми по обеспечению требуемой высоты или формы шероховатости согласно ГОСТ 2789—73. Известно, что выбор скорости резания и особенно подачи при получистовой и чистовой обработках очень часто определяется требуемой шероховатостью поверхности.

В основу этого ограничения могут быть положены многочисленные экспериментальные зависимости для различных характеристик шероховатости поверхности R (R_a , R_z , R_{max} , шага микронеровностей S_m , величины опорной поверхности t_p), которые представляются в виде следующих выражений мультипликативного типа

$$R = k_1 n^{k_2} s^{k_3} t^{k_4} \phi_1^{k_5} \phi^{k_6} f^{k_7}, \quad (3.29)$$

где φ , φ_1 , r — параметры геометрии режущей части инструмента; k_1 , k_2 , k_3 , ..., k_7 — экспериментально устанавливаемые коэффициенты.

После преобразования с учетом обеспечения требуемого значения шероховатости получают техническое ограничение также в виде неравенств:

$$n^{k_1} s^{k_2} \leq \frac{R}{k_1 \varphi_1^{k_3} \varphi_2^{k_4} \varphi_3^{k_5} \varphi_4^{k_6} \varphi_5^{k_7}}. \quad (3.30)$$

Знак неравенства (3.30) определяется видом характеристики шероховатости.

В тех случаях, когда требуется одновременно обеспечить несколько характеристик шероховатости, рассматриваемое техническое ограничение представляется в виде нескольких неравенств. Так, для обеспечения при наружном продольном точении заготовки из стали 45 шероховатости $R_a = 0,6$ мкм и шага микронеровностей $S_m = 100$ мкм могут быть использованы зависимости:

$$R_a = 0,16 \frac{s^{0,59} (90^\circ + \gamma)^{0,66}}{r^{0,29} \varphi^{0,19}},$$

$$S_m = 0,81 \frac{s^{1,34} (90^\circ + \gamma)^{0,1}}{r^{-0,19}},$$

где r — радиус при вершине резца; γ — передний угол.

После подстановки значений R_a и S_m и преобразований получим следующие ограничения:

$$n^{0,19} s^{-0,59} \leq 0,16 \frac{(90^\circ + \gamma)^{0,66}}{r^{0,29} R_a} \left(\frac{10^3}{\pi D} \right)^{0,19},$$

$$s^{-1,34} \leq 0,81 \frac{(90^\circ + \gamma)^{0,1}}{r^{-0,19} S_m}.$$

Выбранные и описанные выше технические ограничения, отражающие с определенной степенью точности физический процесс резания в совокупности с критерием оптимальности, позволяют построить математическую модель процесса резания. Однако решение задачи по оптимизации режимов резания с использованием степенных зависимостей для технических ограничений представляет определенную трудность. Использование для оптимизации подобных задач методов нелинейного программирования отличается значительной сложностью, хотя применение их в ряде случаев оказывается единственно возможным.

При определении режимов резания широкое применение для двух элементов n и s нашел метод линейного программирования [13]. Общая задача линейного программирования состоит в определении неотрицательных значений переменных, удовлетворяющих системе ограничений в виде линейных равенств и неравенств и обеспечивающих наибольшее значение (или наименьшее) некоторой линейной функции — критерия оптимальности.

Таким образом, первая задача, которая должна быть решена, — это приведение всех технических ограничений и оценочной функции к

линейному виду. Для примера рассмотрим приведение к линейному виду первого технического ограничения (3.11) методом логарифмирования

$$\ln n + y_0 \ln s \leq \ln \left(\frac{318 C_0 D^{2v-1} k_v}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B_\Phi^{f_v}} \right). \quad (3.31)$$

Вводя обозначение $\ln n = x_1$, $\ln (100s) = x_2$,

$$\ln \left(\frac{318 C_0 D^{2v-1} k_v}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B_\Phi^{f_v}} \right) = b_1$$

и подставляя их в неравенство (3.31), получаем

$$x_1 + y_0 x_2 \leq b_1. \quad (3.32)$$

Аналогично могут быть получены в линейном виде зависимости для других технических ограничений.

Анализ ранее рассмотренных видов и критериев оптимальности показывает, что при оптимизации по двум элементам режимов резания n и s без изменения глубины резания, стойкости инструмента и других технических факторов эти оценочные функции при некотором упрощении выражаются через n и s достаточно просто. Так, для минимальной себестоимости операции можно записать

$$C_{\text{оп}} = C_1 / ns, \quad (3.33)$$

где C_1 — постоянная величина, не зависящая от режимов резания n и s .

Из этого выражения видно, что оценочная функция $C_{\text{оп min}}$ будет наименьшей при максимальном произведении ns . В этом случае при приведении оценочной функции к линейному виду получим

$$f_0 = (x_1 + x_2)_{\text{max}}. \quad (3.34)$$

Преобразование технических ограничений к линейному виду и представление их в виде системы неравенств в совокупности с оценочной функцией дает математическую модель процесса резания металлов [13]:

$$\begin{aligned} x_1 + y_0 x_2 &\leq b_1, \\ n_2 x_1 + y_2 x_2 &\leq b_2, \\ x_1 + x_2 &\geq b_3, \\ x_1 &\geq b_4, \\ x_1 &\leq b_5, \\ x_2 &\geq b_6, \\ x_2 &\leq b_7, \\ n_2 x_1 + y_2 x_2 &\leq b_8, \\ n_2 x_1 + y_2 x_2 &\leq b_9, \\ n_y x_1 + y_y x_2 &\leq b_{10}, \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} n_5 x_1 + y_5 x_2 &\leq b_{11}, \\ k_2 x_1 + k_3 x_2 &\leq b_{12}, \\ f_0 &= (x_1 + x_2)_{\max}. \end{aligned}$$

Применительно к математической модели (3.35) задача определения оптимального режима резания сводится к отысканию среди всевозможных неотрицательных значений x_1 и x_2 системы таких значений $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$, при которых линейная функция принимает максимальное значение (f_0 max).

Математическая модель процесса резания может быть изображена в графическом виде. В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений, внутри которого любая точка удовлетворяет всем без исключения неравенствам. Поэтому этот многоугольник принято называть многоугольником решений (рис. 25).

Теория линейного программирования показывает, что экстремальное значение оценочной функции (при выпуклом многоугольнике решений) обеспечивается для x_1 и x_2 , находящихся в точке, лежащей на одной из граничных прямых или в точке их пересечения [11]. Поэтому задача отыскания оптимальных значений $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$ сводится к по-

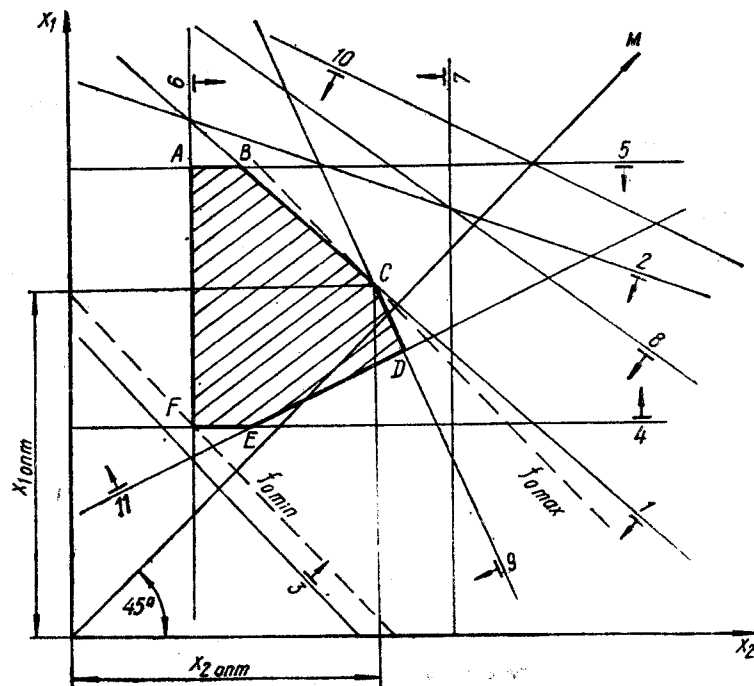


Рис. 25. Графическое изображение математической модели процесса резания.

следовательно вычислению координат всех возможных точек пересечения граничных прямых и затем определению для них наибольшей суммы $f = (x_1 + x_2)_{\max}$.

После определения координат $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$ вычисляют оптимальные значения элементов режима резания по формулам

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}, \quad (3.36)$$

$$s_{\text{опт}} = e^{x_{2\text{опт}}}/100. \quad (3.37)$$

Для определения оптимального решения задачи, заданной системой линейных уравнений и неравенств, обычно используется метод полного перебора точек, образующих выпуклый многоугольник возможных решений. Определяются попарно точки пересечения прямых и подставляются координаты этих точек в неравенства системы. Точка, координаты которой удовлетворяют всем без исключения прямым (проверка на совместимость системы уравнений) и одновременно сумма координат которой $x_1 + x_2$ является наибольшей, и будет точкой оптимума.

Общая схема алгоритма решения задачи следующая.

1. Рассматривается пара прямых и производится их проверка на параллельность.

2. Если прямые параллельны, то рассматривается следующая пара, а если нет, то определяются координаты x_1 и x_2 точки их пересечения.

3. Проверяются знаки координат. Если координаты положительны, то производится проверка: находится ли точка в области возможных решений, путем подстановки в каждое из неравенств найденных значений x_1 и x_2 . Если хотя бы одно из неравенств не удовлетворяется, то эта точка отбрасывается и начинается такой же анализ следующей пары.

4. Если x_1 и x_2 положительны и удовлетворяют всем без исключения неравенствам, то определяется сумма координат $f_0 = x_1 + x_2$ и запоминается в виде некоторого значения K . Все описанные действия производятся до тех пор, пока не будут рассмотрены все пары прямых.

5. В случае противоречивости исходных данных может оказаться, что области возможных решений нет. Признаком несовместимости системы является равенство нулю величины K , которая в противном случае равна сумме координат $x_1 + x_2$, являющихся решением задачи.

6. Если решение находится на прямой, параллельной прямой оценочной функции, то в качестве решения принимаются координаты той точки, у которой больше координата x_2 (т. е. при большем значении подачи).

7. Если система совместна и найдена точка, сумма координат которой $x_1 + x_2$ является наибольшей, то оптимальная частота вращения $n = e^{x_1}$ и оптимальная подача $s = e^{x_2}/100$.

Выбор оптимальных режимов резания на ЭВМ с использованием рассмотренного вида математической модели процесса резания целесообразно проводить также с использованием других методов линейного программирования, наиболее широко известным из которых является симплексный метод.

Эта же задача может решаться графически. Оценочная функция $f_0 = x_1 + x_2$ изображается прямой, перпендикулярной вектору максимизации M , указывающему направление максимизации оценочной функции (см. рис. 25).

Так как направление вектора M есть направление возрастания линейной функции f_0 , то следует ожидать, что в первой точке касания F с многоугольником решения она примет минимальное значение $f_{0 \min}$, а в последней точке C — максимальное значение $f_{0 \max}$. Следовательно, вершина многоугольника решений C — точка оптимума, а ее координаты x_{1c} и x_{2c} — оптимальное решение системы.

4. Компромиссные целевые функции для оптимизации режимов механической обработки

Выбор режимов обработки производится на основе анализа некоторых целевых функций, под которыми понимаются зависимости между критерием оптимизации и подлежащими оптимизации рабочими режимами. В качестве критериев оптимизации, как было показано ранее, наиболее часто используются максимальная производительность и минимальная себестоимость операции [13, 22, 26]. Анализ режимов обработки, определяемых с учетом этих критериев, показывает, что найденные оптимальные значения этих режимов не совпадают. Иначе говоря, оптимальные режимы обработки, обеспечивающие наибольшую производительность, не дают, как правило, минимальной себестоимости [58]. Учитывая важность этих критериев оптимальности, видим, что в отдельных случаях возникает задача поиска компромисса между ними.

Фактически в этом случае приходится решать задачу многокритериальной оптимизации. Наиболее простым путем решения является построение компромиссных целевых функций. Рассмотрим особенности построения и вид такой целевой функции при свертке двух критериев — максимальной производительности и минимальной себестоимости.

Штучная производительность на операции определяется величиной, обратной штучно-калькуляционному времени, которое, в свою очередь, включает штучное время $t_{шт}$ и подготовительно-заключительное время на операцию $T_{п.з}$:

$$t_{шт.к} = t_{шт} + T_{п.з}/N. \quad (3.38)$$

Анализ этой зависимости показывает, что критерий оптимальности «максимальная производительность» соответствует критерию «минимальное штучное время», так как вторая составляющая формулы (3.38) не зависит от режимов обработки и может быть опущена при формировании критерия, поскольку, как показано в работе [2], постоянные изменения только абсолютные значения критерия и исчезают с образованием экстремума. В свою очередь, $t_{шт}$ также может быть представлено в виде суммы времен, зависящих $t_{шт.р}$ и не зависящих $t_{шт.н}$ от режимов обработки (скорости v , подачи s и глубины обработки t). Для наи-

более распространенных методов обработки металлов резанием

$$t_{шт.р} = t_p (\lambda + t_{см}/T). \quad (3.39)$$

Таким образом, в дальнейшем вместо критерия «максимальная производительность» будет рассматриваться критерий «минимальное штучное время», а точнее, часть штучного времени, зависящая от режимов резания.

Критерий «минимальная себестоимость» охватывает широкий круг затрат общественного труда и, наряду с затратами «живого» труда, учитывает затраты прошлого труда, овеществленного в средствах производства (амортизация и ремонт оборудования и помещения, затраты на энергию, вспомогательные материалы, мерительный инструмент и др.). Все элементы технологической себестоимости можно условно разделить на две группы зависящие и не зависящие ($C_{оп.р}$, $C_{оп.н}$) от режимов резания. Причем величина себестоимости, зависящая от режимов резания и используемая в дальнейшем в качестве критерия оптимальности, может быть выражена в виде

$$C_{оп.р} = R t_{шт.р} + t_p/TM, \quad (3.40)$$

где R — сумма затрат на заработную плату станочника, по амортизации станка, по эксплуатации приспособления и амортизации помещений, приведенных к 1 мин работы оборудования.

Выразим полученные в общем виде критерии оптимальности (3.39) и (3.40) через основные параметры режима резания v , s , t . Для одно-резцовой обработки время резания (основное время) выражается зависимостью $t_p = Lh/vst$, мин. Учитывая также известные зависимости, связывающие скорость обработки со стойкостью инструмента и частотой вращения заготовки, можно выразить целевые функции для минимального штучного времени

$$t_{шт.р} = \frac{\pi DLh}{1000vst} \left(\lambda + \frac{t_{см} v^{1/m} t^{x_0/m} s^{y_0/m}}{C_v^{1/m}} \right) \quad (3.41)$$

и минимальной себестоимости

$$C_{оп.р} = \frac{\pi DLh}{1000vst} \left(\lambda R + \frac{(R t_{см} + M) v^{1/m} t^{x_0/m} s^{y_0/m}}{C_v^{1/m}} \right). \quad (3.42)$$

В дальнейшем примем значение глубины резания t — постоянным, а элементы резания v и s — варьируемыми параметрами. В то же время отметим, что весь ход дальнейших рассуждений справедлив и для трех переменных.

Для упрощения выражений (3.41) и (3.42) введем обозначения

$$K_1 = \frac{\pi DLh}{1000\lambda}, \quad K_2 = t_{см} v^{1/m} C_v^{-1/m},$$

$$K_3 = (R t_{см} + M) v^{1/m} C_v^{-1/m}$$

и получим

$$t_{шт.р} = \frac{K_1}{v_s} (\lambda + K_2 v^{1/m} s^{y_v/m}), \text{ мин.} \quad (3.43)$$

$$C_{оп.р} = \frac{K_1}{v_s} (\lambda R + K_3 v^{1/m} s^{y_v/m}), \text{ руб.} \quad (3.44)$$

Для получения совмещенного (компромиссного) критерия из зависимости (3.43) и (3.44), имеющих различную размерность, одним из методов свертки необходимо привести величины $t_{шт.р}$ и $C_{оп.р}$ к безразмерному виду. Для этого разделим правые и левые части выражений (3.43) и (3.44) на некоторые условно принятые постоянные или средневзвешенные значения $t_{шт.р}$, $C_{оп.р}$. В качестве условно принятых постоянных могут использоваться значения рассматриваемых критериев оптимальности при некоторых фиксированных значениях оптимизируемых параметров. Так, наиболее удобно значения $t_{шт.р}$ и $C_{оп.р}$ вычислять при заранее известных значениях скорости v_{max} и подачи s_{max} , определяемых кинематикой станка. Способ определения средневзвешенных значений штучного времени и себестоимости операции зависит от вида оптимизируемых параметров. При дискретном множестве значений скорости и подачи, например, в качестве $t_{шт.р}$ берется среднее арифметическое значение $t_{шт.р}$ для некоторого числа пар kl значений v и s

$$t_{шт.р} = \frac{1}{kl} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{k_1}{v_i s_j} (\lambda + K_2 v_i^{1/m} s_j^{y_v/m}), \text{ мин.} \quad (3.45)$$

В случае оптимизации непрерывных значений скорости и подачи, соответственно изменяющихся в интервалах $[v_{min}, v_{max}]$ и $[s_{min}, s_{max}]$, берется интегральное среднее

$$t_{шт.р} = \frac{\int_{v_{min}}^{v_{max}} \left[\int_{s_{min}}^{s_{max}} \frac{K_1}{v s} (\lambda + K_2 v^{1/m} s^{y_v/m}) ds \right] dv}{(v_{max} - v_{min})(s_{max} - s_{min})}, \text{ мин.} \quad (3.46)$$

Аналогично определяются значения для себестоимости $C_{оп.р}$. После приведения критериев оптимальности к безразмерному виду получим следующие зависимости:

$$\tau = \frac{z_1}{v s} + x_1 v^{1/m-1} s^{y_v/m-1}, \quad (3.47)$$

$$\sigma = \frac{z_2}{v s} + x_2 v^{1/m-1} s^{y_v/m-1}, \quad (3.48)$$

где τ — относительное штучное время, $\tau = t_{шт.р}/t_{шт.р}$; σ — относительная себестоимость, $\sigma = C_{оп.р}/C_{оп.р}$;

$$z_1 = \frac{K_1}{t_{шт.р}}; \quad z_2 = \frac{K_1 R}{C_{оп.р}};$$

$$x_1 = \frac{K_1 K_2}{t_{шт.р}}; \quad x_2 = \frac{K_1 K_2}{C_{оп.р}}.$$

В настоящее время известны различные методы свертки критериев. В данной работе использовался один из наиболее простых методов, основанный на построении совмещенного критерия в виде суммы частных критериев $F = \tau + \sigma$ (аддитивный критерий). Эта зависимость справедлива для критериев оптимальности, если они имеют в условиях рассматриваемой задачи одинаковую значимость. Однако это не всегда может быть выполнено. Поэтому при необходимости отразить в совмещенном критерии различную «важность» показателя штучного времени (производительности) τ и себестоимости σ , вводятся так называемые весовые коэффициенты χ_1 и χ_2 , устанавливаемые на основе экспертных оценок.

В общем случае совмещенный критерий оптимальности будет иметь вид

$$F = \chi_1 \tau + \chi_2 \sigma. \quad (3.49)$$

Подставив в зависимость (3.49) выражения (3.47, 3.48) для τ и σ , получим

$$F = \frac{A}{v s} + B' v^{1/m-1} s^{y_v/m-1}, \quad (3.50)$$

где $A = \chi_1 z_1 + \chi_2 z_2$; $B' = \chi_1 x_1 + \chi_2 x_2$.

Таким образом, двукритериальная задача может быть сведена к минимизации функции $F(v, s)$.

При анализе целевых функций для оптимизации режимов резания необходимо учитывать технические ограничения, которые определяют область существования оптимальных решений. Определяемые параметры v и s должны удовлетворять ряду технических ограничений [13], которые могут быть представлены в общем случае в виде системы неравенств

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v \leq v_{max}, \\ s_{min} &\leq s \leq s_{max}, \\ v^{\delta_i} s^{\delta_i} &\leq a_i \quad (i = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (3.51)$$

В совокупности технические ограничения дают на плоскости с координатами v и s криволинейный многоугольник решений. Следует подчеркнуть, что задача минимизации функции (3.50) на криволинейном многоугольнике является принципиально нелинейной задачей. Если система неравенств (3.51) переходом к логарифмическим координатам $\ln v$ и $\ln s$ может быть преобразована к системе линейных неравенств, как это было показано в предыдущем параграфе, то функция $F(v, s)$, напротив, не может быть сведена к линейной ни заменой переменных, ни каким-либо разумным в данной постановке задачи приемом линеаризации. Таким образом, здесь возникает задача нелинейной оптимизации.

Функция $F(v, s)$, бесконечно дифференцируема в области (3.51), может достигать своего наименьшего значения либо в критической точке, либо на границе области. Покажем, исследовав линии уровня функции $F(v, s)$, что она не имеет точек локального экстремума при положительных значениях v и s [2].

Рассмотрим некоторую линию уровня $F(v, s) = \bar{K}$ и умножим полученное равенство на vs . Тогда уравнение рассматриваемой линии запишется в виде

$$A + B'v^{1/m}s^{y_v/m} = \bar{K}vs. \quad (3.52)$$

Введем обозначение $vs = q$. После замены переменных и несложных преобразований получим

$$B'v^{\frac{1-y_v}{m}} = \frac{(\bar{K}q - A)}{q^{y_v/m}}. \quad (3.53)$$

Анализ этого уравнения позволяет сделать первые выводы о качественном поведении функции $F(v, s)$. Зафиксировав величину q (это в координатах v, s соответствует рассмотрению функции $F(v, s)$ на гиперболе $vs = q$) (рис. 26), из уравнения (3.53) видим, что при $1 - y_v > 0$ (это характерно для всех методов механической обработки) параметр $\bar{K}$ убывает при уменьшении значений V . Таким образом, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемой компромиссной целевой функции $F(v, s)$ остается справедливым положение, известное для критерия минимума себестоимости об убывании оценочной функции в сторону уменьшения скорости v и увеличения подачи s . Для установления общего вида линий уровня целевой функции $F(v, s)$ проведем дальнейшее исследование выражения (3.53). Верхняя ветвь линии уровня функции $F(v, s)$ зависит от соотношения коэффициентов y_v/m , определяемых условиями обработки (рис. 27). При этом следует рассматривать три случая.

1. $y_v/m > 1$. В этом случае при $q \rightarrow \infty$ выражение $v^{\frac{1-y_v}{m}} \rightarrow 0$, а значит и $v \rightarrow 0$. При этом общий вид линии уровня функции $F(v, s)$ будет таким, как показано на рис. 27, а.

2. $y_v/m < 1$. (Отметим, что всегда $y_v/m > 0$). В этом случае при $q \rightarrow \infty$ выражение $v^{\frac{1-y_v}{m}} \rightarrow \infty$ и, следовательно, $v \rightarrow \infty$. Линия уровня показана на рис. 27, б.

3. $y_v/m = 1$. В этом случае при $q \rightarrow \infty$ выражение $B'v^{\frac{1-y_v}{m}} \rightarrow \bar{K}$, значит v стремится к некоторой постоянной ε . Эту постоянную можно определить по зависимости $z = (\bar{K}/B')^{m/(1-m)}$. Линия уровня показана на рис. 27, в.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что функция $F(v, s)$ не имеет локальных экстремумов (так как линия уровня ее не имеет изолированных точек). Поэтому ее минимум всегда достигается на границе области допустимых значений v и s , т. е. на ограничении.

Рассуждая аналогично, теперь уже нетрудно изобразить поведение не только одной линии уровня, но и целого семейства линий уровня при изменении уровня $\bar{K}$. Возьмем $\bar{K}_1 < \bar{K}_2 < \bar{K}_3$ и построим в общих осях v, s три линии уровня $F(v, s) = \bar{K}$ ($i = 1, 2, 3$) (при этом для введенных выше случаев 1—3 построение выполняем отдельно). Результаты построения показаны на рис. 28.

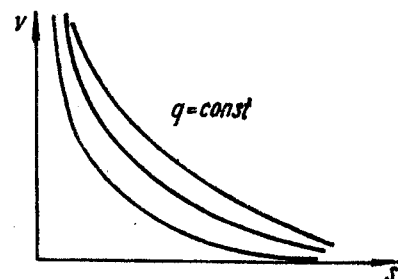
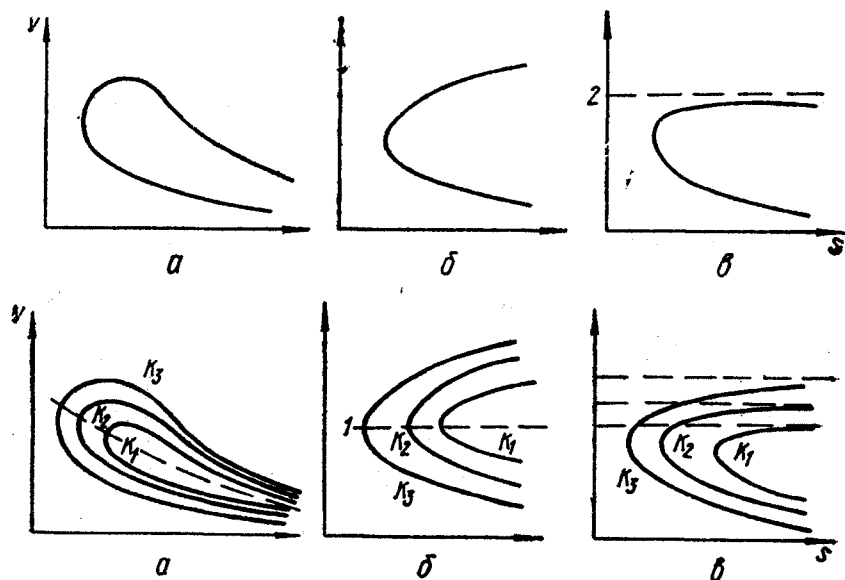


Рис. 26. Линия уровня для функции $q = vs$.

