

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*Д.Л. СКУРАТОВ,
В.Н. ТРУСОВ,
Д. А. ЛАСТОЧКИН*

ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ

2006

УДК 621.9.01
ББК 34.630.2
С 467



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэрокос-
мических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: д-р. техн. наук, проф. В. В. Н о с о в
д-р. техн. наук, проф. Н. Д. П р о н и ч е в

С 467 **Скуратов Д.Л.**
Оптимизация технологических процессов в машинострое-
нии: учеб. пособие / Д. Л. Скуратов, В. Н. Трусов, Д. А. Ласточ-
кин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 87 с.:
ил.

ISBN 5-7883-0422-9

Рассмотрены вопросы оптимизации технологических процессов изготовления деталей по энергетическим затратам.

Изложен метод определения рациональных условий обработки, базирующийся на структурно-параметрической оптимизации. Представлена структурно-параметрическая модель механической обработки поверхностей на окончательных операциях изготовления деталей, на основе которой создана математическая модель, состоящая из двух независимых модулей, описывающих процессы точения и растачивания, а также круглого наружного и внутреннего шлифования цилиндрических и конических поверхностей, позволяющая определить наиболее выгодные условия формообразования.

Дано описание программных продуктов по определению рациональных условий обработки, разработанных на базе вышеуказанной математической модели, и приведены примеры расчета.

Учебное пособие предназначено для студентов машиностроительных специальностей для использования при курсовом и дипломном проектировании технологических процессов и может быть полезно инженерно-техническим работникам предприятий.

УДК 621.9.01
ББК 34.630.2

ISBN 5-7883-0422-9

© Скуратов Д.Л., Трусов В.Н.,
Ласточкин Д.А., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

Введение

Совершенствование и дальнейшее развитие машиностроения всё настойчивее ставит перед технологами задачу строгой классификации различных видов технологических процессов, основанной на объективных критериях, позволяющих оценить возможности и перспективность каждого из них.

Еще большую значимость приобретают эти вопросы при производстве изделий авиационной техники, поскольку в этой отрасли машиностроения используют самые совершенные материалы, а требования к заготовкам, операционным припускам и готовым изделиям все более ужесточаются. Несмотря на уменьшение операционных припусков, связанное с использованием в производстве высокоточных методов изготовления заготовок, процессы механической обработки по своей производительности, гибкости, экономичности, качеству и точности получаемых деталей в настоящее время преобладают над другими способами обработки.

К перспективным направлениям, обеспечивающим повышение качества и снижение трудоёмкости при производстве деталей, следует отнести проектирование технологических процессов их изготовления на основе принципов оптимизации. Наиболее полное определение рациональных условий обработки должно базироваться на выборе наиболее выгоднейшей совокупности управляющих параметров, в число которых входит вид механической обработки, конструкция инструмента, марка инструментального материала или характеристика инструмента, режим резания и т.д.

Применительно к операциям механической обработки деталей в основном рассматривают два вида задач оптимизации: структурную и параметрическую. Структурная оптимизация заключается в построении последовательности операций технологического процесса, обеспечивающей, как правило, минимум его себестоимости. При параметрической оптимизации определяются рациональные условия резания на рассматриваемой операции технологического процесса, обеспечивающие в зависимости от выбранного критерия оптимальности его наибольшее или наименьшее значение при выполнении технических ограничений, налагаемых на систему. Однако построение действительно оптимального технологического процесса изготовления детали возможно только на основе структурно-параметрической оптимизации, то есть комплексного рассмотрения каждого этапа механической обработки, с последующим определением наиболее приемлемого вида обработки, режима резания, характеристики инструмента и других управляемых параметров оптимизации.

Осуществление комплексной оптимизации для всего технологического процесса является очень сложной задачей, что связано с необходимостью создания математических моделей с большим числом управляемых параметров для всех возможных вариантов обработки. В реальных технологических процессах механической обработки сначала, как правило, решается вопрос структурной оптимизации [3, 12, 27, 32]. При этом на проектирование технологического процесса, как показывает опыт, немалое влияние оказывает субъективный фактор, то есть личный опыт технолога. Однако следует иметь в виду, что на окончательных операциях механической обработки поверхностей деталей обеспечивается заданная точность обработки, шероховатость поверхности, формируется требуемое состояние поверхностного слоя. Поэтому особенно важно, чтобы выбор вида обработки в этих случаях производился не только исходя из максимальной производительности, но и стабильного обеспечения технических требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности.

1. СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Структурная оптимизация предполагает выбор того или иного метода формообразования поверхности, отвечающего наилучшим образом выбранным критериям на каждом этапе обработки. В этом случае важнейшее значение приобретает поиск сопоставимых критериев для различных методов обработки.