Рис. 27. Виды линий уровня целевой функции при различных значениях $\beta = y_v/m - 1$.

Рис. 28. Семейство линий уровня целевой функции $F(v, s)$.



Таким образом, во всех случаях уменьшение значений компромиссной целевой функции $F(v, s)$ происходит, как отмечалось ранее, в направлении возрастания координаты s . Это позволяет заключить, что минимум функции $F(v, s)$ следует искать на участке границы области (3.51), соответствующем наибольшим возможным значениям параметра s .

5. Оптимизация режимов обработки для дискретных и непрерывных значений параметров v и s

Оптимизация режимов механической обработки для дискретных значений v и s . Особенностью оптимизации режимов резания для большинства видов обработки на металлорежущих станках является необходимость определения дискретных значений параметров v и s , которые могут принимать конкретные значения в зависимости от кинематики станка. Для построения математической модели процесса резания в этом случае могут быть использованы ранее установленные

зависимости для технических ограничений (3.11), (3.15), (3.16), (3.21), (3.22), (3.25), (3.28) и (3.30). Однако, учитывая, что оценочные функции для частных критериев — максимальной производительности (3.43), минимальной себестоимости (3.44) и компромиссного критерия (3.50) представляются в виде выражения $F = F(v, s)$, все технические ограничения следует выражать также через значения скорости резания v и подачу s .

Исключая технические ограничения по кинематике станка, получаем следующие выражения:

по стойкости режущего инструмента

$$v s^{y_v} \leq \frac{C_v k_v D^{z_v}}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B_\phi^{f_u}}; \quad (3.54)$$

по мощности электродвигателя главного движения станка

$$v^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{N_n \eta k_{cz} D^{n_z - z_z}}{C_z t^{x_z} B_\phi^{f_z} \cdot 1000^{n_z} k_z}; \quad (3.55)$$

по заданной производительности станка

$$v s \geq \frac{\pi D I R}{1000 (60 k_s r_R - t_{в.н} R)}; \quad (3.56)$$

по прочности режущего инструмента

$$v^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{4 B_d H_d^2}{C_z t^{x_z} l_{в.п.} k_{з.п} k_z}; \quad (3.57)$$

по жесткости режущего инструмента

$$v^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{500 B_d H_d^3}{C_z t^{x_z} l_{в.п.} k_z}; \quad (3.58)$$

по жесткости заготовки

$$v^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{3 \pi E D_{пр} \delta L}{64 (L - x_p)^2 x_p^2 C_y k_y}; \quad (3.59)$$

по прочности механизма станка

$$v^{n_s} s^{y_s} \leq \frac{P_{сдоп}}{C_s t^{x_s} D^{z_s} z^{u_s} B_d^{f_s} k_s}; \quad (3.60)$$

по требуемой шероховатости поверхности

$$v^{k_z} s^{k_s} \leq \frac{R_a \pi^{k_z} D^{k_z}}{k_1 t^{k_3} \phi^{k_4} \phi^{k_5} r^{k_6} k_8 \cdot 1000^{k_z}}. \quad (3.61)$$

Обозначим правые части неравенств соответственно $b_1, b_2, b_3, \dots, b_8$. В качестве компромиссной целевой функции принимаем

$$F = \chi \left(\frac{t_{шт.р}}{t_{ср}} \right) + (1 - \chi) \left(\frac{C_{оп.р}}{C_{оп.ср}} \right), \quad (3.62)$$

где χ — весовой коэффициент, определяющий долю влияния в функции F — критерий оптимальности — максимальная производительность и изменяющийся от 0 до 1;

$$t_{шт.р} = \frac{\pi D L h}{1000 t} \left(\frac{1}{v s} + C_1 v^{\alpha} s^{\beta} \right); \quad C_1 = t_{см} \left(\frac{t^{x_v}}{C_v} \right)^{1/m};$$

$$C_{оп.р} = \frac{\pi D L h}{1000 t} \left(\frac{R}{v} + C_2 v^{\alpha} s^{\beta} \right); \quad C_2 = (R t_{см} + M) \left(\frac{t^{x_v}}{C_v} \right)^{1/m};$$

$$\alpha = 1/m - 1; \quad \beta = y_v/m - 1;$$

$t_{ср}, C_{ср}$ — средние арифметические значения $t_{шт.р}, C_{оп}$ на множестве значений пар (v_i, s_i) .

Нетрудно заметить, что компромиссная целевая функция (3.62) в зависимости от коэффициента χ может быть приведена к частному критерию оптимальности. Так, при значении $\chi = 0$ она преобразуется в критерий «минимальная себестоимость», а при $\chi = 1$ — «максимальная производительность».

Учитывая проведенный анализ поведения компромиссной целевой функции F в области технических ограничений, видим, что алгоритм определения оптимальных значений v и s должен обеспечивать нахождение точки касания целевой функции с одним из ограничений или точкой пересечения ограничения. Это достигается перебором значений v_i и s_j для $v_1, v_2, \dots, v_k$. Для каждого v_i перебором дискретных значений s_j , начиная с наибольшего s_i (что сокращает число точек перебора, так как оптимальные значения s лежат, как правило, в правой области технических ограничений), ищется максимальное s_{ji} , удовлетворяющее ограничению

$$s_{ji} \leq M, \quad (3.63)$$

где

$$M = \min [(b_1/v)^{1/y_v}, (b_2/v^{n_z})^{1/y_z}, (b_3/v), (b_4/v^{n_z})^{1/y_z}, (b_5/v^{n_z})^{1/y_z}, (b_6/v^{n_y})^{1/y_y}, (b_7/v^{n_s})^{1/y_s}, (b_8/v^{k_z})^{1/k_z}]. \quad (3.64)$$

В полученной точке дискретных значений скорости (числа оборотов) и подачи вычисляется оценочная функция $F(v_i, s_{ji})$. Далее выбирается минимум из значений $F(v_i, s_{ji})$ для $1 \leq i \leq k$. Описанный алгоритм представлен в виде блок-схемы на рис. 29.

Оптимизация режимов механической обработки для непрерывных значений v и s . При определении оптимальных режимов обработки для непрерывных значений скорости v и подачи s , что наиболее часто встречается в станках с ЧПУ и в станках с адаптивными системами управления, необходимо отыскать точку касания линий некоторого i -го технического ограничения с оценочной функцией, в которой критерий оптимальности $F(v, s)$ принимает наименьшее значение. Этот подход строится на ранее доказанном положении, что минимум функции $F(v, s)$ всегда достигается на границе криволинейного многогранника, образуемого техническими ограничениями. Причем возможны два принципиальных случая (рис. 30): 1) минимум $F(v, s)$ достигается на

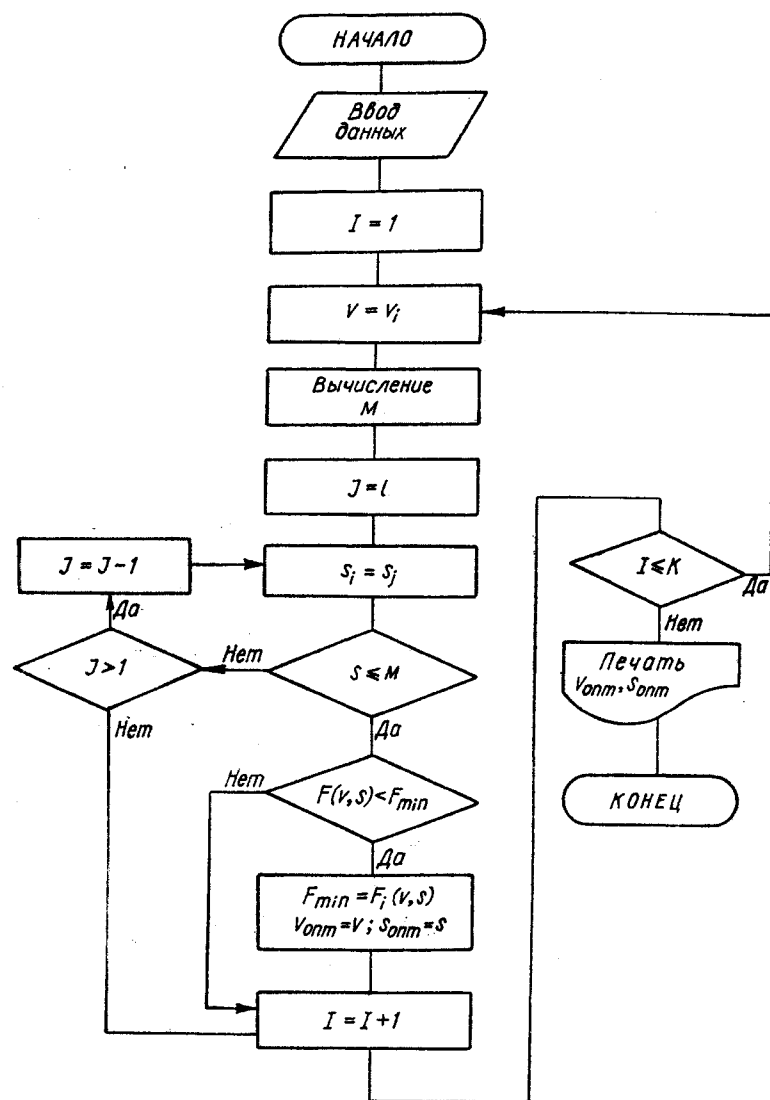


Рис. 29. Блок-схема алгоритма оптимизации режимов механической обработки для дискретных значений параметров v и s .

одной из кривых в точке A ; 2) минимум $F(v, s)$ достигается на пересечении двух кривых в точке B или B' . Таким образом, общий метод оптимизации режимов механической обработки для непрерывных значений параметров v и s состоит в определении с помощью производной всех точек типа A (отбросив те из них, которые не лежат в много-

угольнике решений) и вершин многоугольника типа B . Из полученных точек выбирается та, которая дает наименьшие значения функции $F(v, s)$.

В качестве компромиссной целевой функции использовалась свертка двух критериев — минимальной себестоимости $C_{оп.р}$ и минимального штучного времени $t_{шт.р}$ —

$$F = \chi t_{шт.р}/t_{шт.р} + (1 - \chi) C_{оп.р}/C_{оп.р}, \quad (3.65)$$

где $t_{шт.р}$, $C_{оп.р}$ — значения интегральных средних штучного времени и себестоимости, определяемых в интервалах для скорости $[v_{min}, v_{max}]$ и подачи $[s_{min}, s_{max}]$.

Зависимость (3.65) может быть преобразована к виду

$$F = \frac{1}{vs} (A + B'/T), \quad (3.66)$$

где $A = \chi C_0/t_{шт.р} + (1 - \chi) \frac{C_0 R}{C_{оп.р} \lambda}$;

$$B' = \chi \frac{C_0 t_{см}}{t_{шт.р}} + (1 - \chi) \frac{C_0 R (R t_{см} + M)}{C_{оп.р} \lambda};$$

$$C_0 = \frac{\pi D L h}{1000 l}.$$

Подставляя значение стойкости инструмента $T = C_v^{1/m} t^{-x_v/m} v^{-1/m} s^{-y_v/m}$ в выражение (3.66), получаем

$$F = \frac{1}{vs} (A + B_1 v^{1/m} s^{y_v/m}), \quad (3.67)$$

где

$$B_1 = B' t^{x_v/m} C_v^{-1/m}.$$

Рассмотрим вид технических ограничений, которые образуют криволинейный многогранник. Обычно эти ограничения представляются системой неравенств

$$\begin{aligned} v &\leq v_{max}, \\ s &\leq s_{max}, \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$v^{y_i} s^{\delta_i} \leq a_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots).$$

Возвращаясь к общему методу оптимизации режимов обработки, отыскиваем точку касания функции $F(v, s)$, определяемую зависимостью (3.67), и линии

$$v^{y_i} s^{\delta_i} = a_i. \quad (3.69)$$

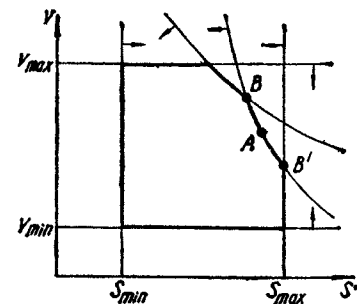


Рис. 30. Возможные случаи расположения на одном из ограниченных точек (A, B, B'), в которых целевая функция $F(v, s)$ принимает минимальное значение при оптимизации режимов обработки для непрерывных значений v и s .

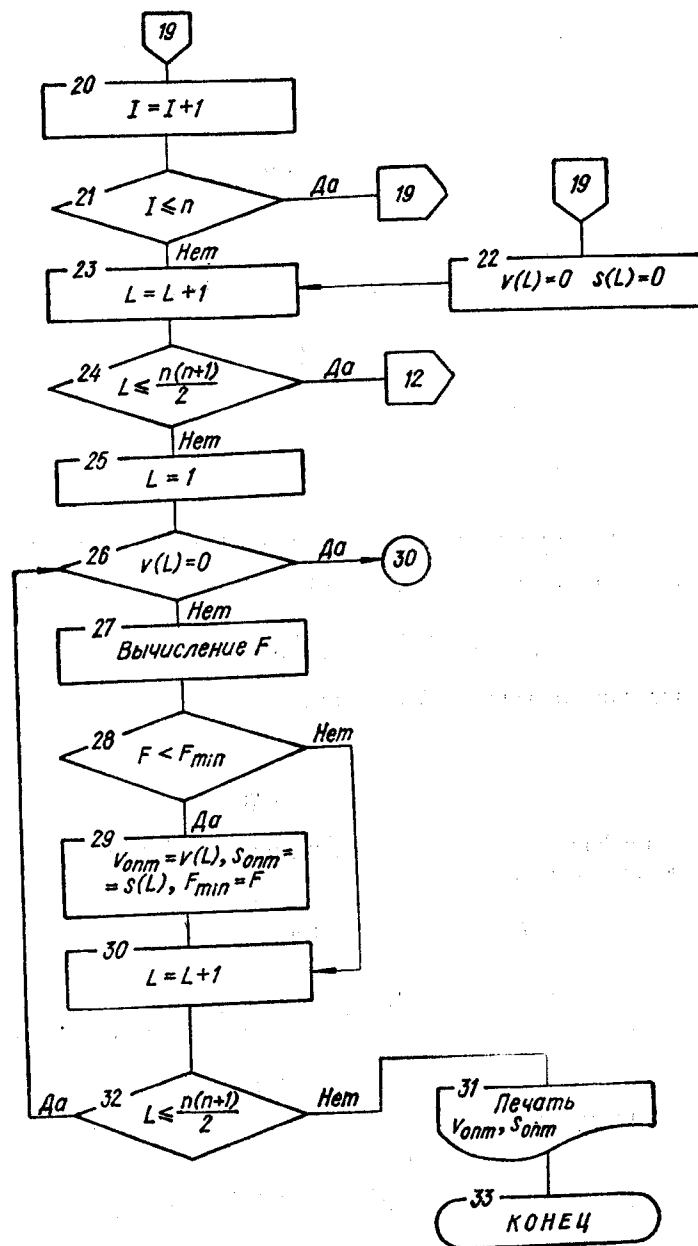
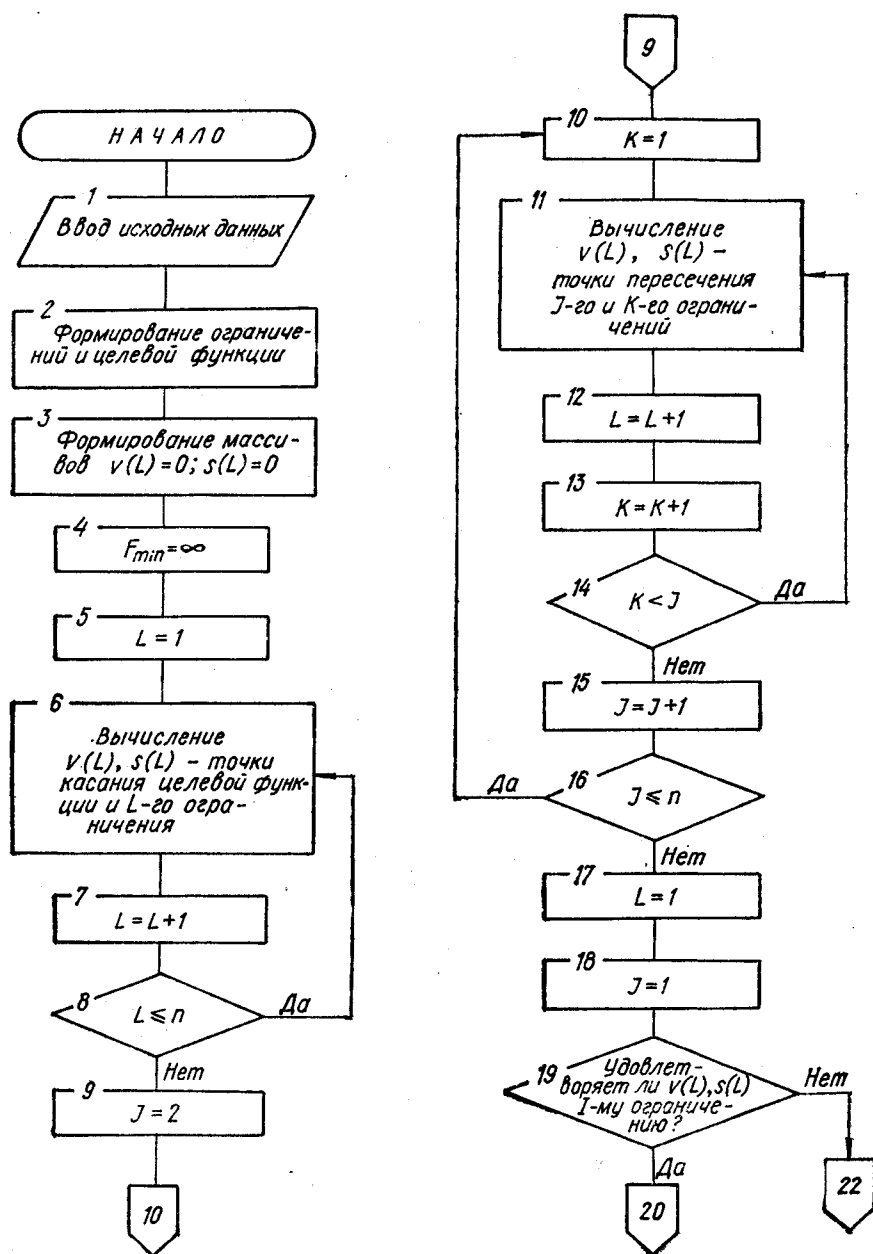


Рис. 31. Блок-схема алгоритма оптимизации режимов механической обработки для непрерывных значений параметров v и s .

Таблица 27. Коэффициенты для технических ограни

Коэф- фици- ент	Стойкость инстру- мента (I)	Мощность главного при- вода станка (II); проч- ность (III) и жесткость инструмента (IV)	Жесткость заготовки (V)
		$\frac{N_n \eta k_{c2} D^{n_z - z_z}}{C_z t^{x_z} B_{\phi}^{z_z} k_z (10^3)^{n_z}} \quad (II)$	
K	$\frac{C_v D^{z_v} k_v}{t^{x_v} T^{m_z} z_v B_{\phi}^{z_v}}$	$\frac{4 B_d H_d^2}{C_z t^{x_z} l_{B, p} k_{z, n} k_z} \quad (III)$	$\frac{3 \delta \pi E D_{np}^4 L}{128 \cdot 10^4 C_y k_y x_p (L - x_p)^2 t^{x_y}} \quad (V)$
		$\frac{500 B_d H_d^3}{C_z t^{x_z} l_{B, p} k_z} \quad (IV)$	
p	$-1/y_v$	$(I) - n_z/y_z \quad (II), (III), (IV)$	$-n_y/y_y \quad (V)$

Примечание. Значение коэффициента K для ограничений 2, 3 и 4 принимается минимальным

Для решения этой задачи выражение (3.69) удобнее преобразовать к виду

$$s = (a_i v^{-\gamma_i})^{1/\delta_i} = a^{1/\delta_i} v^{-\gamma_i/\delta_i}.$$

После введения обозначений получим

$$s = K v^p. \quad (3.70)$$

Здесь

$$K = a_i^{1/\delta_i}; \quad p = -\gamma_i/\delta_i.$$

Подставив в формулу для $F(v, s)$ значение $s = K v^p$, выразим через значения одной переменной v

$$F = \frac{1}{v^{p+1}} (A_2 + B_2 v^{\frac{1+py_v}{m}}) \quad (3.71)$$

$$(A_2 = A/K; \quad B_2 = B_1 K^{y_v/m-1}).$$

После введения обозначений $\alpha = p + 1$ и $\beta = (1 + py_v)/m$ получим

$$F = 1/v^\alpha (A_2 + B_2 v^\beta). \quad (3.72)$$

Определим первую производную для оценочной функции

$$F_v = -(\alpha/v^{\alpha+1})(A_2 + B_2 v^\beta) + (1/v^\alpha)\beta B_2 v^{\beta-1} = 1/v^{\alpha+1} [-\alpha A_2 + (\beta - \alpha) B_2 v^\beta]. \quad (3.73)$$

Приравняв производную нулю, получим уравнение

$$-A_3 + B_3 v^\beta = 0, \quad \text{где } A_3 = \alpha A_2; \quad B_3 = (\beta - \alpha) B_2. \quad (3.74)$$

чений K и p

Прочность механизма подачи станка (VI); шероховатость поверхности (VII); максимальная подача (VIII)

$$\frac{P_{сдоп}}{C_s t^{x_s} s D^{z_s} z_s^u B_{\phi}^{z_s} k_s} \quad (VI)$$

$$\frac{0,08 R_z^{1,4} r^{0,8}}{t^{0,3} \phi^{0,35} \phi_1^{0,35}} \quad (VII)$$

$$s_{max} \quad (VIII)$$

$$-n_s/y_s \quad (VI)$$

$$0 \quad (VII)$$

$$0 \quad (VIII)$$

из трех чисел.

Решая его, находим

$$v = (A_3/B_3)^{1/\beta}. \quad (3.75)$$

Найденное значение скорости является координатой точки касания $v_{кас} = v$ линии технического ограничения и оценочной функции в системе координат $v - s$. Нетрудно заметить, что вторая координата этой точки касания по оси s определяется зависимостью

$$s_{кас} = K v_{кас}^p. \quad (3.76)$$

В то же время следует отметить, что для некоторых ограничений может возникнуть случай отсутствия точек касания линии ограничений (3.70) и оценочной функции (3.67) в области допустимых решений. Это проявляется при отсутствии корней уравнения (3.74) при $\beta = 0$ и при разных знаках A_3 и B_3 .

Такой случай можно наблюдать при определении точки касания оценочной функции и линии технического ограничения по стойкости инструмента, описываемой для точения зависимостью

$$v s^{y_v} = \frac{C_v k_v}{T^m t^{x_v}}. \quad (3.77)$$

После преобразования этого ограничения получим следующее выражение:

$$s = \left(\frac{C_v k_v}{T^m t^{x_v}} \right)^{1/y_v} v^{-1/y_v}.$$

В него можно ввести ранее принятые обозначения

$$K = \left(\frac{C_v k_v}{T^m t^{x_v}} \right)^{1/y_v}, \quad p = -1/y_v.$$

Тогда коэффициент

$$\beta = \frac{1 + py_v}{m} = \frac{1 + (-1/y_v) y_v}{m} = 0.$$

При значении $\beta = 0$ корни уравнения, определяемые по зависимости (3.74), отсутствуют. В этом случае возникает необходимость определения точек пересечения кривых для различных ограничений. Для этого в общем виде рассмотрим нахождение точки пересечения двух кривых, описываемых уравнением типа (3.70) $s = K_1 v^p$ и $s = K_2 v^p$. Точка пересечения кривых определяется из решения системы

уравнений

$$\begin{cases} s = K_1 v^{p_1}, \\ s = K_2 v^{p_2}, \end{cases} \quad (3.78)$$

$$v = (K_1/K_2)^{\frac{1}{(p_2-p_1)}}, \quad (3.79)$$

$$s = K_1 (K_1/K_2)^{p_1/(p_2-p_1)}. \quad (3.80)$$

Для полученных значений v и s в точках пересечения кривых определяется величина оценочной функции $F(v, s)$ таким образом, как показано ранее на рис. 30. В этом случае минимум $F(v, s)$ может быть принят в точке B .

Для построения блок-схемы алгоритма оптимизации режимов механической обработки для непрерывных значений параметров v и s (рис. 31) удобно предварительно все технические ограничения, описываемые уравнениями вида $s = Kv^p$, представить в виде табл. 27.

6. Оптимизация режимов обработки по трем параметрам дискретных и непрерывных значений v, s, t

Оптимизация режимов механической обработки по трем параметрам дискретных значений v, s, t . При оптимизации режимов механической обработки обычно определяются параметры v и s при некотором фиксированном значении глубины резания t . Такой подход обусловлен главным образом сложностью построения математической модели процесса резания для трех параметров и их определения. В то же время, как отмечается в ряде работ [10, 43 и др.], выбор глубины резания и ее изменение в значительной степени определяют оптимизируемые параметры v и s .

В настоящей работе поставлена задача: построить математическую модель процесса резания для трех параметров — v, s и t и разработать метод и алгоритм оптимизации этих режимов резания. В качестве основных целевых функций использовались критерии минимальной себестоимости $C_{оп.р}$ и максимальной производительности или соответствующее ей минимальное штучное время, которое в дальнейшем обозначим $t_{шт.р}$. Эти критерии оптимальности, как было показано ранее, могут быть выражены через параметры v, s и t в следующем виде:

$$t_{шт.р} = \frac{\pi DLh}{1000} \frac{1}{vst} (1 + t_{см}/T), \quad (3.81)$$

$$C_{оп.р} = \frac{\pi DLh}{1000} \frac{1}{vst} \left(R/\lambda + \frac{Rt_{см} + M}{T} \right). \quad (3.82)$$

В целях создания универсальных алгоритмов, обеспечивающих оптимизацию по различным критериям, сформируем совмещенный критерий F ранее описанным методом свертки

$$F = \chi t_{шт.р}/t_{шт.р} + (1 - \chi) C_{оп.р}/C_{оп.р}, \quad (3.83)$$

где χ — весовой коэффициент, определяющий долю влияния критерия «минимальное штучное время» в совмещенном критерии F и изменяющийся от 0 до 1 в зависимости от постановки задачи. При χ совмещенный критерий F рассматривается как критерий «минимальная себестоимость», а при $\chi = 1$ — «минимальное штучное время». Такой подход к построению компромиссной функции F , как это уже отмечалось, позволяет разработать универсальный алгоритм, который обеспечивает, в зависимости от постановки задачи, многокритериальную или однокритериальную оптимизацию.

Воспользовавшись формулами (3.81) и (3.82), имеем

$$F = \frac{\chi}{t_{шт.р}} \frac{\pi DLh}{1000} \frac{1}{vst} (1 + t_{см}/T) + \frac{1 - \chi}{C_{оп.р}} \frac{\pi DLh}{1000} \frac{1}{vst} \times \\ \times \left(R/\lambda + \frac{Rt_{см} + M}{T} \right) = \frac{1}{vst} \left[\chi/t_{шт.р} C_0 \left(1 + \frac{t_{см}}{T} \right) + \frac{1 - \chi}{C_{оп.р}} C_0 \times \right. \\ \left. \times \left(R/\lambda + \frac{Rt_{см} + M}{T} \right) \right].$$

Для краткости обозначено $C_0 = \pi DLh/1000$. Раскрывая скобки и вводя обозначения, получаем следующее выражение для совмещенного критерия:

$$F = \frac{1}{vst} \left(A + \frac{B'}{T} \right), \quad (3.84)$$

где

$$A = \frac{\chi C_0}{t_{шт.р}} + \frac{(1 - \chi) C_0 R}{C_{оп.р} \lambda};$$

$$B' = \frac{\chi C_0 t_{см}}{t_{шт.р}} + (1 - \chi) \frac{C_0 (Rt_{см} + M)}{C_{оп.р}}.$$

Рассмотрим возможности оптимизации режимов резания для параметров v, s и t применительно к оценочной функции F , представленной в виде выражения (3.84). Если зафиксировать значения v и s , то функция F будет зависеть от одного параметра t . Для этого случая минимальное значение критерия F может быть определено с помощью частной производной по t

$$\partial F/\partial t = -\frac{1}{vst^2} (A + B'/T) + \frac{1}{vst} (-B'/T^2) \partial T/\partial t. \quad (3.85)$$

Используя известную зависимость для $v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v}} k_v$, получаем выражение для определения значения стойкости инструмента

$$T = (C_v k_v)^{1/m} v^{-1/m} s^{-y_v/m} t^{-x_v/m}. \quad (3.86)$$

Тогда значение

$$\partial T/\partial t = - (x_v/m) (C_v k_v)^{1/m} v^{-1/m} s^{-y_v/m} t^{-x_v/m-1}. \quad (3.87)$$

Анализируя выражения (3.86) и (3.87) и делая подстановку, записываем

$$\partial T/\partial t = - (x_v/m) T/t. \quad (3.88)$$

Учитывая это, преобразовываем выражение (3.85) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \partial F / \partial t &= -\frac{1}{vst^2} (A + B'/T) + \frac{1}{vst} (-B'/T^2) (-x_0/mt) T = \\ &= \frac{1}{vst^2} [A + (B'/T) (1 - x_0/m)]. \end{aligned} \quad (3.89)$$

Приравняв производную $\partial F / \partial t$ нулю и учитывая, что $1/vst \neq 0$, получаем

$$A + (B'/T) (1 - x_0/m) = 0. \quad (3.90)$$

Из уравнения находим T :

$$T = (B'/A) (x_0/m - 1). \quad (3.91)$$

Подставив в выражение (3.86) значение T , получим зависимость для определения оптимального значения глубины резания

$$t_{\text{опт}} = (C_v k_v T^{-m} v^{-1} s^{-1/y} v^{1/x_v}). \quad (3.92)$$

Это значение $t_{\text{опт}}$ дает абсолютный минимум функции F при заданных v и s . Однако параметры v , s и t связаны рядом технических ограничений, выражающихся в виде неравенств

$$\begin{aligned} v^{n_z} s^{y_z} t^{x_z} &\leq R_1, \\ v^{n_y} s^{y_y} t^{x_y} &\leq R_2, \\ v^{n_s} s^{y_s} t^{x_s} &\leq R_3, \\ v^{k_z} s^{k_s} t^{k_t} &\leq R_4, \end{aligned} \quad (3.93)$$

где R_i — некоторые постоянные, зависящие от характеристик станка, заготовки, инструмента и т. д., но независимые от элементов режима резания v , s , t .

Оптимальное значение глубины резания $t_{\text{опт}}$, полученное по зависимости (3.92) для заданных значений v и s , может находиться в точке трехмерного пространства, определяемого техническими ограничениями или вне его. В последнем случае величина $t_{\text{опт}}$ принимается из пересечения перпендикуляра к плоскости $v-s$ с поверхностью, описываемого одним из технических ограничений (3.93), в точке M . Графическое определение $t_{\text{опт}}$ для заданных значений v и s показано на рис. 32.

Аналитически выбор и уточнение глубины резания после определения $t_{\text{опт}}$ по зависимости (3.92) запишется в виде

$$t \leq M, \quad (3.94)$$

где

$$M = \min \{ (R_1 v^{-n_z} s^{-y_z})^{1/x_z}, (R_2 v^{-n_y} s^{-y_y})^{1/x_y}, (R_3 v^{-n_s} s^{-y_s})^{1/x_s}, (R_4 v^{-k_z} s^{-k_s})^{1/k_t} \}. \quad (3.95)$$

Значения R_1 , R_2 , R_3 , R_4 определяются исходя из анализа известных и ранее установленных следующих технических ограничений:

по мощности главного привода станка, прочности и жесткости инструмента (принимается минимальное значение из трех выражений)

$$R_1 = \min \left\{ \frac{N_n \eta k_{cz} D^{n_z - z_z}}{C_z B^f k_z (10^3)^{n_z}}; \frac{4 B_d H_d^2}{C_z l_{в.р} k_{з.п} k_z}; \frac{500 B_d H_d^3}{C_z l_{в.р}^3 k_z} \right\};$$

по жесткости заготовки

$$R_2 = \frac{3 \delta \pi E D_{\text{пр}}^4 L_{\text{заг}}}{128 C_y k_y x_p^2 (L_{\text{заг}} - x_p)^2};$$

по допускаемому усилию привода подачи станка

$$R_3 = \frac{P_{\text{с доп}}}{C_s D^{z_s} z_s^{u_s} B_{\Phi}^f k_s};$$

по шероховатости поверхности

$$R_4 = \frac{R_z (10^3)^{k_z}}{\pi^{k_z} D^{k_z} \Phi^{k_z} \Phi_1^{k_z} k_s}.$$

Таким образом, если $t_{\text{опт}} \leq M$, то $t_{\text{опт}}$ действительно дает наименьшее значение критерия F при заданных v и s . Если же $t_{\text{опт}} > M$, то в качестве оптимального значения приходится брать M — верхнюю допустимую границу для t . При фиксированных v_i и s_j задача решена. Для оптимизации по всем значениям v и s необходимо рассматривать два случая, а именно: для дискретного множества значений v и s и для непрерывного множества значений этих же параметров.

Для примера рассмотрим построение алгоритма решения рассматриваемой задачи для первого случая. Наиболее простым способом решения такой задачи на ЭВМ является метод перебора всех значений v_i , s_j из множества $v_1, v_2, \dots, v_{n1}$ и $s_1, s_2, \dots, s_{n2}$. При этом алгоритм может быть построен в следующем виде. Для каждой пары значений v_i , s_j вычисляются с помощью производной $\partial F / \partial t$ оптимальные значения $t_{\text{опт}ij}$. Проверяется выполнение условия $t_{\text{опт}} \leq M$, вытекающего из технических ограничений. В случае невыполнения этого условия принимается $t_{\text{опт}} = M$. Затем перебором находится минимум оценочной функции из чисел $F(v, s, t_{\text{опт}ij})$.

Этот подход использован при построении блок-схемы алгоритма оптимизации режимов механической обработки для дискретных значений параметров v , s и глубины резания t (рис. 33).

Оптимизация режимов механической обработки для непрерывных значений параметров v , s и t . При решении этой задачи общая стратегия оптимизации состоит в определении экстремального значения целевой функ-

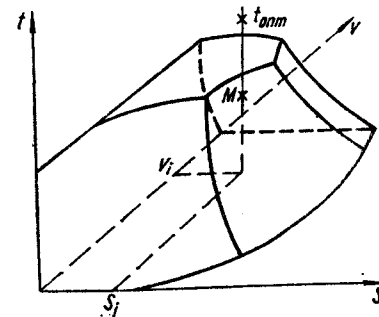


Рис. 32. Графическая модель для определения оптимальных режимов обработки v , s и t (при дискретных значениях v и s).

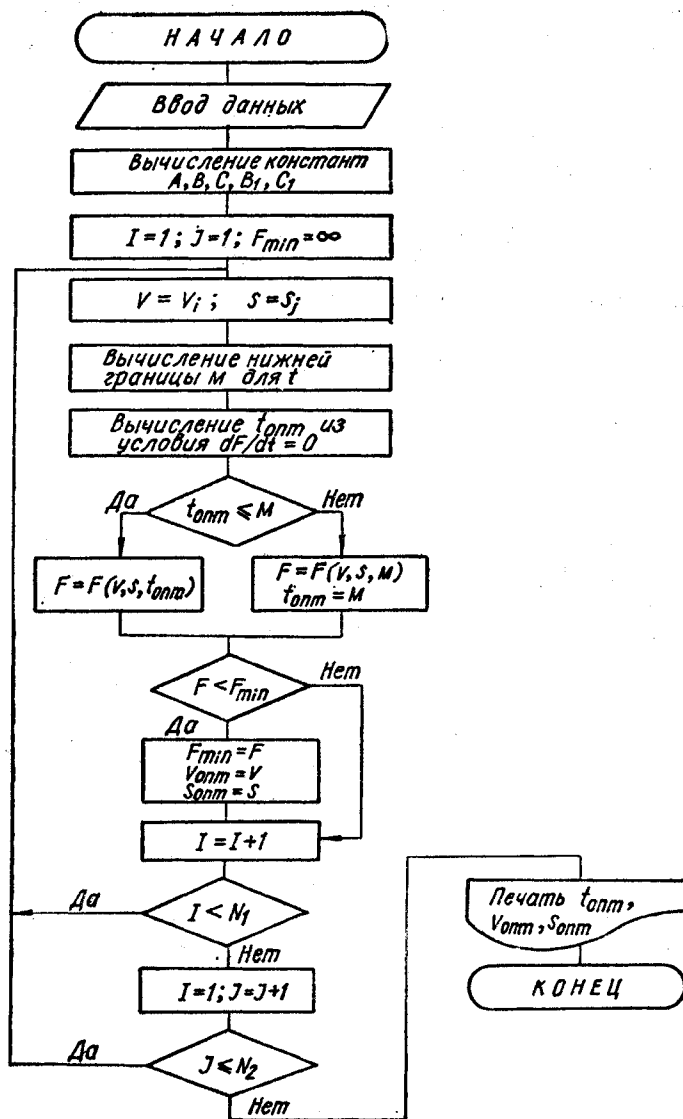


Рис. 33. Блок-схема алгоритма оптимизации режимов механической обработки v , s , t (при дискретных значениях v и s).

ции $F(v, s, t)$ на допустимой области в пространстве трех переменных v , s , t , заданной техническими ограничениями.

Как и в предыдущих случаях, рассмотрим компромиссную целевую функцию в виде свертки двух критериев — минимальной себестоимости операции $C_{оп.р}$ и максимальной производительности или минималь-

ного штучного времени $t_{шт.р}$

$$F = \chi \frac{t_{шт.р}}{t_{шт.ср}} + (1 - \chi) \frac{C_{оп.р}}{C_{оп.ср}},$$

где $t_{шт.ср}$, $C_{оп.ср}$ — значения интегральных средних производительности (штучного времени) и себестоимости, определяемых в интервалах для скорости $[v_{min}, v_{max}]$, подачи $[s_{min}, s_{max}]$ и глубины резания $[t_{min}, t_{max}]$. Эта зависимость может быть преобразована к виду (3.84). Область технических ограничений в рассматриваемом случае представляет криволинейный многогранник, заданный системой неравенств по стойкости инструмента

$$v s^y t^x \leq \frac{C_{ог} k_{ог}}{T^m}; \quad (3.96)$$

по мощности главного привода станка

$$v^{-n_z+1} s^y t^x \leq \frac{N_n \eta \cdot 102 \cdot 60}{C_z k_z}; \quad (3.97)$$

по прочности державки и жесткости режущего инструмента

$$v^{-n_z} s^y t^x \leq \min \left(\frac{4 B_d H_d^2}{l_{вп} C_z k_z}; \frac{500 B_d H_d^3 t}{C_z k_z l_{в.р}} \right); \quad (3.98)$$

по жесткости детали

$$v^{-n_y} s^y t^x \leq \frac{246 k_{ж} D_{пр}^4 \delta}{L^3 C_{py} k_{py}}; \quad (3.99)$$

по прочности механизма подачи

$$v^{-n_x} s^y t^x \leq \frac{P_s}{C_x k_x}; \quad (3.100)$$

по шероховатости поверхности (для точения)

$$s t^{0.3} \leq \frac{0,008 R_z^{1.4} r^{0.8}}{(\varphi \Phi_1)^{0.35}}; \quad (3.101)$$

по максимальной подаче, допустимой кинематикой станка,

$$s \leq s_{max}; \quad (3.102)$$

по максимальной скорости, допустимой кинематикой станка,

$$v \leq \pi D n_{max} / 1000. \quad (3.103)$$

Найдем точку в области допустимых решений, в которой целевая функция $F(v, s, t)$ будет минимальная. При общем подходе необходимо рассмотреть четыре типа точек A , B , B , Γ (рис. 34).

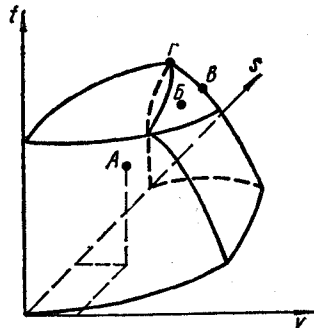


Рис. 34. Графическое представление задачи определения точек в области технических ограничений, в которых целевая функция $F(v, s, t)$ принимает минимальное значение (при непрерывных значениях v и s).

Точка A находится внутри многогранника решений; B — на одной из его криволинейных граней; C — на одном из его ребер; D — в одной из вершин многогранника. Далее покажем, что в условиях рассматриваемой задачи отыскание минимума оценочной функции $F(v, s, t)$ может вестись только в точках B и C .

С л у ч а й 1. Допустим, что целевая функция $F(v, s, t)$ достигает минимума в одной из внутренних точек многогранника типа A . Тогда в этой точке должны одновременно выполняться равенства

$$\partial F / \partial v = 0, \quad \partial F / \partial s = 0, \quad \partial F / \partial t = 0.$$

Вычислим частные производные функции

$$\begin{aligned} \partial F / \partial v &= -\frac{1}{v^2 s t} [A + B' / T] + \frac{1}{v s t} (-B' / T^2) \partial T / \partial v = \\ &= -\frac{1}{v^2 s t} \left[A + \frac{B}{T} + \frac{B' v}{T^2} \frac{\partial T}{\partial v} \right]. \end{aligned} \quad (3.104)$$

Используя известную зависимость для стойкости инструмента

$$T = C_v^{1/m} t^{-x_v/m} v^{-1/m} s^{-y_v/m}, \quad (3.105)$$

определяем значение

$$\partial T / \partial v = -\frac{1}{m} v^{(-1/m)-1} C_v^{1/m} t^{-x_v/m} s^{-y_v/m} = (-1/m) T / v. \quad (3.106)$$

Подставив значение $\partial T / \partial v$ в выражение (3.104), получим

$$\frac{\partial F}{\partial v} = -\frac{1}{v^2 s t} \left[A + \frac{B'}{T} (1 - 1/m) \right]. \quad (3.107)$$

Анализ полученного выражения показывает, что $\partial F / \partial v = 0$ эквивалентно равенству

$$A + \frac{B'}{T} (1 - 1/m) = 0. \quad (3.108)$$

Вычисляя аналогично частные производные $\partial F / \partial s$ и $\partial F / \partial t$, получаем еще два равенства

$$A + \frac{B'}{T} \left(1 - \frac{y_v}{m} \right) = 0, \quad (3.109)$$

$$A + \frac{B'}{T} \left(1 - \frac{x_v}{m} \right) = 0. \quad (3.110)$$

Очевидно, что если $x_v < 1$, $y_v < 1$ (что всегда выполняется в реальных задачах), то равенства (3.108), (3.109) не могут одновременно иметь места. Таким образом, случай 1 (нахождение минимума целевой функции $F(v, s, t)$ в точке A) может быть исключен из дальнейшего рассмотрения.

С л у ч а й 2. Допустим, что целевая функция $F(v, s, t)$ достигает минимума на поверхности одной из криволинейных граней многогранника в точке типа B .

Анализ вида технических ограничений (3.96) — (3.103) показывает, что все грани рассматриваемого многогранника могут быть описаны в общем виде параметрическим уравнением поверхности

$$v^p s^q t^r = K, \quad (3.111)$$

где p, q, r, K — коэффициенты и постоянные факторы, определяющие вид технического ограничения.

Показатели степеней p, q, r могут в отдельных случаях равняться нулю. При $q \neq 0$, что выполняется для всех ограничений, кроме ограничения (3.103), уравнение (3.111) может быть переписано в виде

$$s = K_1 v^\beta t^\alpha, \quad (3.112)$$

где $\beta = -p/q$; $\alpha = -r/q$.

Подставляя значение s в формулу (3.84) для целевой функции $F(v, s, t)$, получаем функцию F_1 двух переменных v и t , т. е. производим сужение функций F на поверхности $s = K_1 v^\beta t^\alpha$. Предварительно выражаем стойкость инструмента T в зависимости (3.105) через два параметра — v и t

$$T = C_v^{1/m} t^{-x_v/m} v^{-1/m} (K_1 v^\beta t^\alpha)^{-y_v/m} = K_2 t^{-\alpha_1} v^{-\beta_1}, \quad (3.113)$$

где $K_2 = K_1^{-y_v/m} C_v^{1/m}$; $\alpha_1 = \frac{x_v + \alpha y_v}{m}$; $\beta_1 = \frac{1 + \beta y_v}{m}$.

Тогда $F_1 = \frac{1}{v(K_1 v^\beta t^\alpha) t} \left[A + \frac{B'}{K_2} t^{\alpha_1} v^{\beta_1} \right] = \frac{1}{v^{1+\beta_1} t^{1+\alpha_1}} [A_1 + B_1 t^{\alpha_1} v^{\beta_1}]$,

где

$$A_1 = A / K_1; \quad B_1 = B' / K_1 K_2. \quad (3.114)$$

Для того чтобы минимум функции F_1 достигался в одной из точек внутри грани $s = K_1 v^\beta t^\alpha$ (т. е. не на ребре), необходимым условием является выполнение равенств

$$\partial F_1 / \partial v = 0, \quad \partial F_1 / \partial t = 0.$$

Проверим возможность выполнения этого условия. Вычислим эти частные производные, обозначив для краткости $1 + \alpha = \alpha_2$, $1 + \beta = \beta_2$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial v} &= -\frac{\beta_2}{v^{\beta_2+1} t^{\alpha_2}} [A_1 + B_1 t^{\alpha_1} v^{\beta_1}] + \frac{1}{v^{\beta_2} t^{\alpha_2}} [B_1 \beta_1 t^{\alpha_1} v^{\beta_1-1}] = \\ &= \frac{\beta_2}{v^{\beta_2+1} t^{\alpha_2}} [A_1 + B_1 \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2} \right) t^{\alpha_1} v^{\beta_1}]. \end{aligned} \quad (3.115)$$

Аналогично вычисляя $\partial F_1 / \partial t$ и приравнявая обе частные производные нулю, записываем систему уравнений

$$\begin{aligned} A_1 + B_1 (1 - \beta_1 / \beta_2) t^{\alpha_1} v^{\beta_1} &= 0, \\ A_1 + B_1 (1 - \alpha_1 / \alpha_2) t^{\alpha_1} v^{\beta_1} &= 0. \end{aligned} \quad (3.116)$$

Вычитая из первого уравнения второе, получаем

$$(\beta_1 / \beta_2 - \alpha_1 / \alpha_2) t^{\alpha_1} v^{\beta_1} = 0. \quad (3.117)$$

Последнее равенство возможно лишь при $\beta_1 / \beta_2 = \alpha_1 / \alpha_2$.

Таким образом, лишь при случайном совпадении коэффициентов α_1 / α_2 и β_1 / β_2 система уравнения может иметь общее решение. Уточним,

что в этом случае уравнения, входящие в (3.116), полностью совпадают и из них можно найти решение

$$t^{\alpha_1} v^{\beta_1} = Q, \quad (3.118)$$

где Q — положительный корень уравнения (3.117). Тогда точка минимума оценочной функции должна отыскиваться при решении системы уравнений

$$t^{\alpha_1} v^{\beta_1} = Q, \quad (3.119)$$

$$s = K_1 v^{\beta_1} t^{\alpha_1}.$$

Так как система состоит из двух уравнений с тремя неизвестными, ее решение будет представляться в виде некоторой кривой, лежащей на поверхности и обладающей тем свойством, что $\partial F_1 / \partial v = \partial F_1 / \partial t = 0$ на этой кривой. Это означает, что функция F постоянна на ней и поэтому любую ее точку можно принять за минимум, в частности точку пересечения кривой с ребром многогранника, т. е. выполнение равенства $\beta_1 / \beta_2 = \alpha_1 / \alpha_2$ при случайном совпадении коэффициентов приводит к случаю отыскания минимума целевой функции в точке типа B на ребре многогранника. Поэтому случай 2 (нахождение минимума целевой функции $F(v, s, t)$ в точке типа B) может также быть исключен из дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, оптимизация режимов механической обработки для непрерывных значений параметров v, s и t сводится к определению минимума целевой функции в точках типа B или G . Первоначально отыскивается минимум целевой функции на ребре многогранника.

Рассмотрим ребро, образованное пересечением двух поверхностей, описываемых параметрическими уравнениями

$$v^{p_1} s^{q_1} t^{r_1} = K_1, \quad (3.120)$$

$$v^{p_2} s^{q_2} t^{r_2} = K_2. \quad (3.121)$$

Это кривая, которую можно задать в параметрической форме относительно t формулами

$$v = Q_1 t^{\gamma_1}, \quad (3.122)$$

$$s = Q_2 t^{\gamma_2}, \quad (3.123)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{r_2 q_1 - r_1 q_2}{p_1 q_2 - p_2 q_1}; \quad \gamma_2 = \frac{r_2 p_1 - r_1 p_2}{q_1 p_2 - q_2 p_1};$$

$$Q = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{q_2}{p_1 q_2 - p_2 q_1}}; \quad Q_2 = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{p_2}{q_1 p_2 - q_2 p_1}}.$$

Подставляя в формулу (3.84) для целевой функции $F(v, s, t)$ выражения переменных v и s и вводя ранее принятые обозначения, записываем

$$F_2(t) = \frac{1}{t^{\psi}} [A_1 + B_1 t^{\kappa}], \quad (3.124)$$

где $\psi = \gamma_1 + \gamma_2 + 1$; $\kappa = \frac{x_v + \gamma_1 + \gamma_2 y_v}{m}$.

Найдем минимум целевой функции $F_2(t)$ с помощью производной

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} = -\frac{\psi}{t^{\psi+1}} [A_1 + B_1 t^{\kappa}] + \frac{1}{t^{\psi}} [\kappa B_1 t^{\kappa-1}] = -\frac{1}{t^{\psi+1}} \times$$

$$\times [\psi A_1 + B_1 (\psi - \kappa) t^{\kappa}]. \quad (3.125)$$

Приравняв $\partial F_2 / \partial t = 0$, получим уравнение, из которого определим значение t

$$t = \left[\frac{\psi A_1}{(\kappa - \psi) B_1} \right]^{1/\kappa}. \quad (3.126)$$

После определения t по зависимостям (3.122) и (3.123) определяются значения v и s .

Из всех полученных точек для рассмотренных ребер отбрасываются те, которые не принадлежат многограннику ограничений. Последнее положение приводит к необходимости дополнительно определять значение функции $F(v, s, t)$ в вершинах многогранника, что упрощает построение общего алгоритма оптимизации режимов обработки.

Определение точки вершины многогранника (точки типа G) производится на основе решения системы из трех уравнений

$$v^{p_1} s^{q_1} t^{r_1} = K_1,$$

$$v^{p_2} s^{q_2} t^{r_2} = K_2, \quad (3.127)$$

$$v^{p_3} s^{q_3} t^{r_3} = K_3.$$

Для упрощения решения уравнения (3.127) приводятся к линейному виду логарифмированием

$$p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1 x_3 = b_1,$$

$$p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2 x_3 = b_2, \quad (3.128)$$

$$p_3 x_1 + q_3 x_2 + r_3 x_3 = b_3,$$

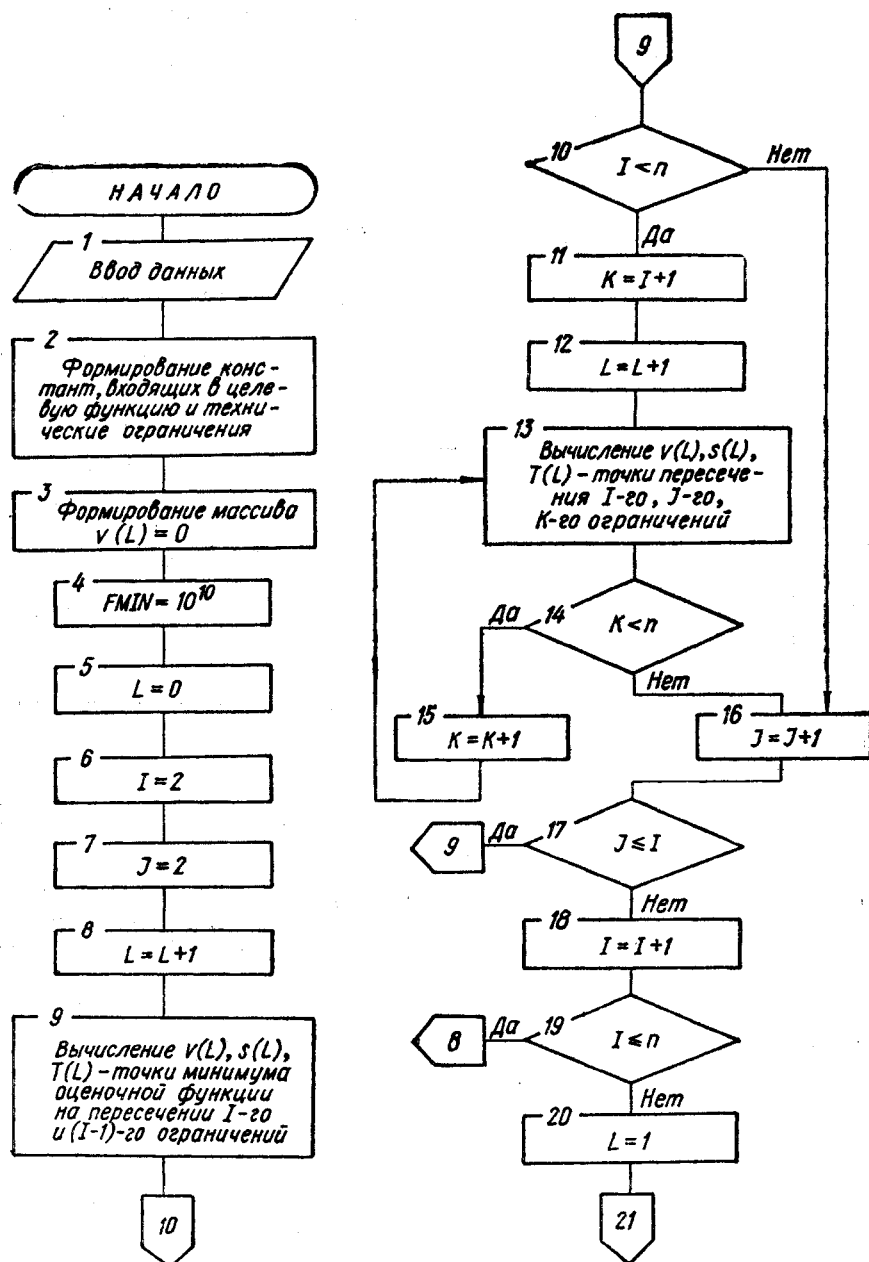
где $x_1 = \ln v$; $x_2 = \ln s$; $x_3 = \ln t$; $b_1 = \ln K_1$; $b_2 = \ln K_2$; $b_3 = \ln K_3$.

Система линейных уравнений (3.128) может быть решена одним из известных способов. В рассматриваемом алгоритме эта задача решалась по правилу Крамера.

Общий алгоритм оптимизации режимов механической обработки для непрерывных значений параметров v, s и t показан на рис. 35.

7. Параметрическая оптимизация технологических процессов при обеспечении эксплуатационных свойств деталей

При параметрической оптимизации технологических процессов и, в частности, при расчете режимов резания, как было показано выше, преимущественно используются в качестве оценочной функции максимальная производительность, минимальная себестоимость технологической операции или их компромиссное значение. Однако, как показал проведенный анализ, в отдельных случаях целесообразнее использовать другие оценочные функции. Так, при технологическом обеспе-



чении заданных характеристик качества поверхности (микрогеометрии, волнистости, микротвердости, остаточных напряжений и структуры поверхностного слоя) с целью повышения эксплуатационных свойств деталей машин более полным критерием оптимальности будет

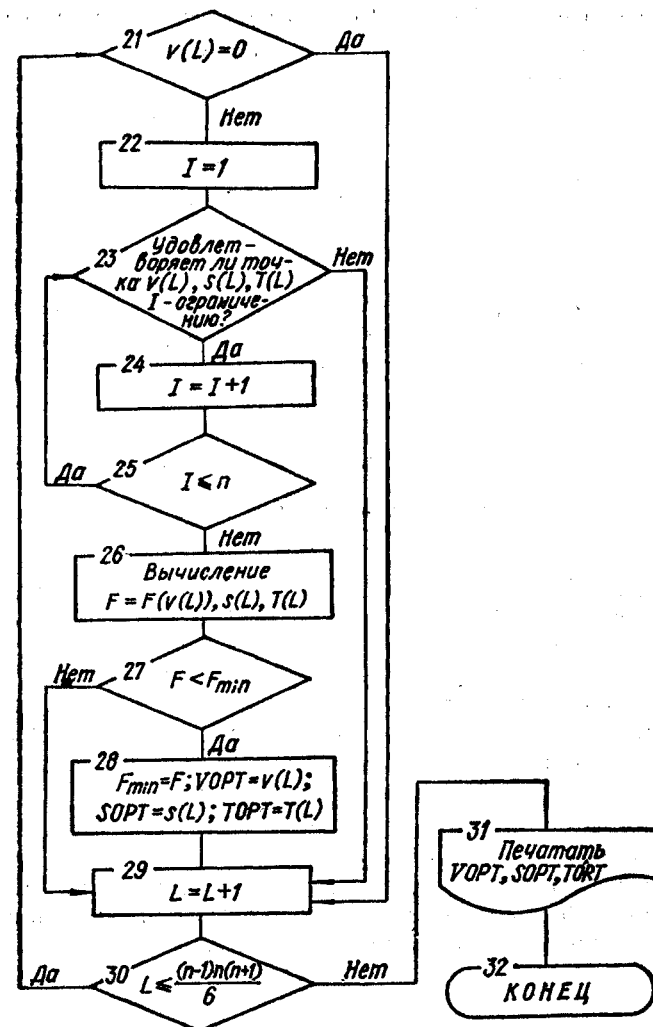


Рис. 35. Блок-схема алгоритма оптимизации режимов механической обработки для непрерывных значений v, s, t .

служить функциональная зависимость эксплуатационного свойства от технологических факторов обработки. Это вызвано тем, что на характеристики качества поверхности оказывает влияние не только скорость резания и подача, которые определяют критерий оптимальности по технологической себестоимости, но и ряд других факторов (геометрия и материал инструмента, давление и ток при ЭМО и т. д.).

Для упрощения построений математической модели технологическую наследственность целесообразнее учитывать не через одноименные характеристики качества поверхности, а через некоторые комплексные выражения, в наибольшей степени оказывающие влияние на

рассматриваемый процесс обработки. В настоящей работе для этих целей использовался безразмерный комплекс $\Delta = R_{\max}/\rho b^{1/v}$, где ρ , b , v — характеристики шероховатости соответственно радиус выступов и параметры кривой опорной поверхности.

Учитывая, что характеристики качества поверхности формируются главным образом на окончательной операции, первоначально ограничим рассматриваемую модель рамками одной операции ϕ_i с выдчей в качестве выходного параметра значения безразмерного комплекса $\Delta_{\text{пред}}$, которое может быть использовано в дальнейшем при оптимизации на уровнях предварительной обработки. Для упрощения описаний математических зависимостей индексы обозначений операций (I) опущены. В этом случае ограничения для рассматриваемой модели можно выразить в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} R_1 &= k_1 \Delta_{\text{пред}}^{k_{10}} t_1^{k_{11}} t_2^{k_{12}} \dots t_n^{k_{1n}}, \\ R_2 &= k_2 \Delta_{\text{пред}}^{k_{20}} t_1^{k_{21}} t_2^{k_{22}} \dots t_n^{k_{2n}}, \\ &\dots \dots \dots \\ R_m &= k_m \Delta_{\text{пред}}^{k_{m0}} t_1^{k_{m1}} t_2^{k_{m2}} \dots t_n^{k_{mn}}, \end{aligned} \quad (3.129)$$

где $R_1, R_2, \dots, R_m$ — характеристики качества поверхности, значения которых необходимо получить на данной операции; $k_1, k_2, \dots, k_m$; $k_{10}, \dots, k_{mu}$ — коэффициенты регрессии, постоянные для данной операции; $t_1, t_2, \dots, t_n$ — технологические факторы обработки.

Аналогично может быть выражена зависимость для критерия оптимальности — эксплуатационного свойства (износостойкости, контактной жесткости, усталостной прочности и т. д.)

$$U = k_u \Delta_{\text{пред}}^{k_{u0}} t_1^{k_{u1}} t_2^{k_{u2}} \dots t_n^{k_{un}}. \quad (3.130)$$

В выражениях (3.129) и (3.130), кроме технологических факторов $t_1, t_2, \dots, t_n$, неизвестным является значение $\Delta_{\text{пред}}$, которое можно получить через коэффициенты технологической наследственности a_Δ и b_Δ для рассматриваемого метода обработки из зависимости

$$\Delta = a_\Delta \Delta_{\text{пред}}^{b_\Delta}. \quad (3.131)$$

Учитывая, что коэффициент a_Δ экспериментально может быть получен в виде

$$a_\Delta = k_\Delta t_1^{k_{\Delta 1}} t_2^{k_{\Delta 2}} \dots t_n^{k_{\Delta n}}, \quad (3.132)$$

после преобразований получаем

$$\Delta_{\text{пред}} = \left(\frac{\Delta}{k_\Delta t_1^{k_{\Delta 1}} t_2^{k_{\Delta 2}} \dots t_n^{k_{\Delta n}}} \right)^{\frac{1}{b_\Delta}}. \quad (3.133)$$

Подставим значение $\Delta_{\text{пред}}$ в выражения (3.129) и (3.130)

$$R_1 = k_1 \left(\frac{\Delta}{k_\Delta t_1^{k_{\Delta 1}} t_2^{k_{\Delta 2}} \dots t_n^{k_{\Delta n}}} \right)^{\frac{k_{10}}{b_\Delta}} t_1^{k_{11}} t_2^{k_{12}} \dots t_n^{k_{1n}},$$

$$R_2 = k_2 \left(\frac{\Delta}{k_\Delta t_1^{k_{\Delta 1}} t_2^{k_{\Delta 2}} \dots t_n^{k_{\Delta n}}} \right)^{\frac{k_{20}}{b_\Delta}} t_1^{k_{21}} t_2^{k_{22}} \dots t_n^{k_{2n}}, \quad (3.134)$$

$$\begin{aligned} &\dots \dots \dots \\ R_m &= k_m \left(\frac{\Delta}{k_\Delta t_1^{k_{\Delta 1}} t_2^{k_{\Delta 2}} \dots t_n^{k_{\Delta n}}} \right)^{\frac{k_{m0}}{b_\Delta}} t_1^{k_{m1}} t_2^{k_{m2}} \dots t_n^{k_{mn}}, \\ &\dots \dots \dots \\ U &= k_u \left(\frac{\Delta}{k_\Delta t_1^{k_{\Delta 1}} t_2^{k_{\Delta 2}} \dots t_n^{k_{\Delta n}}} \right)^{\frac{k_{u0}}{b_\Delta}} t_1^{k_{u1}} t_2^{k_{u2}} \dots t_n^{k_{un}}. \end{aligned} \quad (3.135)$$

После преобразования этих выражений получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} R_1 &= k_1 \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{10}}{b_\Delta}} t_1^{k_{11} - \frac{k_{\Delta 1} k_{10}}{b_\Delta}} \dots t_n^{k_{1n} - \frac{k_{\Delta n} k_{10}}{b_\Delta}}, \\ R_2 &= k_2 \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{20}}{b_\Delta}} t_1^{k_{21} - \frac{k_{\Delta 1} k_{20}}{b_\Delta}} \dots t_n^{k_{2n} - \frac{k_{\Delta n} k_{20}}{b_\Delta}}, \\ &\dots \dots \dots \\ R_m &= k_m \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{m0}}{b_\Delta}} t_1^{k_{m1} - \frac{k_{\Delta 1} k_{m0}}{b_\Delta}} \dots t_n^{k_{mn} - \frac{k_{\Delta n} k_{m0}}{b_\Delta}} \end{aligned} \quad (3.136)$$

и выражение для оценочной функции

$$U = k_u \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{u0}}{b_\Delta}} t_1^{k_{u1} - \frac{k_{\Delta 1} k_{u0}}{b_\Delta}} \dots t_n^{k_{un} - \frac{k_{\Delta n} k_{u0}}{b_\Delta}}. \quad (3.137)$$

Приводим полученные выражения к линейному виду

$$\begin{aligned} \ln R_j &= \ln \left[k_j \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{j0}}{b_\Delta}} \right] + \left(k_{j1} - \frac{k_{\Delta 1} k_{j0}}{b_\Delta} \right) \ln t_1 + \dots + \\ &\quad + \left(k_{jn} - \frac{k_{\Delta n} k_{j0}}{b_\Delta} \right) \ln t_n, \end{aligned} \quad (3.138)$$

$$\begin{aligned} \ln U &= \ln \left[k_u \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{u0}}{b_\Delta}} \right] + \left(k_{u1} - \frac{k_{\Delta 1} k_{u0}}{b_\Delta} \right) \ln t_1 + \dots + \\ &\quad + \left(k_{un} - \frac{k_{\Delta n} k_{u0}}{b_\Delta} \right) \ln t_n. \end{aligned} \quad (3.139)$$

После введения переменных $x_1 = \ln t_1$, $x_2 = \ln t_2$, ..., $x_n = \ln t_n$, оценочной функции $y = \ln U$ и обозначения $C_j = \ln R_j - \ln \left[k_j \times \right.$

$$\left. \times \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{j0}}{b_\Delta}} \right], p_{ji} = k_{ji} - \frac{k_{\Delta i} k_{j0}}{b_\Delta}, p_{ui} = k_{ui} - \frac{k_{\Delta i} k_{u0}}{b_\Delta},$$

$$p_g = \ln \times \left[k_u \left(\frac{\Delta}{k_\Delta} \right)^{\frac{k_{u0}}{b_\Delta}} \right], \quad \text{получим систему уравнений типа}$$

$$C_j = \sum_{i=1}^n p_{ji} x_i \quad (3.140)$$

и уравнения оценочной функции

$$y = p_y + \sum_{i=1}^n p_{yi} x_i \quad (3.141)$$

Для оптимизации полученной математической модели могут быть применены численные методы решения задач линейного программирования. Математически эту задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом. Пусть x_i — i -я управляемая переменная ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Требуется определить такие значения x_i , чтобы выражение $\sum_{i=1}^n p_{yi} x_i$ в зависимости от содержания задачи (вида оптимизируемого эксплуатационного свойства) было максимизировано или минимизировано с учетом наложенных ограничений на изменение управляемых переменных x_i .

В линейном программировании любая задача максимизации может быть сведена к эквивалентной задаче минимизации (и наоборот), если одновременно с изменением «знака» оптимизации произвести изменение знаков перед всеми коэффициентами в выражении для целевой функции [11]. Так, максимизация $\sum_{i=1}^n p_{yi} x_i$ эквивалентна минимизации

$\sum_{i=1}^n (-p_{yi}) x_i$. Кроме того, любое линейное уравнение, а также любую систему линейных уравнений можно представить в виде некоторой совокупности неравенств с помощью одного дополнительного ограничения, т. е. систему уравнений

$$\sum_{i=1}^n p_{ji} x_i = C_j \quad (3.142)$$

можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^n p_{ji} x_i \leq C_j, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \leq \beta, \quad (3.143)$$

где $\alpha_i = \sum_{j=1}^m p_{ji}$, $\beta = -\sum_{j=1}^m C_j$.

Когда некоторое i значение переменной x_i , фигурирующей в той или иной линейной модели, не ограничено в знаке, в процессе нахождения численного решения оказывается полезным провести переход от переменных, не имеющих ограничения в знаке, к неотрицательным переменным. Так, если переменная x_i для $i = 1, 2, \dots, k \leq n$ не ограничена в знаке, то ограничения $\sum_{i=1}^n p_{ji} x_i = C_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) преобразуются к виду

зуются к виду

$$\sum_{i=1}^k p_{ji} x'_i + \sum_{i=k+1}^n p_{ji} x_i - \alpha_j z = C_j, \quad (3.144)$$

где α_j , x'_i , z — новые неотрицательные переменные ($\alpha_j = \sum_{i=1}^k p_{ji}$, $x_i \equiv x'_i - z$, $x'_i \geq 0$, $z \geq 0$).

Таким образом, любую линейную оптимизационную задачу проектирования ТП можно представить с помощью рассматриваемых выше преобразований к единой задаче максимизации $\sum_{i=1}^n p_{yi} x_i$ при нали-

чии ограничений $\sum_{i=1}^n p_{ji} x_i \leq C_j$, ($j = 1, 2, \dots, m$), $x_i \geq 0$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

Как показано в работе [24], линейная оптимизационная модель при $n = 2$ может быть представлена в виде многоугольника решений, в вершинах которого находятся экстремальные значения оптимизационной функции.

Значительно большую сложность представляет геометрическое представление пространства решений для моделей с $n > 2$ переменными. В этом случае необходимо рассматривать n -мерное евклидово пространство, т. е. множество точек, каждая из которых задается с помощью координат $(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Поскольку $x_i \geq 0$, рассмотрению подлежит только соответствующая область n -мерного евклидова пространства.

Каждому уравнению (3.142) соответствует гиперплоскость, которая делит рассматриваемое n -мерное пространство на два полупространства. Переход от (3.142) к неравенству (3.143) при каждом значении определяет направление, указывающее, какое из двух полупространств содержит точки, удовлетворяющие соответствующему неравенству (3.143). Пересечение m гиперповерхностей, соответствующих полному набору уравнений (3.142), определяет множество допустимых решений, которое является выпуклым и полиэдральным. При этом грани полиэдра лежат на гиперплоскостях (3.142), а ребра и вершины — на пересечениях последних.

Целевую функцию можно также представить в виде гиперплоскости в пространстве решений. Гиперплоскости, соответствующие различным значениям целевой функции, параллельны одна другой. Поэтому оптимальные решения не могут лежать строго внутри множества решений, так как, если значение целевой функции — конечно, то оптимальное решение должно задаваться экстремальной точкой полиэдра, определяющего область допустимых решений.

Изложенный подход к преобразованию любой математической многомерной модели оптимизации технологических факторов при различных оценочных функциях к единому виду, описанному выражениями (3.129) — (3.144), сделан для создания возможности использования общего вычислительного метода (алгоритма), позволяющего получить

численные решения для линейных оптимизационных моделей всех рассматриваемых задач.

В данном случае наиболее эффективным методом оказался так называемый симплексный алгоритм [11]. Особенность этого метода состоит в том, что в тех случаях, когда модель содержит m уравнений, для построения пробных решений используется m переменных, принимающих некоторые положительные значения при нулевых значениях остальных переменных.

Вычислительная процедура состоит из нескольких шагов.

Шаг 1. Выберем m переменных, задающих допустимое пробное решение. Исключим эти переменные из выражения для целевой функции.

Шаг 2. Проверим, нельзя ли за счет одной из переменных, приравненной вначале нулю, улучшать значения целевой функции, придавая ей отличные от нуля (причем положительные) значения. Если это возможно, перейдем к шагу 3. В противном случае прекратим вычисления, так как это означает достижение оптимального решения.

Шаг 3. Найдем предельное значение переменной, за счет которой можно улучшить значение целевой функции. Увеличение значения этой переменной допустимо до тех пор, пока одна из m переменных, вошедших в пробное решение, не обратится в нуль. Исключим из выражения для целевой функции только что упомянутую переменную и введем в пробное решение ту, за счет которой результат может быть улучшен.

Шаг 4. Разрешим систему m уравнений относительно переменных, вошедших в новое пробное решение. Исключим эти переменные из выражения для целевой функции. Вернемся к шагу 2.

В работе [11] отмечено, что рассмотренный алгоритм действительно приводит к оптимальному решению для любой модели линейного программирования за конечное число итераций.

После получения $x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}, \dots, x_{n\text{опт}}$ определяют оптимальные значения технологических факторов окончательной обработки по формуле

$$t_{i\text{опт}} = e^{x_{i\text{опт}}}. \quad (3.145)$$

Наряду с технологическими факторами, выходным параметром при решении данной задачи является значение безразмерного комплекса $\Delta_{\text{пред}}$, которое должно быть получено на уровне предварительной обработки

$$\Delta_{\text{пред.опт}} = \left(\frac{\Delta}{k_{\Delta} t_{1\text{опт}}^{k_{\Delta 1}} t_{2\text{опт}}^{k_{\Delta 2}} \dots t_{n\text{опт}}^{k_{\Delta n}}} \right)^{1/b_{\Delta}}. \quad (3.146)$$

Значение $\Delta_{\text{пред.опт}}$, учитывающее влияние технологической наследственности, в дальнейшем может использоваться в качестве технического ограничения при оптимизации технологических факторов предварительной обработки, т. е.

$$\Delta_{\text{пред.опт}} = k_{\Delta\text{пред}} \Delta_{\text{предI}}^{k_{1\text{пред}}} t_{1\text{пред}}^{k_{1\text{пред}}} \dots t_{n\text{пред}}^{k_{n\text{пред}}}. \quad (3.147)$$

Так как методы предварительной обработки оказывают меньшее влияние на окончательные характеристики качества поверхности, то ока-

залось целесообразным упростить для них общую n -мерную математическую модель оптимизации до двухмерной с использованием в качестве оценочной функции себестоимости технологической операции [59].

Тогда значение $\Delta_{\text{пред}}$, учитывающее влияние технологической наследственности, будет использоваться в качестве одного из технических ограничений. Так, для точения она может быть выражена в виде

$$\Delta_{\text{пред}} = k_1 n^{k_2} s^{k_3}. \quad (3.148)$$

При необходимости оптимизации технологических факторов на втором уровне предварительной обработки изменение Δ должно также учитываться через коэффициенты технологической наследственности $a_{\Delta I}$ и $b_{\Delta I}$

$$\Delta_{\text{предII}} = a_{\Delta} \Delta_{\text{предI}}^{b_{\Delta I}}, \quad (3.149)$$

где $\Delta_{\text{предII}}$ — значение безразмерного комплекса после II уровня предварительной обработки для операции ($p = 2$).

Таким образом, общая математическая модель ТП, сформулированная ранее с изложенными выше допущениями, может быть реализована уже на современном этапе при автоматизации технологического проектирования.

8. Определение режимов резания с использованием вероятностной модели

В рассмотренных примерах оптимизации режимов резания математические модели исследуемых процессов включали технические ограничения и оценочные функции, которые выражались в виде зависимостей от некоторого числа определенных факторов. Этот подход принято называть детерминированным. Однако при более точном описании процесса резания необходимо учитывать влияние целого ряда случайных факторов, которые оказывают влияние на область технических ограничений, вид и величину оценочной функции. В этом случае при выборе оптимальных значений режимов резания необходимо учитывать вероятностный характер математической модели, что требует применения стохастических методов стратегии поиска оптимума. Решение рассматриваемых задач с использованием этих методов в дальнейшем будет называться стохастическим подходом.

В качестве случайных факторов, оказывающих влияние на процесс резания, можно выделить следующие их отклонения от принятых значений: физико-механических свойств обрабатываемого материала; геометрии и физико-механических свойств режущего инструмента, включая значение стойкости инструмента; мощности привода главного движения станка; точностных характеристик станка; жесткости различных элементов системы СПИД; размеров заготовки; величин припусков для обработки отдельных поверхностей.

Учитывая связь между входными и выходными параметрами, можно предположить, что в предлагаемой постановке задачи значения оптимизируемых параметров скорости v , подачи s и глубины резания t

будут случайными величинами и соответственно случайной величиной будет оценочная функция.

В работах, выполненных под руководством В. А. Остафьева [50], предлагается в качестве критерия оптимальности при выборе режимов резания в условиях вероятностного подхода использовать математическое ожидание целевой функции $M(C)$. Так, применительно к критерию математическое ожидание «минимальной себестоимости обработки» использовалось следующее выражение:

$$M(C) = a_1 \left\{ t_{\text{оп}} + \frac{t_{\text{с.п}} [m_1 + M(m_2)]}{M(N_0)} \right\} + \frac{a_2 t_n m_1 + B_n [1 + M(m_2)]}{M(N_0)},$$

где a_1 — стоимость станкоминуты основного времени станка с учетом накладных расходов; a_2 — то же для заточного станка; $t_{\text{оп}}$ — оперативное время обработки одного изделия; $t_{\text{с.п}}$ — время смены инструмента и поднастройки системы СПИД; m_1 — количество смен инструмента из-за износа или допустимое число переточек (в первом приближении равно числу периодов стойкости); $M(m_2)$ — математическое ожидание количества смен инструмента из-за поломок или выкрашивания (число поломок или выкрашиваний) за время $m_1 \cdot M(T)$; $M(T)$ — математическое ожидание стойкости инструмента; $M(N_0)$ — математическое ожидание числа изделий, обработанных за среднее время стойкости инструмента с учетом всех переточек; t_n — время на переточку инструмента; B_n — стоимость инструмента.

Математическое ожидание $M(N_0)$ числа деталей, обработанных за время стойкости инструмента, и математическое ожидание $M(T)$ стойкости инструмента можно определить по формулам [50]: $M(N_0) = M(T) m_1 / t_p$, $M(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} T f(T) dT$, где $f(T)$ — плотность вероятности стойкости, которая приближенно равна среднему числу отказов в единицу времени, приходящемуся на один испытанный инструмент.

Математическое ожидание $M(m_2)$ количества смен инструмента равно $M(m_2) = m_1 M(T) / t_{\text{разр}}$, где $t_{\text{разр}}$ — среднее время безотказной работы (переработка на отказ) $t_{\text{разр}} = \int_0^{\infty} P(t_{\text{разр}}) dt$, учитывающее $P(t_{\text{разр}})$ — надежность инструмента или вероятность того, что в пределах времени $t_{\text{разр}}$ наступит разрушение инструмента.

При построении в целом математической модели процесса резания приходится учитывать множество явлений, определяемых влиянием случайных величин. Функциональные зависимости, входящие в состав математической модели, носят вероятностный характер, которые принято описывать, наряду с математическим ожиданием некоторой случайной величины, ее среднеквадратическим отклонением. С учетом этого замечания общее выражение целевой функции себестоимости обработки может быть представлено следующим образом [50]:

$$C(x) = k_1 \bar{C} + k_2 \sigma_c, \quad (3.150)$$

где k_1 и k_2 — положительные постоянные, указывающие на относительную важность $\bar{C}$ и σ_c ; $\bar{C}$ — математическое ожидание себестоимости обработки; σ_c — среднеквадратическое отклонение себестоимости обработки.

$$\sigma_c^2 = \sum_i \left(\frac{\partial C}{\partial y_i} (\bar{y}_i)^2 \sigma_{y_i}^2 \right),$$

где $\bar{y}$ — вектор математического ожидания случайных параметров y_i ; σ_{y_i} — среднеквадратическое отклонение i -й случайной переменной.

Технические ограничения, накладываемые на процесс резания, в условиях вероятностного подхода могут быть представлены в виде [50]

$$P\{R_i(x) \geq R_i\} \geq P_i, \quad (3.151)$$

где P_i — заданная доверительная вероятность для i -го ограничения.

В этих условиях общая задача оптимизации режимов резания при стохастическом подходе формулируется следующим образом: определить математическое ожидание вектора оптимизирующих переменных x , который доставляет наименьшее (наибольшее) значение выбранному критерию оптимальности (3.150) с заданной доверительной вероятностью P в области D , заданной ограничениями на параметры и показатели процесса резания (3.151).

Рассмотрим поставленную задачу оптимизации с учетом вероятностного характера математической модели применительно к ранее сформулированным подходам многокритериальной и многопараметрической оптимизации режимов резания. Для примера будет использована математическая модель процесса резания для непрерывных значений параметров v и s , описанная ранее и включающая критерий оптимальности $F(v, s)$ (3.67) и совокупность технических ограничений (3.68), образующих криволинейный многогранник (рис. 30). Как и в прежней постановке, функция $F(v, s)$ имеет точку минимума (A или $B(B')$) в многограннике ограничений, однако теперь ее координаты $v_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$ — случайные величины, или, как принято говорить, эта точка задается двухмерной случайной величиной. Требуется исследовать ее закон распределения. Известно, что полную информацию о законе распределения дают область значений D случайной величины и ее функция плотности распределения, заданная на этой области.

Принципиальным вопросом, определяющим точность решаемой задачи, является оценка распределения случайных величин, входящих в зависимости для критерия оптимальности и технических ограничений. Пусть i -е техническое ограничение имеет вид $v^{y_i s_i} \leq R_i$, где величина $R_i = f(x)$ — функция некоторых случайных величин. Для оценки закона распределения случайной величины R_i можно использовать два подхода.

Первый укрупненный подход основывается на интегральной оценке случайной величины R с определением всего множества принимаемых ею значений без рассмотрения структуры зависимости, т. е. входящих в нее случайных величин x . Пусть, например, известно, что R принимает значения в пределах от $R_{\min}$ до $R_{\max}$. Тогда, считая распределение величины R нормальным (это допущение должно проверяться, так

как возможны случаи равновероятностного распределения и других (асимметричных) видов) с параметрами математического ожидания a и среднеквадратического отклонения σ , можем определить эти параметры с помощью «правила трех сигм»: $R_{\min} = a - 3\sigma$, $R_{\max} = a + 3\sigma$. После преобразования этих зависимостей для описания закона распределения получим $a = (R_{\min} + R_{\max})/2$, $\sigma = (R_{\max} - R_{\min})/6$.

Второй подход целесообразен тогда, когда информацию об области значений величины R получить затруднительно, зато имеется информация о распределении составляющих ее слагаемых или сомножителей, являющихся случайными величинами x_j . В этом случае используются методы определения закона распределения в виде значений a и σ , известные в теории вероятности. Так, если имеются две случайные независимые величины x_1 и x_2 , для которых ранее определены их математические ожидания соответственно a_1 и a_2 , а также среднеквадратические отклонения σ_1 и σ_2 , то случайная величина $R = x_1 x_2$ имеет математическое ожидание $a = a_1 a_2$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{a_1^2 \sigma_2^2 + a_2^2 \sigma_1^2 + \sigma_1^2 \sigma_2^2}$. Этот подход может быть обобщен на произведение n сомножителей $x_1 x_2 \dots x_n$ и другие сочетания случайных величин для определения закона распределения R_i .

При построении из технических ограничений области возможных решений D с учетом распределения случайных величин R_i приходится определять их области пересечения. На рис. 36 показано образование области распределения случайных величин оптимальных режимов обработки $v_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$ при пересечении области распределения значений R_1 и R_2 соответственно для первого (Огр. 1) и второго ограничений (Огр. 2). Образованный криволинейный многоугольник $ABCD$ ограничивает область всех возможных случайных величин $v_{\text{опт}}$ и $s_{\text{опт}}$. Определение плотности распределения случайных величин $v_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$ в многоугольнике $ABCD$ аналитическим методом представляет значитель-

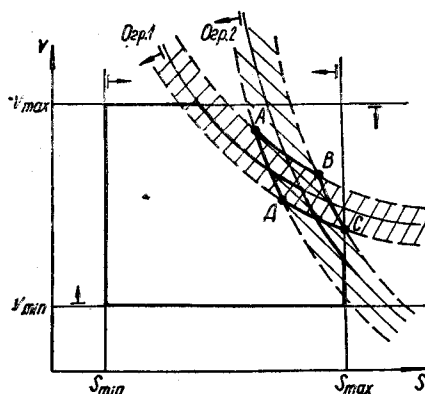


Рис. 36. Построение области $ABCD$ распределения случайных величин оптимальных режимов обработки $v_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$.

ную трудность ввиду сложности выражений для оценочной функции (3.67) и технических ограничений (3.68), а также множества вариантов их взаимного расположения, зависящего от исходных данных и значений случайных величин x , входящих в эти ограничения. Для решения этой задачи могут быть использованы различные методы. Так, в работе [50] предлагается использовать метод штрафных функций.

В рассматриваемой работе для исследования распределения двухмерной, а при необходимости трех- и n -мерной случайных величин, было предложено использовать метод статистического моделирования

[17], тесно связанный с методом Монте-Карло [44]. Особенность этого подхода состоит в следующем: с помощью метода Монте-Карло моделируются («разыгрываются») значения всех входящих в технические ограничения и оценочную функцию случайных величин. Учитывая ранее высказанное предположение о нормальном законе распределения рассматриваемых случайных величин $N(a, \sigma)$, в этом случае может быть рекомендован алгоритм датчика случайных чисел, выдающий последовательность $\{r_i\}$ чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$. Затем, используя формулы, известные из теории вероятности и математической статистики

$$x_1 = a_1 + \sigma_1 \sqrt{-2 \ln r_1} \cos 2\pi r_2,$$

$$x_2 = a_2 + \sigma_2 \sqrt{-2 \ln r_3} \cos 2\pi r_4,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$x_n = a_n + \sigma_n \sqrt{-2 \ln r_{2n-1}} \cos 2\pi r_{2n},$$

получают числовые значения случайных величин x_i . Для этих принятых числовых значений рассматриваемых величин проводят определение оптимальных значений $v_{\text{опт}}$ и $s_{\text{опт}}$ с использованием известных алгоритмов детерминированного подхода. Так, в частном случае при оптимизации непрерывных значений v и s используется алгоритм, представленный в виде блок-схемы на рис. 31. Указанный процесс повторяется с вновь разыгрываемыми значениями всех случайных величин x .

После m повторений описанного процесса получим m точек $A_1(v_{\text{опт}}^{(1)}, s_{\text{опт}}^{(1)})$, $A_2(v_{\text{опт}}^{(2)}, s_{\text{опт}}^{(2)})$, ..., $A_m(v_{\text{опт}}^{(m)}, s_{\text{опт}}^{(m)})$ — так называемую статистическую выборку объема m двумерной случайной величины A . Эта выборка, во-первых, дает информацию об области D значений величины A ; во-вторых, о распределении ее значений внутри этой области. Полученная выборка как результат статистического «эксперимента» представляет определенный практический интерес.

Используя методы многомерного статистического анализа [9], можно обработать эту выборку и получить ту или иную информацию о числовых характеристиках случайных величин $v_{\text{опт}}$, $s_{\text{опт}}$ — математическое ожидание, дисперсию, а также при необходимости найти приближенную функциональную зависимость между ними.

Рассмотренный подход, учитывая его универсальность, может быть перенесен для решения задачи трехмерной оптимизации режимов обработки v , s и t . В этом случае в качестве детерминированного алгоритма оптимизации может использоваться алгоритм, ранее рассмотренный на рис. 35.

Общий вид блок-схемы оптимизации режимов механической обработки при стохастическом подходе показан на рис. 37.

9. Программный комплекс многокритериальной оптимизации режимов механической обработки

При разработке автоматизированных систем проектирования технологических процессов необходимо учитывать многообразие математических моделей для расчета режимов резания. Анализ классификации

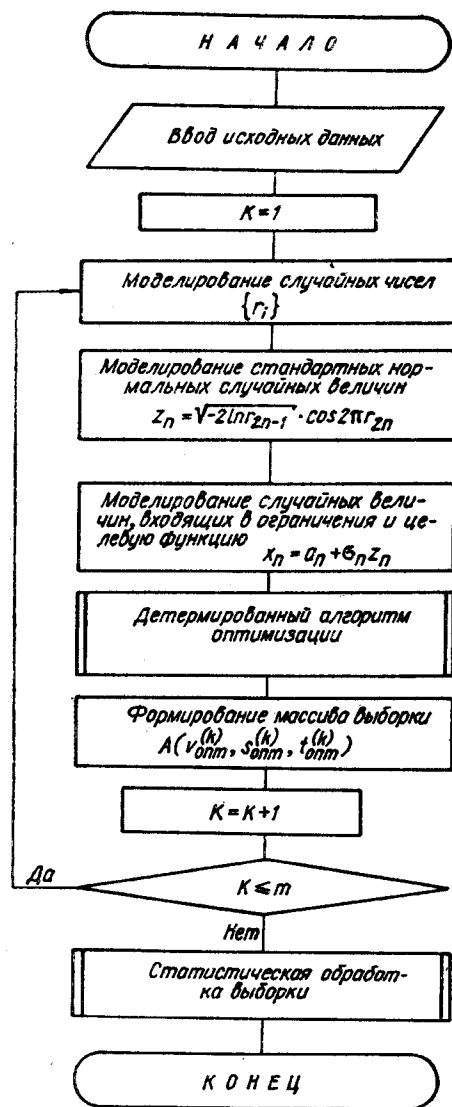


Рис. 37. Блок-схема алгоритма оптимизации режимов механической обработки при стохастическом подходе.

параметрической оптимизации для дискретных значений v и s ; ОПТИМ-2N — программа двухпараметрической оптимизации для непрерывных значений v и s ; ОПТИМ-3D — программа трехпараметрической оптимизации для дискретных значений v и s ; ОПТИМ-3N — программа трехпараметрической оптимизации для непрерывных значений v и s ; ОПТИМ-K — программа многопараметрической оптимизации.

Все программные модули, написанные на языке ФОРТРАН-IV

таких моделей показывает, что наиболее важными признаками для них являются вид критериев оптимальности и состав набора оптимизируемых параметров. В качестве критериев оптимальности используются максимальная производительность, минимальная себестоимость или свертка этих критериев.

При разработке математических моделей для расчета режимов резания необходимо учитывать вид оптимизируемых параметров, имеющих дискретные или непрерывные значения. Первый вид параметров определяется для режимов обработки на универсальных типах станков, а второй — для станков с адаптивными системами управления, с ЧПУ и других, оснащенных устройствами бесступенчатого регулирования привода подач и скорости вращения шпинделя. Многообразие задач, возникающих при выборе оптимальных режимов обработки, требует создания универсальной программы или комплекса программ, обеспечивающих решение задач при различных видах целевых функций и разном количестве оптимизируемых параметров.

На основе выполненных исследований видов компромиссных целевых функций и разработанных методов двух- (v, s) и трехпараметрической (v, s, t) оптимизации разработаны следующие программные методы: ОПТИМ-2D — программа двухпараметрической оптимизации для дискретных значений v и s ; ОПТИМ-2N — программа двухпараметрической оптимизации для непрерывных значений v и s ; ОПТИМ-3D — программа трехпараметрической оптимизации для дискретных значений v и s ; ОПТИМ-3N — программа трехпараметрической оптимизации для непрерывных значений v и s ; ОПТИМ-K — программа многопараметрической оптимизации.

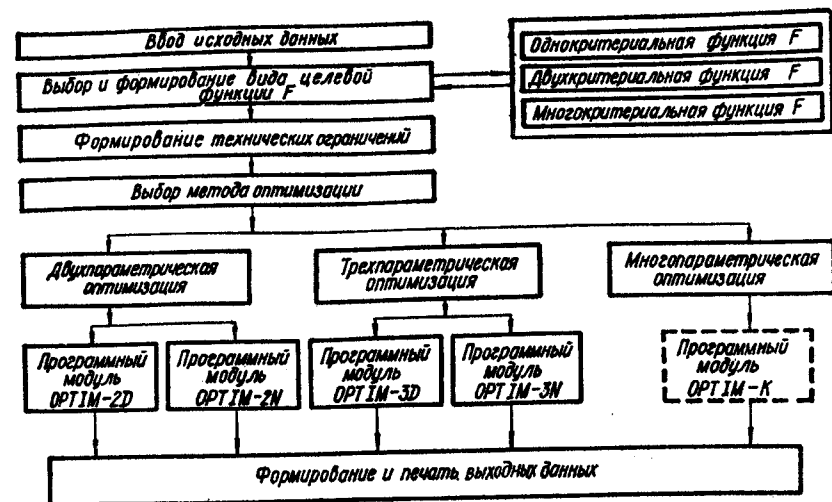


Рис. 38. Структурная схема программного комплекса оптимизации режимов механической обработки.

и реализованные на ЭВМ ЕС1022, объединены в программный комплекс оптимизации режимов механической обработки (рис. 38). В этот комплекс, наряду с рассмотренными программными модулями, включены инвариантные подпрограммы выбора и формирования вида целевой функции, формирования технических ограничений, формирования и печати выходных данных.

Несколько отличный подход использован при разработке программного модуля ОПТИМ-K, предназначенного для многопараметрической оптимизации режимов обработки на финишных методах, окончательно формирующих требуемое качество детали (точность изготовления, шероховатость, волнистость, микротвердость поверхности) и ее эксплуатационные свойства. В этих условиях возникает необходимость управления от трех до семи и более технологическими параметрами. В качестве критерия оптимальности в этом случае использовались экспериментально установленные зависимости, связывающие эксплуатационные свойства (износостойкость, контактную жесткость, усталостную прочность и др.) или характеристики качества поверхности с технологическими параметрами.

Рассмотренный программный комплекс предназначен для решения различных задач оптимизации режимов механической обработки при автономном его использовании, а также в качестве отдельных модулей в системе автоматизации технического нормирования или в САПР ТП. Кроме того, отдельные программные модули, такие, как ОПТИМ-2N и ОПТИМ-3N, могут быть использованы для оптимизации режимов обработки при управлении станками с ЧПУ от микроЭВМ.

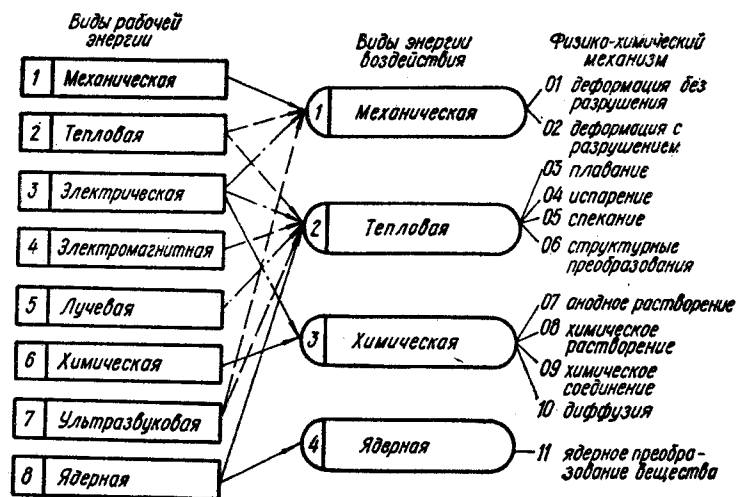


Рис. 39 Схема преобразования энергии в процессах обработки.

случаях под деформацией понимается изменение взаимного расположения множества частиц твердого тела, которое приводит к изменению формы и размера тела и его частей и вызывает изменение сил взаимодействия между частицами, т. е. возникновение напряжений.

Плавление — процесс перехода вещества из кристаллического (твердого) состояния в жидкое вследствие поглощения теплоты (теплоты плавления). Согласно молекулярно-кинетическим представлениям плавление осуществляется следующим образом. При подведении к кристаллическому телу теплоты увеличивается энергия колебаний (амплитуда колебаний) его атомов, что приводит к повышению температуры тела и способствует образованию в кристалле различных дефектов (незаполненных узлов кристаллической решетки — вакансий, нарушений периодичности решетки внедрившимися между ее узлами атомами). Постепенный рост дефектов и их объединение характеризуют стадию предплавления. При достижении температуры плавления в кристалле создается практическая концентрация дефектов. В дальнейшем при подводе тепловой энергии происходит разрыв межатомных связей и разрушение порядка расположения атомов в кристаллах.

Испарение — процесс перехода вещества из жидкого или твердого агрегатного состояния в газообразное. Испарение твердых тел называется возгонкой или сублимацией. Для реализации процесса испарения единицы массы вещества должно быть передано определенное количество теплоты испарения.

Спекание — процесс соединения мелкозернистых и порошкообразных материалов в более крупные объемы при повышенной температуре.

Структурные преобразования — процесс изменения физико-механических свойств структуры и размеров зерен материала заготовки (вследствие теплового или механического воздействия).

Анодное растворение — процесс удаления металла под действием электрического тока в среде электролита без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой. Под действием тока в электролите материал анода (заготовки) растворяется в виде продуктов обработки и выносятся из промежутка потоком электролита. В результате реакции образуются газообразные продукты, которые удаляются в атмосферу. Инструмент (катод) в процессе обработки не изнашивается.

Химическое растворение — процесс снятия слоя материала за счет химических реакций в зоне обработки в растворах щелочей или кислот.

Химическое соединение — процесс образования на поверхности материала новых соединений за счет химических реакций материала заготовки и окружающей среды.

Диффузия — процесс проникновения частиц соприкасающегося вещества (газа, жидкости или твердого материала) в поверхностные слои металла вследствие теплового движения частиц вещества. В этом случае происходит диффузия атомов материалов. Диффузия может проявляться в обмене местами атомов с вакансиями (незанятыми узлами кристаллической решетки), в перемещении атомов по междоузлиям, прямом обмене местами двух соседних атомов и др.

Ядерное преобразование вещества — процесс изменения физико-механических свойств и структуры материала за счет нейтронного, электронного облучения, а также облучения β -частицами.

3. Построение кинематических схем обработки

Метод обработки заготовки связан с выполнением ею различных движений относительно инструмента или последнего относительно заготовки. Описание этих движений выполняется в виде принципиальных кинематических схем обработки.

Контур обработанных поверхностей может рассматриваться как траектория или часть траектории относительного рабочего движения, предопределяемого кинематическим соотношением: инструмент — заготовка. Как отмечается в [14], с изменением принципиальной кинематической схемы обработки и кинематического соотношения инструмент — заготовка изменяются характер траектории и величина скорости относительного рабочего движения и одновременно с этим также и очертания образуемого им контура обрабатываемой заготовки.

В настоящее время при анализе методов обработки обычно принципиальные кинематические схемы обработки рассматриваются как заранее заданные, определяемые кинематикой существующих станков. Это значительно снижает возможности применения новых схем обработки, что особенно важно при синтезе новых оригинальных методов обработки. Принципиальная кинематическая схема обработки определяет абсолютные движения заготовки и инструмента, обеспечивающие процесс формообразования. При этом движения холостых ходов, не связанных с процессом формообразования, принципиальной кинематической схемой обработки не учитываются. Поэтому отождествление принципиальной кинематической схемы обработки и кинематиче-

ской схемы станка не всегда возможно. Обычно последняя является более сложной.

Известны различные классификации принципиальных кинематических схем обработки [14, 23]. Большинство из них строится на сочетании двух элементарных движений: прямолинейного и вращательного.

Наиболее полная классификация, предложенная в работе [14], предусматривает различное количество и сочетание названных элементарных движений и включает восемь групп движений: первая — прямолинейное, вторая — два прямолинейных, третья — одно вращательное, четвертая — одно вращательное и одно прямолинейное, пятая — два вращательных, шестая — два прямолинейных и одно вращательное, седьмая — два вращательных и одно прямолинейное, восьмая — три вращательных движения.

Как показывает анализ различных кинематических схем обработки, наибольшее применение находят первые шесть групп рассмотренной классификации, поэтому в дальнейшем рассмотрение кинематических схем обработки будет ими ограничено.

Структура принципиальной кинематической схемы основана на одном (первая и третья группы) или нескольких (все остальные группы) движениях, сообщаемых механизмами станка заготовке или инструменту или заготовке и инструменту отдельно. При сочетании нескольких элементарных движений необходимо выделить одно, являющееся скоростью обработки, второе — подачей. Возможно использование большего числа элементарных движений, которые будут называться вспомогательными [25]. Кроме названных главных (явных) движений в процессе формообразования могут участвовать дополнительные: — прерывистые, сообщаемые инструменту или заготовке в промежутках между рабочими циклами; — за счет конструктивных элементов инструмента, приводящих во время рабочего цикла к эффекту «скрытого движения подачи», например внутренние протяжки.

Следует иметь в виду, что два и более элементарных движения могут иметь совершенно произвольные направления и скорость. Их сочетание образуют различные методы обработки. Так, для первой группы классификации кинематических схем обработки можно сопоставить такие методы, как строгание, долбление, протягивание протяжками и др. Анализ существующих методов обработки и кинематических схем их реализации показывает, что они охватывают только часть возможных решений, что позволяет сделать предположение о возможности создания методики выбора новых принципиальных кинематических схем обработки, которые могут быть положены в основу создания новых методов обработки.

Для упрощения построения методов выбора кинематических схем обработки будут рассматриваться следующие виды элементарных и сложных движений, которые могут совершать заготовки и (или) инструмент: неподвижное (0), прямолинейное (1), вращательное (2), вращательно-поступательное (3).

В скобках приведены коды видов движения, используемые в дальнейшем при построении методики выбора кинематических схем обра-

ботки. Общее число возможных сочетаний элементарных видов движений не превышает 16:

Код вида движения заготовки	0	0 1 0 2	1 1 2 2 0 3	1 2 3 3	3
Код вида движения инструмента	0	1 0 2 0	1 2 1 2 3 0	3 3 1 2	3
Количество элементарных движений	0	1	2	3	4

Как видно из приведенных данных, количество элементарных движений может изменяться в кинематических схемах обработки от 0 до 4. Все эти СФО представляют практический интерес.

4. Классификация методов обработки

Основными элементами в структуре ТП являются методы обработки. Применение системного подхода к их проектированию требует разработки классификации существующих методов обработки на единой методологической основе.

Анализ выполняемых исследований в этом направлении показывает, что в настоящее время отсутствует единая точка зрения на классификацию МО. Предложенные рядом авторов классификации, как правило, отличаются одна от другой и затрагивают различные виды обработки. Решение задач, возникающих при выборе МО, особенно в условиях автоматизированных систем проектирования, показывает необходимость создания более общих подходов при разработке этого вида классификации. При этом наиболее важными признаками классификации должны быть принцип действия метода обработки, его назначение и область применения.

Как показывает опыт создания различных видов классификаций, наиболее удобным является многоуровневая иерархическая структура классификаций. В целях создания более общей классификации с учетом принципов системного подхода МО на первом уровне разделены на три класса по способу воздействия на предмет производства: без съема материала; со съемом материала; с нанесением материала.

На втором уровне для каждого класса выделялись подклассы, характеризующие главным образом виды используемой при обработке энергии. В свою очередь, третий уровень характеризует ФХМ. Разновидность методов в зависимости от вида используемого инструмента и кинематики обработки устанавливается четвертым уровнем.

Таким образом, любой метод обработки может быть описан четырехзначным кодом: $X_1X_2X_3X_4$, где X_1 — класс; X_2 — подкласс; X_3 — вид; X_4 — разновидность.

На рис. 40—42 приведены структурные схемы классификации известных методов обработки.

Методы без съема материала (см. рис. 40) можно условно разделить на два вида: с изменением формы и размеров детали (обработка давлением) и без изменения формы и размеров детали (термическая и химико-термическая обработки). Эти методы отличаются по принципу

действия и по назначению. МО давлением выполняют функции формообразования, упрочнения, обеспечения требуемой точности и шероховатости поверхности и физико-механических свойств. Методы термической и химико-термической обработки применяются для упрочнения, повышения технологичности металла и придания ему особых физических свойств. Обработка давлением объединяет методы формообразования и калибрования. Формообразование в этом случае включает методы холодной и горячей обработки давлением. Последняя группа методов широко используется при получении заготовок (штамповок и поковок), которые в настоящей работе не рассматриваются.

Кодовое обозначение методов согласно приведенному на рис. 40 с разделением их на группы по видам (третий уровень) классификации следующее:

1111 — прокатка, 1112 — волочение, 1113 — ротационное обжатие; 1121 — накатывание резьб, 1122 — накатывание шлицев, 1123 — накатывание зубчатых поверхностей;

1131 — обкатывание, 1132 — выглаживание, 1133 — протягивание, 1134 — виброобработка, 1135 — обдувка дробью, 1136 — чеканка;

1211 — поверхностная закалка, 1221 — закалка, 1222 — нормализация, 1223 — улучшение, 1224 — низкотемпературная обработка;

1231 — отпуск, 1232 — отжиг, 1233 — старение, 1234 — нормализация, 1235 — улучшение;

1311 — цементация, 1312 — азотирование, 1313 — цианирование, 1314 — нитроцементация, 1315 — силицирование, 1316 — борирование, 1317 — окисление, 1318 — сульфидирование;

1321 — хромирование, 1322 — алитирование, 1323 — титанирование, 1324 — цинкование, 1325 — никелирование;

1411 — нейтронное облучение, 1412 — электронное облучение, 1413 — облучение β -частицами;

1421 — упрочнение в магнитном поле;

1511 — термомеханическая обработка;

1521 — электромеханическая обработка;

1531 — термомагнитная обработка.

Методы обработки со съемом материала (см. рис. 41) — наиболее распространенные методы формообразования деталей. По основному виду используемой энергии для реализации процесса обработки они делятся на механические, электрофизические, электрохимические, химические и комбинированные. Разнообразие физико-химических механизмов, используемых в этих методах обработки, затрудняет их классификацию на единой методологической основе. Особую сложность представляет классификация этих методов на третьем уровне. Здесь для механических методов введены четыре группы, различающиеся типом используемого режущего инструмента (обработка однолезвийным, многолезвийным инструментом, связанным и свободным абразивом), который определяет механизм процесса обработки. Электрофизические и электрохимические методы разделены по виду используемой энергии для реализации основного физико-химического механизма процесса обработки. Среди них определяющими являются электроэрозионные,

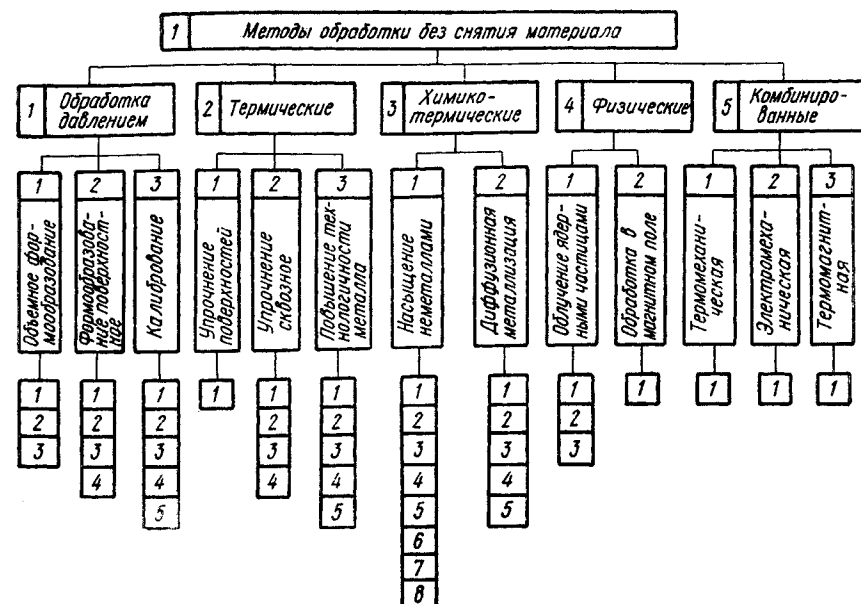


Рис. 40. Классификация методов обработки без съема материала.

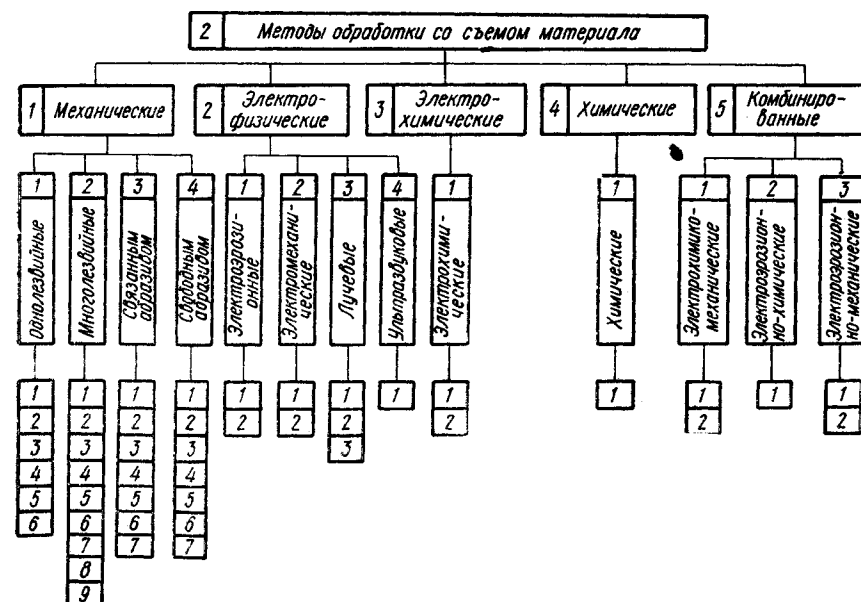


Рис. 41. Классификация методов обработки со съемом материала.

электрохимические, лучевые, ультразвуковые, электрохимические и химические.

Кодовое обозначение методов обработки согласно приведенному на рис. 41 с разделением на группы по видам классификации следующее:

2111 — точение, 2112 — растачивание, 2113 — строгание, 2114 — долбление, 2115 — нарезание резьбы, 2116 — шабрение;

2121 — сверление, 2122 — зенкерование, 2123 — развертывание, 2124 — фрезерование, 2125 — протягивание, 2126 — прошивание, 2127 — резьбонарезание, 2128 — зубонарезание, 2129 — шевингование;

2131 — шлифование кругами, 2132 — хонингование, 2133 — суперфиниширование, 2134 — ленточное шлифование, 2135 — притирка;

2141 — виброабразивная обработка, 2142 — доводка, 2143 — абразивная обработка в струе жидкости, 2144 — магнитно-абразивная, 2145 — свободным абразивом, уплотненным инерционными силами;

2211 — электроискровая, 2212 — электроимпульсная, 2221 — электрогидравлическая, 2222 — электромагнитно-импульсная;

2231 — электронно-лучевая, 2232 — ионно-лучевая, 2233 — лазерная;

2311 — электрохимическое профилирование, 2312 — электронно-химическое шлифование;

2411 — химическое фрезерование;

2511 — анодно-абразивная, 2512 — электроалмазная;

2521 — электроэрозионно-химическая;

2531 — абразивно-электроэрозионная, 2532 — электроконтактная.

Методы обработки с нанесением материала (см. рис. 42). Нетрудно заметить, что, так же, как и для предыдущих двух групп методов обработки, определяющим в рассматриваемой классификации является вид используемой энергии для реализации процесса нанесения материала.

Кодовое обозначение методов обработки, согласно приведенному на рис. 42 с разделением их на группы по видам (третий уровень) классификации, следующее:

3111 — электродуговая наплавка, 3112 — электрошлаковая наплавка, 3113 — электроискровая наплавка, 3114 — наплавка лежачим электродом, 3115 — индукционная наплавка, 3116 — плазменно-порошковая наплавка, 3117 — газопорошковая наплавка, 3118 — лазерная наплавка, 3119 — электроферромагнитная наплавка;

3121 — электродуговое напыление, 3122 — газоплазменное напыление, 3123 — индукционное напыление, 3124 — плазменное напыление, 3125 — детонационное напыление;

3131 — индукционное припекание, 3132 — электроконтактное припекание, 3133 — электроимпульсное припекание, 3134 — магнитно-импульсное припекание, 3135 — электрошлаковое припекание, 3136 — газоплазменное припекание;

3211 — наплавка трением;

3221 — магнитно-импульсная напрессовка;

3311 — хромирование, 3312 — никелирование, 3313 — остаивание, 3314 — алитирование, 3315 — цинкование, 3316 — меднение, 3317 — серебрение;

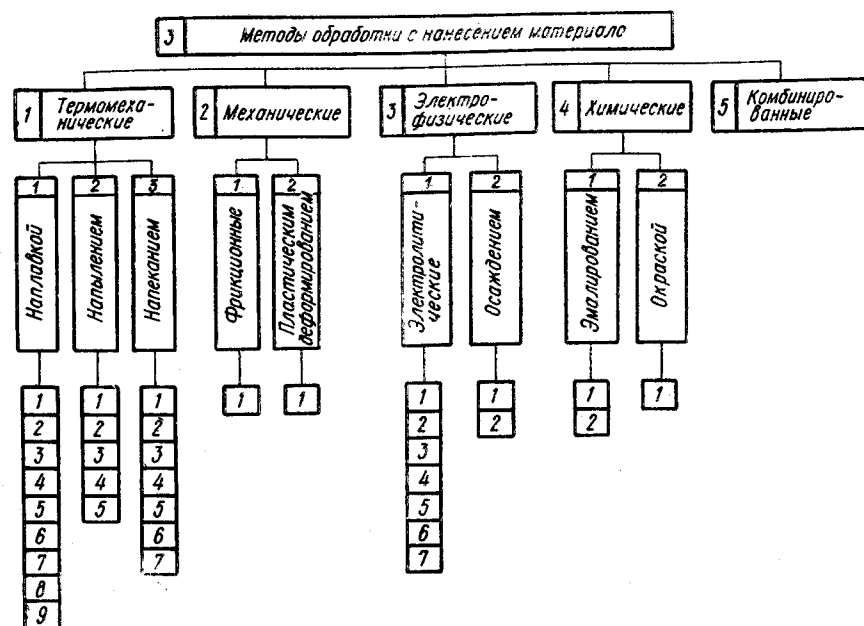


Рис. 42. Классификация методов обработки с нанесением материала.

3321 — ионно-вакуумное осаждение, 3322 — электровакуумное осаждение;

3411 — обмазка, 3412 — напыление;

3421 — окраска.

Для всех рассмотренных классов методов обработки, наряду с описанием «первичных» процессов обработки, возможно представление их сочетаний в виде комбинированных методов. Теория создания и описания таких методов будет рассмотрена ниже.

Отметим, что предлагаемая классификация неполная. Однако построение на рассмотренных выше принципах позволяет дополнять ее неучтенными и новыми МО. Анализ различных уровней классификации открывает возможность целенаправленного поиска перспективных методов обработки.

5. Выбор методов обработки

В настоящее время существует большое количество МО, каждый из которых имеет свою область применения. В условиях технологического проектирования, и в частности при назначении маршрута обработки или метода, обеспечивающего получение заданных характеристик качества поверхности и точности, возникает необходимость выбора рационального МО. Из-за сложности процесса анализа и выбора наиболее рационального метода для определенных условий число рассматриваемых методов при ручном проектировании бывает ограниченным. Чаще всего их ограничивают рамками механической обработки,

при этом разнообразные и наиболее прогрессивные электрофизические, электрохимические методы и их комбинации оказываются внематериальными проектировщика. Создаваемые в настоящее время САПР ТП открывают возможность проводить выбор методов обработки среди всех известных методов, а также их комбинаций.

Для выбора методов обработки должны учитываться определенные признаки предмета производства, в состав которых входят характеристики обрабатываемой заготовки и готовой детали. Анализ показывает, что наиболее важные среди них: вид и размеры обрабатываемой поверхности, вид материала, твердость обрабатываемого материала, точность обработки, характеристики шероховатости, физико-механические характеристики поверхностного слоя.

Помимо рассмотрения названных признаков при выборе методов обработки учитываются интегральные характеристики, описывающие более общие свойства материала обрабатываемых заготовок. К таким характеристикам относится обрабатываемость материала — одно из важнейших технологических свойств, характеризующих совокупность качества металлов, которые определяют производительность процесса обработки, и следовательно, себестоимость продукции. Обрабатываемость зависит от химического состава и структурного состояния металлов, определяемого способом получения заготовки, термообработки и др.

Основной особенностью понятия обрабатываемости является различие закономерностей влияния свойств материала на процесс обработки для отдельных методов. Так, материалы, имеющие низкую обрабатываемость для методов, основанных на резании, хорошо обрабатываются при электрофизических методах. Причем материалы, имеющие равные физико-механические свойства, могут существенно отличаться по обрабатываемости. Поэтому перед конструктором всегда должна ставиться задача выбора из материалов с равными физико-механическими свойствами материала, имеющего лучшую обрабатываемость.

Обрабатываемость материала обычно оценивается относительным коэффициентом. За единицу принимается обрабатываемость стали 45. Коэффициент обрабатываемости $k_{об} = v_{металл}/v_{сталь\ 45}$, где $v_{металл}$, $v_{сталь\ 45}$ — допустимые скорости обработки (резания).

Кроме допустимой скорости резания, для оценки обрабатываемости материала используют показатели интенсивности износа инструмента (преимущественно для черновых операций), качества обрабатываемой поверхности (для чистовых операций) и возникающих силы резания и температуры, которые определяют долговечность отдельных частей станка, степень деформации инструмента и детали, а также дают представление о количестве энергии, расходуемой при обработке.

Для оценки материалов по обрабатываемости применительно к определенным процессам обработки устанавливаются относительные коэффициенты обрабатываемости (табл. 28). Представленные табличные данные убедительно показывают, что обрабатываемость материалов для различных процессов обработки существенно отличается. Это связано с принципиальным отличием физико-химических механизмов воздействия на заготовку.

Т а б л и ц а 28. Относительные коэффициенты обрабатываемости материалов для различных видов обработки

Материал	Резанием	Электроискровая	Лазерная	Электрохимическая	Ультразвуковая
Стали:					
конструкционная (углеродистая $C < 0,6\%$)	1	1	1	1	1
хромоникелевая	0,9	1,2	1	1	0,8
углеродистая марганцовистая	0,8	1,2	1	—	1
инструментальная быстрорежущая	0,6	1,2	1	1,4	2
жаропрочная сложнолегированная	0,3	1	—	0,8	—
Чугун (серый, ковкий)	0,9	1	—	—	—
Сплавы:					
медные	2	1,5	0,26	—	—
алюминиевые	3,5	3	0,8	1,5	—
титановые	3,3	1	1,12	1,2	1
твердые	—	0,3	0,25	—	2
Тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден)	—	0,4	0,2	—	2
Минералокерамика	—	—	—	—	15

Каждый метод обработки имеет определенную область рационального использования. Выход из этой области по показателям обрабатываемости материала, обеспечения требуемого качества поверхности и другим показателям приводит к нарушению процесса обработки. В работе [35] предложено понятие критических условий для метода обработки (обрабатываемый материал, режимы резания, конструкция инструмента, геометрия его заточки), при которых его практическое использование по техническим и экономическим параметрам становится невозможным.

Для механической обработки резанием основными факторами, определяющими критические условия, являются: соотношение прочностных характеристик инструментального и обрабатываемого материала (предел прочности при изгибе и сжатии, ударная вязкость); параметры износостойкости и красностойкости (теплостойкости) инструментального и обрабатываемого материала.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что для выбора методов обработки необходимо определить границы рационального использования метода, при переходе которых должны приниматься качественно новые процессы обработки. Для примера в табл. 29 приведены характеристики возможностей отдельных методов обработки [36]. Структурные изменения поверхностного слоя для различных методов обработки определились с помощью оценочных баллов: 1 — заметно ухудшается строение на некоторую глубину; 2 — ухудшаются единичные показатели, зависящие от качества; 3 — почти не изменяется строение, но возможны дефекты; 4 — структура остается практически неизменной или улучшается; 5 — улучшается большинство показателей.

Таблица 29. Характеристики эффективности методов обработки

Метод обработки	Средняя удельная производительность, см ³ /с	Средний удельный расход энергии, Дж/см ³	Шероховатость R_a , мкм
Резание однолезвийным инструментом (точение)	$5 \cdot 10^{-2}$ —5	$(1,7-2,5) \cdot 10^3$	0,16—2,5
Резание многолезвийным инструментом (фрезерование)	$2 \cdot 10^{-3}$ —1	$(5-7,5) \cdot 10^3$	0,32—2,5
Шлифование	$(0,5-3) \cdot 10^{-2}$	$(5,5-7) \cdot 10^4$	0,16—2,5
Электроискровой	$1,7 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-2}$	$(0,4-5,5) \cdot 10^6$	1,25—2,5
Электронимпульсный	$8,3 \cdot 10^{-4}$ — $3,3 \cdot 10^{-2}$	$(3,5-7) \cdot 10^5$	1,25—2,5
Электроконтактный	$8,3 \cdot 10^{-4}$ —8,3	$(0,3-1,2) \cdot 10^5$	1,25—2,5
Электронно-лучевой	$2 \cdot 10^{-4}$ — $6,2 \cdot 10^{-3}$	$(2,4-5,8) \cdot 10^5$	2,5—6
Лазерный	$1-2) \cdot 10^{-6}$	$(2,8-4,7) \cdot 10^7$	2,5—6
Ультразвуковой	$3 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^5$ — $3,6 \cdot 10^6$	0,63—2,5
Электрохимическое профилирование	$8 \cdot 10^{-3}$ —1,6	$(2,2-4,3) \cdot 10^5$	0,32—2,5
Электрохимическое шлифование	$1,7 \cdot 10^{-6}$ — $4,1 \cdot 10^{-4}$	$(1,4-5,8) \cdot 10^5$	0,16—0,64

В целях автоматизации процесса выбора МО при создании наиболее прогрессивных ТП используют автоматизированные банки данных. При формировании информационного обеспечения АБД-технологий необходимо проводить систематизацию информации о методах обработки на единой методологической основе. Наиболее удобной формой подготовки систематизированной информации являются бланки паспортов МО. В качестве примера приведена часть паспорта метода электроискровой обработки (табл. 30).

Эти технологические документы включают ряд разделов, описывающих различные признаки МО: наименование МО, код МО, вид инструмента, типовой представитель оборудования, вид обрабатываемой поверхности, виды обрабатываемых материалов, предельные размеры обрабатываемых поверхностей, режимы обработки, характеристики качества исходной заготовки, характеристики точности и качества поверхности детали после обработки, вид используемой энергии, вид физико-химического механизма, способ и характер подвода энергии, схема формообразования, интенсифицирующие факторы, математические модели описания МО, схема обработки, литература.

Разнообразие и полнота информации, включаемой в паспорт МО, позволяет решать различные по характеру задачи, возникшие при технологическом проектировании с использованием АБД и САПР. Среди этих задач основными являются следующие.

1. Выбор метода обработки по определенным конструкторско-технологическим требованиям: по одной из характеристик качества изготовления детали (точности, шероховатости, физико-механическим свойствам); по группе характеристик качества изготовления детали; по

со съемом материала

Точность, класс	Структурное изменение поверхностного слоя	
	оценочный балл	глубина слоя, мкм
7—14	4	20—200
7—13	4	20—70
6—9	2	1—60
7—8	2—3	20—60
7—10	1—2	100—1000
8—9	1—2	300—5000
—	5	1—50
—	5	10—500
7—8	4	1—50
7—10	4	—
6—8	4	—

виду обрабатываемого материала; по виду обрабатываемой поверхности; по размерам обрабатываемой поверхности.

2. Оптимизация выбора методов обработки по критериям: минимуму производительности, обрабатываемости, качеству поверхности детали.

3. Построение математических моделей методов обработки.

4. Создание комбинированных методов обработки.

5. Формирование информационных описаний для изучения возможностей методов обработки.

6. Поиск описаний методов обработки в литературе.

7. Проектирование технологических процессов в САПР ТП: проектирование маршрутных ТП; проектирование операционных ТП; выбор оборудования; проектирование перехода; выбор инструмента; выбор режимов обработки.

Для паспортизации МО предварительно разрабатываются правила описания и представления информации конструкторско-технологического назначения. С этой целью должны составляться системы классификации обрабатываемых поверхностей, материалов, обосновываться возможности достижения характеристик качества изделий с учетом исходного качества заготовки, определяться необходимые параметры режимов обработки для различных МО.

6. Синтез методов обработки

Создание новых МО — один из важнейших факторов развития научно-технического прогресса. Во многих работах рассматривались методики поиска новых процессов обработки [23, 25] и кинематических схем формообразования [14]. Однако в условиях ручного проектирования эти методики до настоящего времени не нашли применения. Наиболее общий подход к задаче поиска новых методов обработки рассмотрен в [25]. Применительно к процессам размерного формообразования выявлены функциональные связи и отобраны классификационные признаки, определяющие сущность различных процессов обработки. Все признаки были разбиты на 11 групп, характеризующих различные стороны МО:

1 — энергия, непосредственно подводимая к объекту; 2 — энергия на границе объекта и среды; 3 — энергия, определяющая съем материала и образование формы; 4 — распределение энергии во времени; 5 — подвод и распределение энергии в пространстве, занимаемом объектом; 6 — основной физический процесс, определяющий размерное формообразова-

Т а б л и ц а 30. Пример оформления паспорта метода электрон스크ровой обработки отверстий

Паспорт метода обработки		Наименование МО		Код МО	
		Электронскровая обработка		2211	
Вид инструмента		Тип оборудования			
Электрод (медь)		Электроэрозионный станок модель 4Д722А			
Вид обрабатываемой поверхности		Предельные размеры обработки, мм		Код поверхности	
Отверстия		1,5—50 × 1—200		2121	
Материал	Исходное качество заготовки		Достижимые характеристики качества обработки		Средняя удельная производительность, мм³/с
	квалитет	R _z , мкм	квалитет	R _a , мкм	
Сталь 45	10—12	40—80	7—8	1,1—2,5	2—3
	...	...	...	...	...
Твердый сплав ВК6	10—12	40—80	8—9	0,4—1,25	2
	...	...	...	...	...

Сталь 45 10—12 40—80 7—8 1,1—2,5 2—3 (5—300) · 10⁻⁵ 10—20 6—50 5—15 (0,5—1) · 10⁻²
 ...
 Твердый сплав ВК6 10—12 40—80 8—9 0,4—1,25 2 (0,1—1) · 10⁻⁵ 1—10 40—200 15—35 (1—20) · 10⁻²

Примечание. В таблице приведены следующие обозначения режимов обработки: i_{им} — продолжительность импульса; f — частота; и — напряжение питания; W — энергия импульса.

ние; 7 — характер формообразования; 8 — вид среды обработки; 9 — давление среды обработки; 10 — движение формообразования; 11 — физическое состояние материала объекта (заготовки), удаляемого в процессе формообразования (состояние «стружки»).

Первые пять групп (1—5) определяют главные черты процесса, 6, 7, 11 группы прямо и косвенно связаны с основными, 8—10 группы определяют условия ведения процесса. Группы и признаки внутри этих групп описывались цифровым кодом. Например, для групп, ранее не рассматриваемых в настоящей работе, характеристики признаков кодируются следующим образом: группа 8 — вид среды обработки: 0 — вакуум, 1 — инертные газы, 2 — химически активные газы, 3 — воздух, 4 — вода, 5 — электролиты, 6 — масла, 7 — суспензии, 8 — эмульсии, 9 — твердое тело; группа 9 — давление среды обработки: 0 — разрежение, 1 — нормальное, 2 — повышенное, 3 — особо высокое; группа 11 — физическое состояние материала «стружки»: 0 — твердое, 1 — твердое диспергированное, 2 — в расплаве, 3 — в жидком растворе, 4 — капельно-жидкое, 5 — парообразное, 6 — газообразное, 7 — исходное состояние, 8 — стружка отсутствует.

Процесс синтеза нового МО, который предлагается в [25], предусматривает процесс перебора сочетаний всех возможных признаков для 11 групп. При учете возможных физически совместимых комбинаций внутри групп и между ними общее число вариантов характеризуется десятками миллионов, составить и проанализировать все эти варианты практически невозможно даже при использовании ЭВМ. Поэтому необходима разработка стратегии поиска. В условиях решения рассматриваемой задачи без ЭВМ в основу поиска должна быть положена интуиция, опирающаяся на опыт и известные примерные аналогичные ситуации. Значительно усложняется решение задачи в условиях автоматизированного поиска наиболее рациональных комбинаций признаков-условий. В этом случае процесс поиска новых методов целесообразно разделить на ряд этапов, на которых принимаются решения с учетом различных оценочных функций. Как отмечалось ранее, на первых этапах поиска выбирается группа наиболее рациональных процессов обработки, а затем с учетом этих ПО синтезируются кинематические схемы. Анализ этих двух составляющих позволяет выбрать оптимальный метод обработки.

Синтез МО начинается с формирования ПО. Первоначально выбирается по ряду признаков определенный ФХМ_i или их совокупность (см. рис. 39). При этом учитываются: характер обработки: без съема материала; со съемом материала; с нанесением материала; цель обработки: изменение структуры материала; повышение точности; повышение шероховатости; изменение физико-механических свойств; съем материала; твердость и обрабатываемость материала.

После выбора ФХМ_i и соответствующего вида энергии воздействия Э_{возд} решается вопрос о виде рабочей энергии Э_{раб}. Определяющими критериями выбора в этом случае являются удельная производительность (см³/с) и расход энергии (Дж/см³). Для определенных видов Э_{раб}, например механической энергии, необходимо определять дополнительно

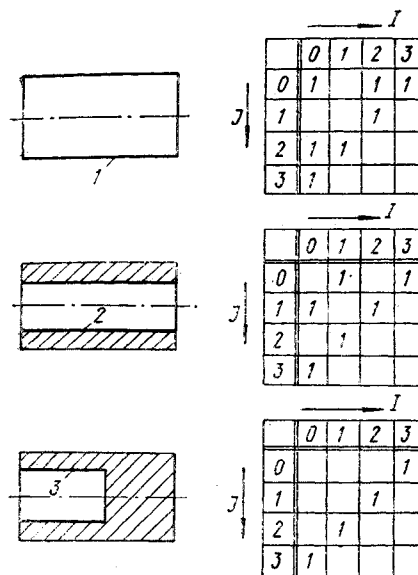


Рис. 43. Матрица выбора кинематических схем обработки элементарных цилиндрических поверхностей при точечном и линейном контакте инструмента и заготовки.

ний формообразования, сообщаемых инструменту и заготовке, охватывают большинство известных кинематических схем обработки [14]. Для поиска возможных СФО использовались матрицы, в которых по горизонтали (I) описывались виды движений для заготовки, а по вертикали (J) — для инструмента.

Анализ матриц выбора СФО позволяет получить возможные сочетания движений заготовки и инструмента в виде двузначного кода для различных видов элементарных обрабатываемых поверхностей. Усечение множества всех возможных решений производится с помощью ряда оценочных функций, одной из которых является минимизация количества движений формообразования. На рис. 43 показаны матрицы для выбора видов движений заготовки I и инструмента J применительно к обработке наружных и внутренних цилиндрических поверхностей. Так, для поверхности I в соответствующей ей матрице могут быть выбраны следующие кинематические схемы обработки: при точечном контакте — СФО (30, 21, 12, 03); при линейном контакте — СФО (20, 02).

Нетрудно заметить, что вид контакта инструмента и заготовки определяет минимально возможное количество элементарных движений: в первом случае — 3, во втором — 2. По аналогии можно сделать вывод, что для рассмотренных поверхностей при поверхностном контакте потребуется одно элементарное движение, а при объемном — 0. Таким образом, задаваясь заранее видом подвода энергии, можно зна-

вид состояния инструмента; твердое (1), порошкообразное (2), жидкое (3), газообразное (4).

В результате выполнения первых этапов синтеза МО выбирается несколько возможных вариантов ПО, удовлетворяющих заданным ограничениям и близким по своим технико-экономическим возможностям. Далее для этих вариантов ПО проводятся анализ и синтез процессов формообразования, которые также включают ряд этапов, основным из которых является выбор схемы движения формообразования. СФО определяется видом обрабатываемой поверхности, ее размерами, ранее принятым ПО и способом подвода энергии: точечным (1), линейным (2), поверхностным (3), объемным (4).

СФО устанавливает абсолютные движения заготовки и инструмента, обеспечивающие процесс формообразования. Рассмотренные выше возможные четыре вида движе-

чительно ограничить число анализируемых СФО. После выбора или синтеза нового МО встает задача выбора или синтеза технологического оборудования, на котором принятый метод обработки может быть реализован. При этом в зависимости от МО выбор оборудования ведется с учетом таких подходов: выбран известный МО, для которого найдена конструктивная схема реализации МО и имеются аналоги оборудования, — принимается определенная модель станка; выбран известный МО, для которого найдена конструктивная схема, но отсутствуют аналоги оборудования — производится описание конструктивной схемы выбран неизвестный МО, для которого найдена конструктивная схема и имеются аналоги оборудования, то принимается определенная модель станка и составляется техническое задание на его усовершенствование; выбран неизвестный МО, для которого не найдены конструктивная схема и известные аналоги оборудования, то синтезируется новая конструктивная схема обработки. В последнем случае разрабатывается техническое задание на проектирование нового вида оборудования.

7. Создание комбинированных методов обработки

КМО называют такие методы, в которых процесс преобразования, удаление или нанесение обрабатываемого материала происходит в результате одновременного протекания двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму [36]. Наиболее известными, нашедшими применение в практике, являются сочетания физико-химических воздействий: электрохимического и механического, электроэрозионного и электрохимического, ультразвукового и механического.

К комбинированным методам обработки могут относиться виды обработки, разделенные во времени и пространстве. Однако обязательным условием в этом случае является их реализация на специальном оборудовании, жестко связывающем эти процессы. В противном случае такие виды обработки, входящие в общий ТП, должны рассматриваться как отдельные методы обработки.

Главной особенностью КМО является их существенное отличие по эффективности применения по сравнению с методами, составляющими данное сочетание. Обычно стремятся объединять процессы обработки, характеризующиеся высокой производительностью, но создающие повышенную шероховатость (например черновая электроэрозионная обработка) с процессами, способными значительно снизить шероховатость, но при низких удельных съемах (например чистовые виды электрохимической обработки). Наиболее часто совмещение видов обработки производят исходя из необходимости, в первую очередь, повысить производительность. В этом случае производительность КМО, как правило, значительно выше суммы производительностей каждого метода, взятого отдельно. Так, по сравнению с абразивным и алмазным электроабразивное и электроалмазное шлифование повышают производительность обработки в 3—5 раз; электроэрозионно-абразивное — в 2—3 раза, электроэрозионно-химическое — в 8—10 раз. Плазменный нагрев и механическое резание — в 3—5 раз и более производительнее механического резания [36]. При совмещении различных методов обработ-

ки в КМО обычно устраняются специфические недостатки, присущие каждому из них, а преимущества становятся более явными.

Рассмотренные выше методы синтеза новых методов обработки были основаны, как правило, на одном ФХМ_i, одном виде энергии воздействия на объект и одном виде рабочей энергии. Для построения теории создания комбинированных методов обработки необходимо определить основные направления разработки таких методов. Перспективными направлениями создания комбинированных методов являются: синтез комбинированных процессов обработки; синтез процесса формообразования; введение интенсифицирующих факторов.

Наибольший эффект может быть получен при создании комбинированных МО с использованием первого направления. Здесь возможны следующие комбинации в рамках ПО: соединение двух или более ФХМ_i, создаваемых одним видом энергии воздействия $\mathcal{E}_{\text{возд}}$; соединения двух или более ФХМ_i, создаваемых двумя или более $\mathcal{E}_{\text{возд}}$, при различных рабочих энергиях; соединения двух или более видов рабочих энергий для повышения эффективности одного ФХМ_i.

Процесс создания комбинированных методов обработки путем изменения кинематических схем обработки должен рассматриваться главным образом при введении дополнительных видов движений, приводящих к существенному изменению технологических показателей МО.

Формирование новых комбинированных МО может проводиться на основе дополнительного введения интенсифицирующих факторов: применения ультразвука, введения в зону обработки вибраций, в зону обработки поверхностно-активных сред (в виде СОЖ), изменения характера действия энергии во времени (непрерывное, прерывистое, импульсное). При создании КМО возможны три вида воздействий:

совмещение во времени, но при разнесении областей воздействий в пространстве, при достаточном удалении этих областей совмещение дает возможность объединить любые воздействия;

совмещение только в пространстве, но при подаче воздействий с определенным сдвигом во времени; с ростом такого временного сдвига повышается совместимость воздействий, поскольку они становятся все более независимыми друг от друга;

совмещение как в пространстве, так и во времени возможно далеко не для всех воздействий, а для некоторых, например химического и электрического, когда заготовка граничит с расплавом и раствором.

8. Автоматизированные банки данных прогрессивных технологий

Выбор оптимальных технологических решений на всех этапах технологического проектирования сопряжен с поиском и анализом больших объемов информации. До последнего времени эти задачи решались в рамках ИПС, структурно состоящих из трех частей: базы данных, где хранится вся информация, списка запросов и программных средств обработки запросов. ИПС обеспечивает быструю выдачу ответов на информационные запросы пользователей, которые получают интересные факты, документы или описания технологических объектов.

Главный недостаток рассматриваемых ИПС состоит в том, что они

не осуществляют дополнительной обработки хранимой информации, а только выдают ее в любых комбинациях. В связи с этим возникает необходимость стыковки ИПС с другими автоматизированными системами и в первую очередь с САПР. Для расширения возможностей ИПС при сборе, хранении и автоматизированной обработке информации в настоящее время создается новый вид систем, получивший название АБД. Эти системы значительно повышают эффективность обработки информации в условиях технологической подготовки производства. Их влияние на все области производственной деятельности человека позволяет сформулировать новую экономическую категорию — активные информационные ресурсы страны, которые определяются видом, составом и количеством АБД различных предметных областей.

В отличие от информационно-поисковых подсистем АБД состоит из четырех частей: базы данных, ППП, системы управления базой данных, списка запросов и постановок задач. Особенности обработки информации в определенной предметной области зависят от первых двух частей: БД, определяющей вид и форму представляемой информации, и ППП, включающий программы решения задач дополнительной автоматизированной обработки информации помимо ее сбора, хранения и поиска. Среди этих дополнительных задач главными являются задачи анализа и синтеза различных технических объектов.

Рассмотрим возможности создания АБД прогрессивных технологий и решение в рамках этих систем описанных задач оптимизации ТП. АБД прогрессивных технологий предназначен для выбора и проектирования новых технологий, характеризующихся малооперационностью и обеспечивающих материало-, энерго-, трудосбережения. Под термином проектирование новых технологий в разрабатываемой системе понимается поиск наиболее рациональных МО и оптимальных условий их проведения. АБД прогрессивных технологий ориентирован на его применение в условиях автоматизированного проектирования. При этом он может использоваться автономно или в составе САПР ТП как отдельная подсистема. В последнем случае достигается наибольший эффект от применения рассматриваемого вида АБД. В первую очередь АБД прогрессивных технологий должен использоваться для поиска новых методов изготовления наиболее ответственных деталей, как правило, из труднообрабатываемых материалов или отличающихся повышенными требованиями к их точности и качеству рабочих поверхностей, а также с целью значительного повышения производительности обработки и снижения себестоимости изготовления изделий.

Проведенные исследования показали возможность использования разрабатываемого АБД прогрессивных технологий на различных этапах конструкторско-технологической подготовки производства. Основные виды работ, выполняемые конструктором при проектировании новых видов изделий, и технологом, разрабатывающим для них технологические процессы, показаны на рис. 44. АБД прогрессивных технологий преимущественно ориентирован на технолога, однако имеющиеся в его составе массивы данных, библиотеки и соответствующие ППП позволяют конструктору решать ряд его задач: выбор материала детали, выбор вида заготовки, анализ технологичности детали.

При функционировании АБД прогрессивных технологий выделяется ряд этапов, характерных для традиционного технологического проектирования, а также ряд новых этапов, направленных на получение принципиально новых решений. На функциональной схеме АБД прогрессивных технологий (рис. 45) приведен перечень основных этапов выбора технологических решений, а также взаимосвязь рассматриваемого АБД с другими автоматизированными системами, подготавливающими для него исходную информацию и использующими результаты выбора технологических решений: САПР конструирования, ППП обеспечения эксплуатационных свойств деталей, САПР ТП и САПР оборудования и технологической оснастки.

Процесс поиска новых прогрессивных технологий начинается с формирования и постановки задачи поиска (рис. 46). Учитывая основную направленность рассматриваемого вида АБД на решение задач выбора технологий (методов обработки) на стадиях механической обработки, на первом этапе производится формализация задачи поиска с одновременным решением ряда технологических задач, представляющих интерес для конструктора и технолога. Это, в первую очередь, выбор более полного набора характеристик качества для рассматриваемой детали с учетом требований к ее эксплуатации. Эта процедура выполняется с использованием программ и совокупности математических моделей эксплуатационных свойств (износостойкости, контактной жесткости, усталостной прочности, коррозионной стойкости), хранящихся в базе данных технологий. Более подробно выбор характеристик качества изделия с учетом требований к эксплуатации деталей в условиях износа рассмотрен ранее, в главе второй.

Следующими задачами, решаемыми на первом этапе, являются выбор оптимального вида и метода получения заготовки и формирование возможных маршрутов обработки детали с последующим выбором наиболее рационального из них. Эти задачи также рассмотрены в главе второй. Завершает первый этап задача формирования массивов качества изделия до начала выполнения анализируемой операции и после нее. Таким образом, искомая операция и соответственно метод обработки, лежащий в ее основе, представляют известную модель «черного ящика», для которой описаны вход и выход. Эта информация является исходной для решения задач поиска на следующих этапах.

На втором и третьем этапах (рис. 47) решаются основные задачи АБД прогрессивных технологий, связанные с выбором и синтезом новых МО. При этом используются библиотека МО, библиотека ФТЭ, массивы условий выбора ПО, схем формообразований и отдельных ФТЭ, хранящихся в базе данных технологий. Из рис. 47 видно, что при отсутствии в базе данных сведений о выбираемом МО, обеспечивающем все заданные и сформированные на первом этапе требования, происходит синтез МО, включающий решение задач синтеза принципа действия, выбора ПО и схемы формообразования. Методы решения этих задач были описаны выше. Результатом синтеза МО является описание МО, который в отдельных случаях может быть принципиально новым. Однако возможность реализации таких МО должна оцениваться группой специалистов-экспертов, которые определяют целесо-

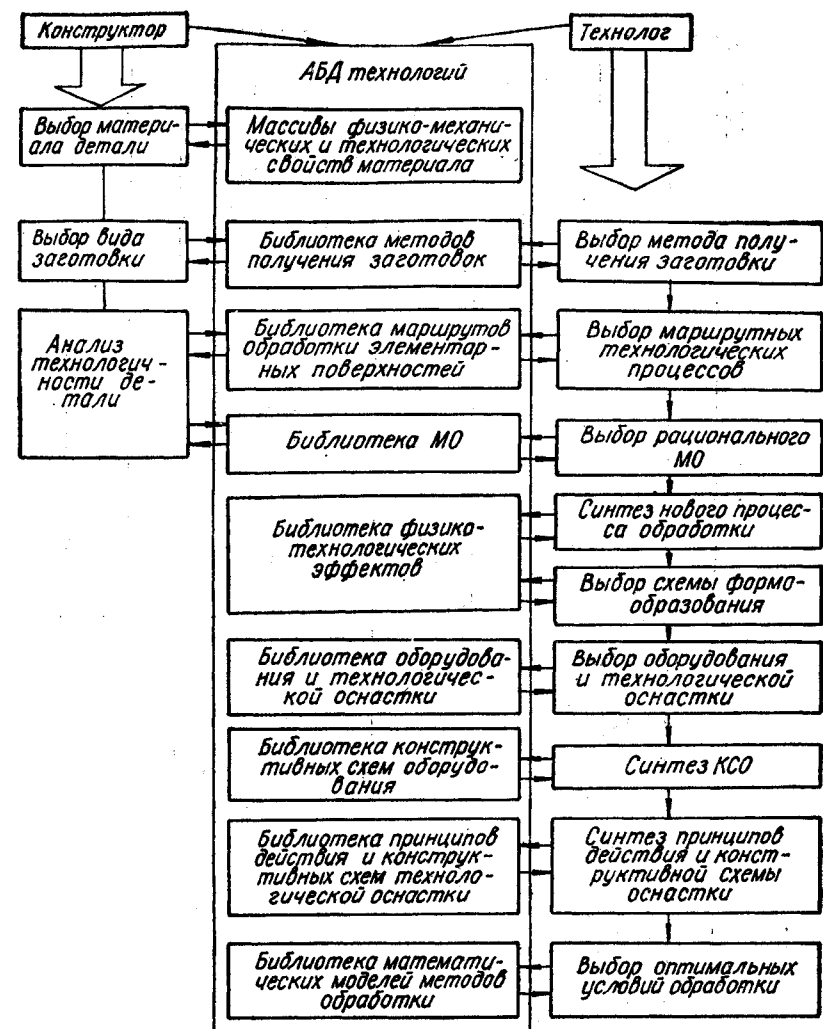


Рис. 44. Виды работ, выполняемые конструктором и технологом, с использованием АБД прогрессивных технологий.

образность проведения дальнейших экспериментальных исследований предложенного МО.

При выборе прогрессивного МО, наряду с определением наиболее рационального метода обработки и условий его реализации, необходимо выбирать соответствующий вид технологического оборудования и оснастки. Поэтому, как показано на рис. 45, важными этапами решения задач АБД прогрессивных технологий являются: выбор оборудования, синтез схем нового оборудования, выбор ТО и синтез новой ТО. Выполнение этих процедур зависит от многих условий и является многовариантным. Так, выбор оборудования (рис. 48) можно вести следу-

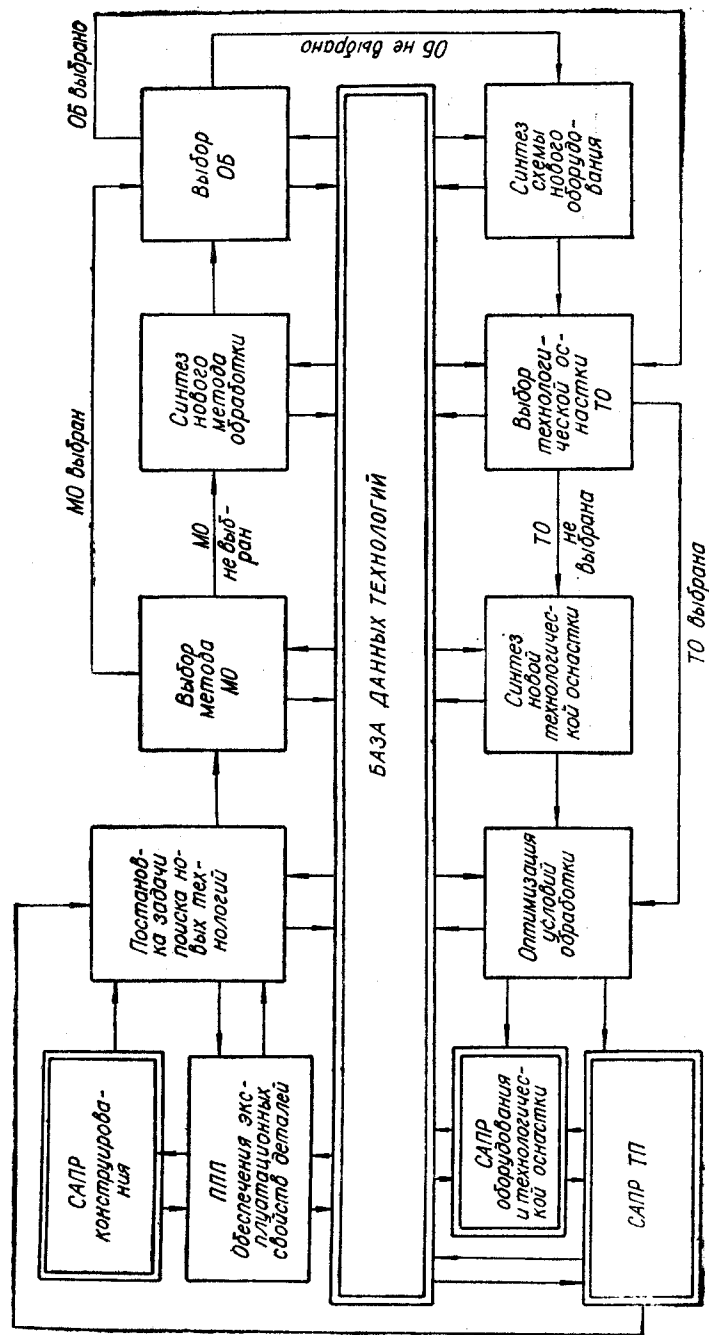


Рис. 45. Функциональная схема АБД прогрессивных технологий.

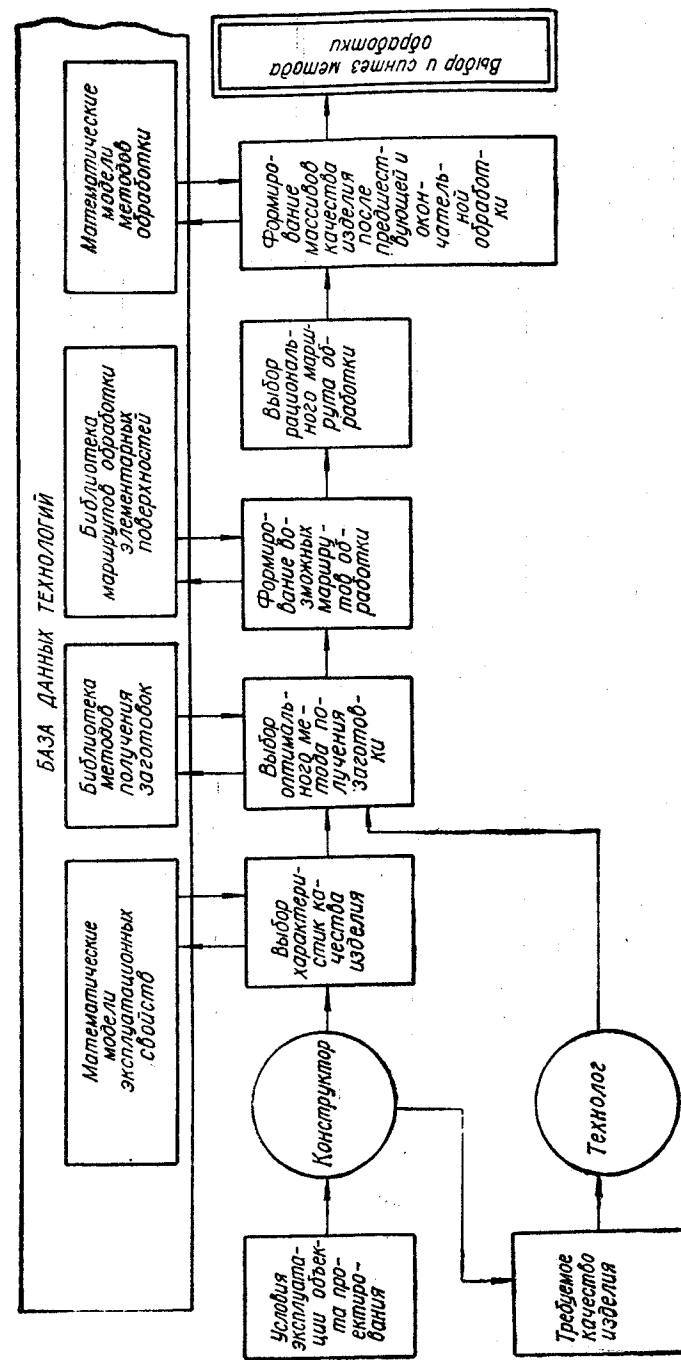


Рис. 46. Схема автоматизированного формирования и постановки задачи поиска прогрессивных технологий.

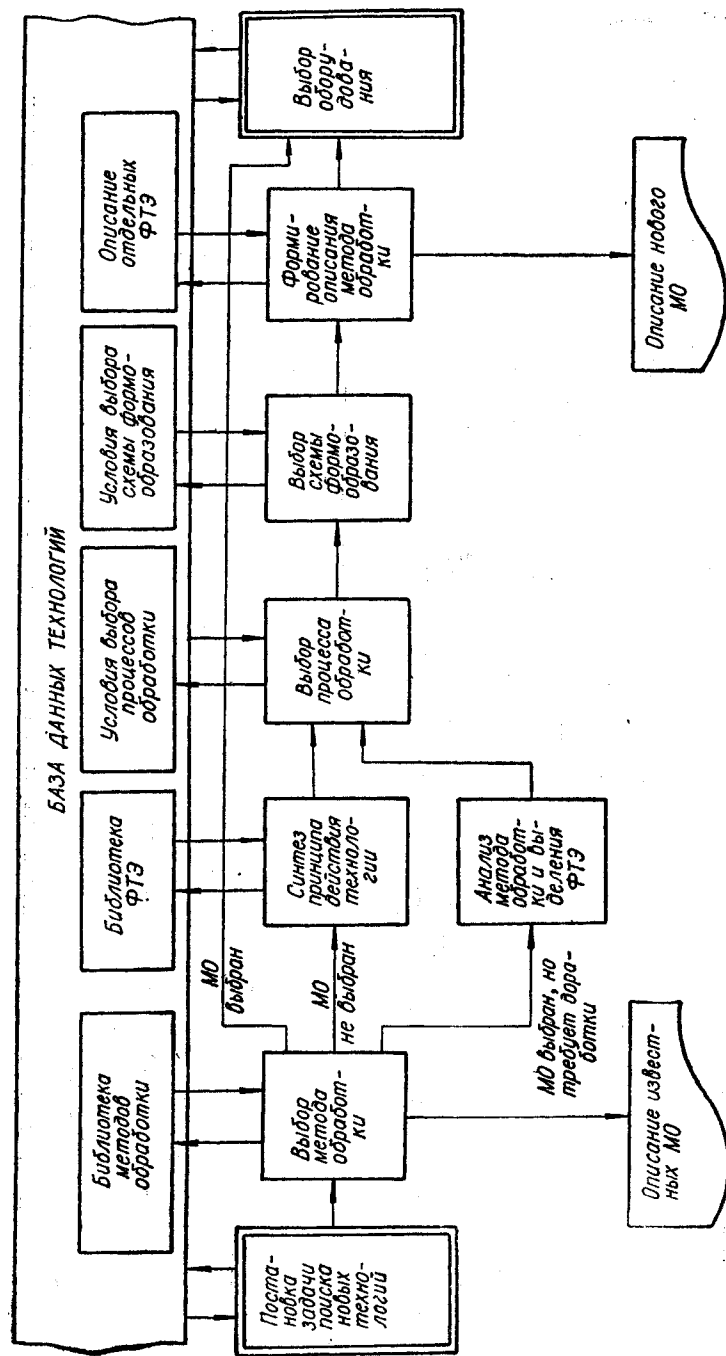


Рис. 47. Схема автоматизированного выбора и синтеза прогрессивных методов обработки.

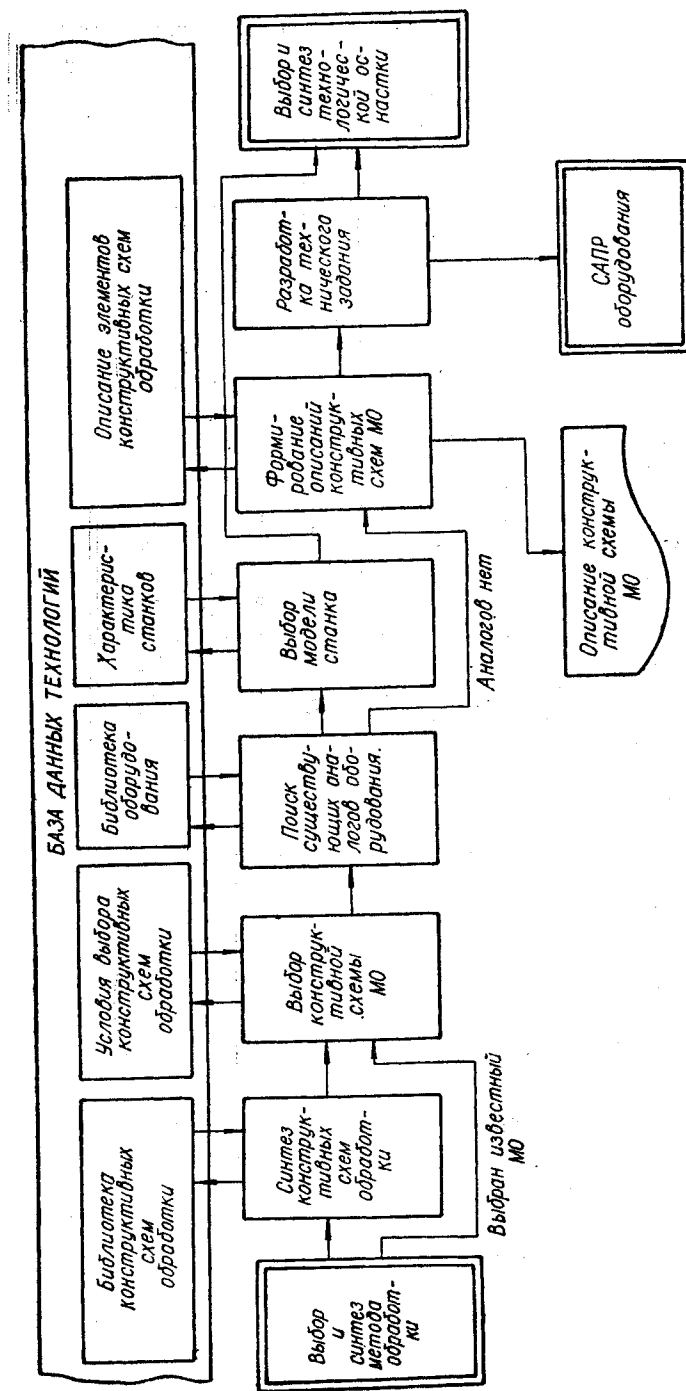


Рис. 48. Схема автоматизированного выбора и синтеза технологического оборудования.

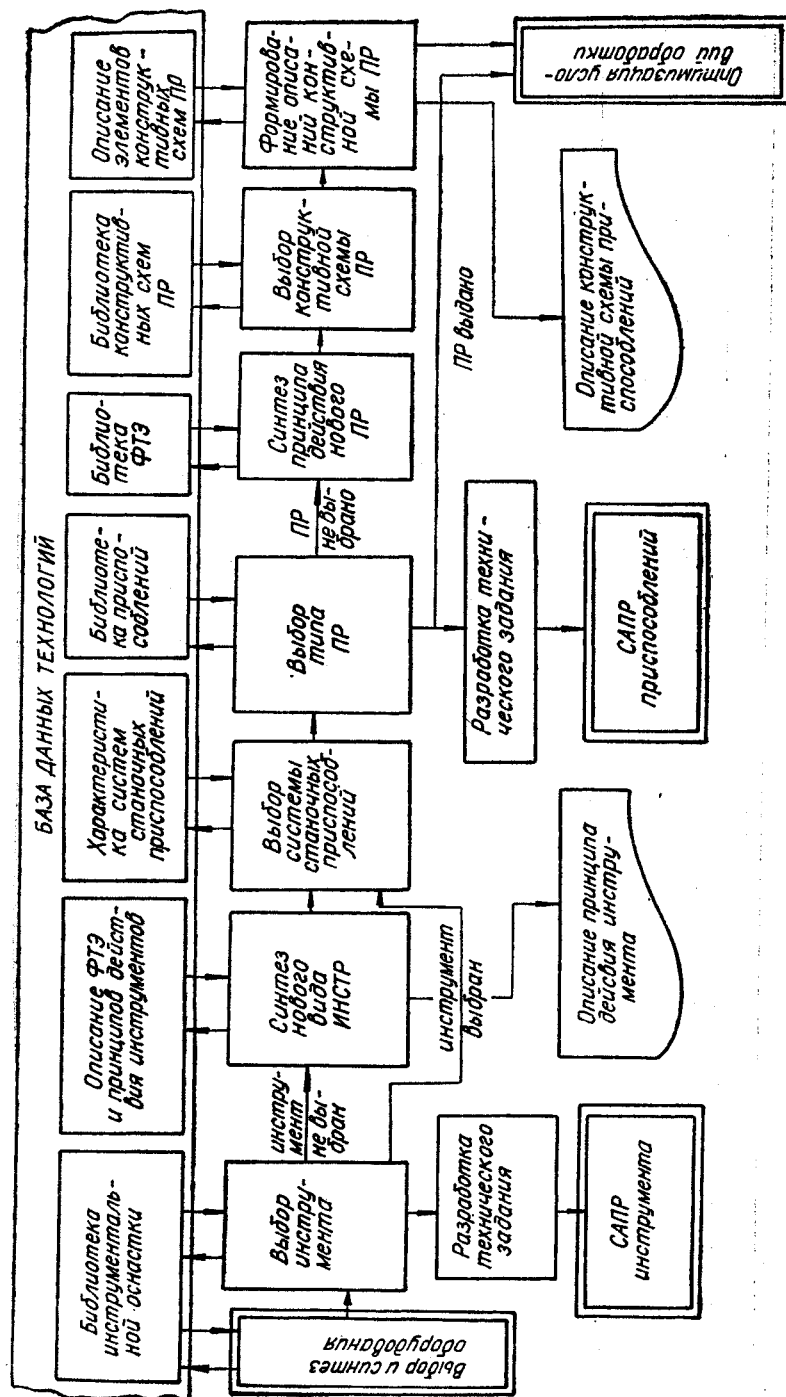


Рис. 49. Схема автоматизированного выбора и синтеза технологической оснастки.

ющими путями: выбрать известный МО, для которого найдена в базе данных конструктивная схема реализации МО и имеются для нее аналоги оборудования,— принимается определенная модель станка; выбрать известный МО, для которого найдена конструктивная схема, но отсутствуют аналоги оборудования (например по габаритам детали),— производятся описание конструктивной схемы и разработка технического задания на проектирование оборудования; выбрать неизвестный МО, для которого найдена известная конструктивная схема и имеются аналоги оборудования,— принимается определенная модель станка и составляется техническое задание на его усовершенствование; выбрать неизвестный МО, для которого не найдены конструктивная схема и известные аналоги оборудования,— синтезируется новая конструктивная схема обработки. Формируется ее описание и разрабатывается техническое задание на проектирование нового вида оборудования. Решение задач сопровождается поиском и выбором информации из базы данных, в которой хранятся библиотеки конструктивных схем обработки, оборудования и массивы условий выбора конструктивных схем и моделей станков, а также описания элементов конструктивных схем обработки. Эта подсистема связана с САПР оборудования, для которой вся необходимая информация формируется в виде технического задания.

Подсистема выбора и синтеза технологической оснастки (рис. 49) предназначены для поиска известных видов инструментов и приспособлений для реализации новых методов обработки. В случае отсутствия в базе данных соответствующих сведений о видах технологической оснастки проводится ее синтез. Подсистемы синтеза инструментов и приспособлений могут строиться с использованием методов поискового конструирования. В настоящее время создан ГПП автоматизированного синтеза токарных приспособлений — центров, обеспечивающий получение новых технических решений для этого вида технологической оснастки. Заканчивается процесс проектирования в рамках двух подсистем разработкой технических заданий на проектирование технологической оснастки в САПР-инструмент и САПР-приспособление. Последний этап выбора прогрессивных технологий — оптимизация условий обработки для известных МО при наличии в базе данных описаний МО и их математических моделей. Информация формируется в базе данных на основе разработанных паспортов МО. Для выбора оптимальных решений используется описанный комплекс многокритериальной оптимизации режимов механической обработки (рис. 38).

Особенность решаемых задач с использованием АБД прогрессивных технологий потребовала создания программ формирования различных списков запросов и постановок этих задач. Так, представляется возможным проводить укрупненный поиск МО по одному или нескольким параметрам, что особенно целесообразно на стадии конструкторской подготовки, и уточненный поиск МО по большому числу параметров. По специальному запросу сформулировано информационное описание для изучения возможностей МО, построена математическая модель МО. Разрабатываемый вариант АБД предусматривает пакетный и диалоговый режимы работы. Целесообразность работы в том или другом режимах зависит от конкретных условий эксплуатации АБД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков В. И. Многокритериальная оптимизация режимов механической обработки по параметрам v , s и t // Изв. вузов.— Машиностроение.— 1984.— № 4.— С. 143—147.
2. Аверченков В. И., Пугач Л. И. Исследование компромиссной целевой функции для оптимизации режимов механической обработки // Автоматизация проектирования технологических процессов.— 1984.— Вып. 1.— С. 41—49.
3. Аверченков В. И., Камаев В. А. Основы построения САПР : Учеб. пособие.— Волгоград, ВПИ, 1984.— 120 с.
4. Аверченков В. И., Садовой В. И. Структурный анализ выбора типового маршрута обработки деталей // Автоматизация проектно-конструкторских и технологических работ в машиностроении.— Тула : ТуПИ, 1979.— С. 134—144.
5. Аверченков В. И., Горденко О. А. Проектирование технологических процессов на основе системного подхода.— Брянск : БИТМ, 1986.— 88 с.
6. Аверченков В. И. Оптимизация технологических процессов в САПР ТП.— Брянск : БИТМ, 1987.— 108 с.
7. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении.— Минск : Вышэйш. шк., 1976.— Т. 1.— 352 с.; 1977.— Т. 2.— 336 с.
8. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Под ред. Г. К. Горанского.— М. : Машиностроение, 1976.— 240 с.
9. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ.— М. : Физматгиз, 1963.— 500 с.
10. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов.— М. : Машиностроение, 1975.— 244 с.
11. Вагнер Г. Основы исследования операций.— М. : Мир, 1972.— Т. 1.— 335 с.
12. Великанов К. М., Новожилов В. В. Экономичные режимы резания металлов.— Л. : Машиностроение, 1972.— 120 с.
13. Горанский Г. К., Владимиров Е. В., Ламбин Л. Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ.— М. : Машиностроение, 1970.— 224 с.
14. Грановский Г. К. Кинематика резания.— М. : Машгиз, 1948.— 200 с.
15. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин.— М. : Машиностроение, 1975.— 224 с.
16. Дитрих Я. Проектирование и конструирование : Системный подход.— М. : Мир, 1981.— 456 с.
17. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование.— М. : Наука, 1982.— 296 с.
18. Жак С. В. Оптимизация проектных решений в машиностроении. Методология, модели, программы.— Ростов н/Д : Изд-ние Ростов. гос. ун-та, 1982.— 168 с.
19. Иващенко И. А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации.— М. : Машиностроение, 1975.— 222 с.
20. Изумнов Б. Н. Расчет оптимальных режимов обработки для станков и автоматических линий.— М. : Машиностроение, 1974.— 200 с.
21. Камаев В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава.— М. : Машиностроение, 1980.— 265 с.
22. Капустин Н. М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ.— М. : Машиностроение, 1976.— 288 с.
23. Коновалов Е. Г. Основы новых способов металлообработки.— Минск, АН БССР, 1961.— 297 с.
24. Кохан Д., Якобс Г. Ю. Проектирование технологических процессов и переработка информации.— М. : Машиностроение, 1981.— 312 с.
25. Лифшиц А. П. Методика поиска новых процессов формообразования // Вестн. машиностроения.— 1967.— № 9.— С. 60—63.
26. Ломоносов А. В. Выбор экономически эффективного процесса механической обработки в условиях автоматизированного проектирования : Учеб. пособие.— Томск : ТПИ, 1984.— 95 с.
27. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания.— М. : Машиностроение, 1976.— 278 с.
28. Маталин А. А. Технология механической обработки.— Л. : Машиностроение, 1977.— 462 с.
29. Меткин И. П., Щеголев В. А. Математические основы технологической подготовки гибких производственных систем.— М. : Изд-во стандартов, 1985.— 256 с.
30. Муминов Н. А., Набиев О. М., Мирагзамов М. М. Методы кибернетики в исследовании обработки металлов резанием.— Ташкент : ФАН, 1975.— 172 с.
31. Митрофанов В. Г. Особенности решения задач оптимизации для массового и мелкосерийного производства // Адаптивное управление технологическими процессами на станках.— М. : Машиностроение, 1980.— С. 349—388.
32. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / Гильман А. М., Брахман Л. А., Батищев Д. И., Митяева Л. К.— М. : Машиностроение, 1972.— 188 с.
33. Окунев Ю. Б., Плотноков В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи.— М. : Связь, 1976.— 183 с.
34. Полуянов В. Т. Структурные преобразования в технологии механосборочного производства.— М. : Машиностроение, 1973.— 278 с.
35. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки.— М. : Машиностроение, 1985.— 264 с.
36. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник.— М. : Машиностроение, 1982.— 397 с.
37. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства / Под ред. С. П. Митрофанова.— М. : Машиностроение, 1981.— 287 с.
38. Проников А. С. Надежность машин.— М. : Машиностроение, 1978.— 592 с.
39. Пухов А. С. Информационно-поисковые системы при автоматизированной подготовке оснастки.— М. : Машиностроение, 1978.— 133 с.
40. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгдел К. Оптимизация в технике.— М. : Мир, 1986.— Кн. 1.— 347 с.
41. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин.— Киев : Наук. думка, 1984.— 272 с.
42. САПР. Типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов одноинструментальной обработки материалов резанием. Методические рекомендации. МР 119—85.— М. : ВНИИМАШ, 1985.— 120 с.
43. Сикора Е. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин.— М. : Машиностроение, 1983.— 226 с.
44. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло.— М. : Наука, 1973.— 311 с.
45. Соколовский А. П. Научные основы технологии машиностроения.— М. : Машгиз, 1965.— 515 с.
46. Соломенцев Ю. М., Басин А. М. Оптимизация технологических процессов механической обработки и сборки в условиях серийного производства. Обзор.— НИИМАШ, М., 1977 (Сер. С—6—3).— 73 с.
47. Тиллес С. А. Экономика технологических процессов механической обработки.— М. : Машиностроение, 1964.— 299 с.
48. Ткаченко Л. С., Соусь А. В., Яковичский Э. Ф. Основы автоматизации проектирования технологических процессов обработки резанием.— Минск : Наука и техника, 1978.— 160 с.
49. Ушаков Н. И. Оптимизация технологических процессов в приборостроении.— М. : Машиностроение, 1981.— 56 с.

50. *Физические основы процесса резания металлов* / Под ред. В. А. Остафьева.— Киев : Виш. шк., 1976.— 136 с.

51. *Фицаго В. П.* Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей.— М. : Машиностроение, 1973.— 468 с.

52. *Цветков В. Д.* Системы автоматизации проектирования технологических процессов.— М. : Машиностроение, 1972.— 239 с.

53. *Цветков В. Д.* Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов.— Минск : Наука и техника, 1979.— 264 с.

54. *Чарнко Д. В.* Основы выбора технологического процесса механической обработки.— М. : Машгиз, 1963.— 319 с.

55. *Челищев Б. Е., Боброва И. В.* Автоматизированные системы технологической подготовки производства.— М. : Энергия, 1975.— 136 с.

56. *Шакалис В. В.* Моделирование технологических процессов.— М. : Машиностроение, 1973.— 164 с.

57. *Якимов А. В.* Оптимизация процесса шлифования.— М. : Машиностроение, 1975.— 176 с.

58. *Якобс Г. Ю., Якоб Э., Кохан Д.* Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации.— М. : Машиностроение, 1981.— 279 с.

59. *Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И.* Технологическая наследственность в машиностроении.— Минск : Наука и техника, 1977.— 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные условные обозначения и сокращения	6

Глава первая

Системно-структурное моделирование процессов механической обработки

1. Системный анализ процессов механической обработки	9
2. Особенности построения структуры математических моделей технологических процессов	13
3. Обоснование и выбор критериев оптимизации	19
4. Выбор технических ограничений	30
5. Виды оптимизации процессов механической обработки	33

Глава вторая

Структурная оптимизация технологических процессов

1. Особенности структурной оптимизации	41
2. Выбор вида заготовки и методов ее изготовления	42
3. Структурный анализ выбора типового маршрута обработки деталей	53
4. Выбор припусков и операционных размеров	68
5. Выбор технологических операций	79
6. Выбор количества и последовательности переходов в операции	88
7. Оптимизация процессов механической обработки с учетом действия технологической наследственности	93
8. Выбор рациональной системы станочных приспособлений	98
9. Конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости деталей	102

Глава третья

Параметрическая оптимизация процессов механической обработки

1. Выбор параметров оптимизируемых процессов обработки	109
2. Постановка задачи расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием	111
3. Расчет оптимальных режимов резания методом линейного программирования	113
4. Компромиссные целевые функции для оптимизации режимов механической обработки	122
5. Оптимизация режимов обработки для дискретных и непрерывных значений параметров v и s	127
6. Оптимизация режимов обработки по трем параметрам дискретных и непрерывных значений v , s , t	136
7. Параметрическая оптимизация технологических процессов при обеспечении эксплуатационных свойств деталей	145
8. Определение режимов резания с использованием вероятностной модели	153
9. Программный комплекс многокритериальной оптимизации режимов механической обработки	157

Глава четвертая

Выбор и проектирование прогрессивных технологий

1. Метод обработки	160
2. Формирование процесса обработки	161
3. Построение кинематических схем обработки	163
4. Классификация методов обработки	165
5. Выбор методов обработки	169
6. Синтез методов обработки	173
7. Создание комбинированных методов обработки	177
8. Автоматизированные банки данных прогрессивных технологий	178
Список литературы	188

Научное издание

РЫЖОВ Эдуард Вячеславович
АВЕРЧЕНКОВ Владимир Иванович

ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ

Художественный редактор *И. М. Галушка*
Технический редактор *Т. С. Березяк*
Корректоры *Л. Н. Яцуга,*
Л. Г. Бузиашвили, Л. Н. Лембак

ИБ № 10100

Сдано в набор 05.12.88. Подп. в печ. 31.05.89. БФ 08258.
Формат 60×90/16. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Выс. печ. Усл.
печ. л. 12,9. Усл. кр-отт. 12,0 Уч.-изд. л. 13,02. Тираж
1530 экз. Зак. 2962. Цена 3 р.

Издательство «Наукова думка».
252601 Киев 4, ул. Репина, 3.

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканс-
кого производственного объединения «Полиграфкнига»
252057. Киев, ул. Довженко, 3 в областной книжной типо-
графии. 290000 Львов, ул. Стефаника, 11.