Сопоставимость различных методов обработки возможна лишь при использовании объективных критериев для их оценки. Наилучшим образом для этих целей подходят показатели, оценивающие затраты энергии, необходимые для осуществления рассматриваемой технологической операции, и производительность процесса на этой же операции. Но эти показатели сами по себе не учитывают единовременную область распространения технологического процесса, т.е. не учитывают площадей и объёмов заготовок, одновременно подвергающихся энергетическому воздействию. Поэтому в данном случае более универсальными показателями будут удельный расход энергии и скорость протекания процесса.

1.1. Классификация технологических процессов по их возможностям и перспективам совершенствования

Анализ технологических процессов позволил автору работы [31] осуществить их ранжирование по удельным энергетическим затратам и скоростям протекания (табл. 1.1).

1.1.1. Удельный расход энергии

По этому признаку процессы располагаются в трех энергетических уровнях.

Первый энергетический уровень (рис. 1.1) включает в себя процессы, для осуществления которых необходимо затратить минимум энергии для нарушения сил связи только между частью атомов или

Таблица 1.1
Удельный расход энергии, скорость и производительность процессов обработки

Вид процесса	Удельный расход энергии, Дж/см ²	Скорость процесса, см/с	Производительность процесса, см ³ /с
Холодное деформирование:			
- гибка листов	5-10	1-10	-
- гибка профилей	2-10-4-10	7-1,3-10	1,6·10 ² -3,25·10 ²
- штамповка на гидропрессах	2-10-6,5·10	9-1,3-10	-
- выдавливание	5,5·10 ² -8,5·10 ²	2·10 ⁻¹ -2	3·10 ⁻¹ -1,6
- высадка	7,3·10 ² -1,45·10 ³	4-10-1·10 ²	3-8·10
- штамповка взрывом	2,2-10-7,6·10	5·10 ³ -1·10 ⁴	-
Горячее деформирование:			
- нагрев	9·10 ³ -3,4·10 ⁴	3·10 ⁻³ -3	1-3,5·10
- деформирование	6-10-8-10	5-2·10 ³	1·10 ⁻¹ -1,5·10 ²
Литье:			
- нагрев и плавление	1,4·10 ⁴ -2,5·10 ⁴	1,7·10 ⁻³ -2,8·10 ⁻²	2-7,7·10 ²
- заливка в формы	4,2·10-1,7·10 ²	1·10 ² -6·10 ³	2·10-1,8·10 ⁴
- затвердевание и охлаждение	-	4·10 ⁻⁵ -8,3·10 ⁻³	-
Резание на ножницах	4·10 ² -5·10 ²	3-10-5-10	-

Окончание табл. 1.1
 Удельный расход энергии, скорость и производительность процес-
 сов обработки

Удельный расход энергии, Дж/см ³	Скорость процес-са, см/с	Производительность процесса, см ³ /с	Номер процесса
$1,7 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^2 - 7,5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 - 5$	1
$2,5 \cdot 10^3 - 3,7 \cdot 10^3$	1-1·10	$4 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$	2
$5 \cdot 10^3 - 7,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3 - 1$	3
$1,2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10 - 1,6 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	4
$5,5 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^2$	5
$1,1 \cdot 10^6 - 2,9 \cdot 10^6$	5-8	$1,7 \cdot 10^5 - 7 \cdot 10^3$	6
$3,5 \cdot 10^5 - 7,1 \cdot 10^5$	5-8	$1,7 \cdot 10^2 - 1,8 \cdot 10^4$	7
$1,7 \cdot 10^5 - 5,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^2 - 1,3 \cdot 10^4$	8
$2,3 \cdot 10^5 - 4,6 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10 - 1,7 \cdot 10$	9
$4,25 \cdot 10^5 - 4,35 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-2}$	10
$6 \cdot 10^5 - 3,6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10 - 4 \cdot 10$	$3 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4$	11
$2,4 \cdot 10^5 - 5,8 \cdot 10^5$	$1,34 \cdot 10^{10} - 1,38 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{-4} - 6,25 \cdot 10^{-3}$	12
$2,8 \cdot 10^7 - 4,7 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-6}$	13
$1 \cdot 10^3 - 1,3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5 - 1,8 \cdot 10^5$	-	14
			15

Номер процесса	Вид процесса
16	Точение
17	Протягивание
18	Фрезерование
19	Развертывание
20	Шлифование
21	Электронскровая обработка
22	Электронимпульсная обработка
23	Анодномеханическая обработка
24	Электроконтактная обработка
25	Электрохимическая обработка
26	Ультразвуковая обработка
27	Электронно-лучевая обработка
28	Светолучевая обработка
29	Резание выстрелом

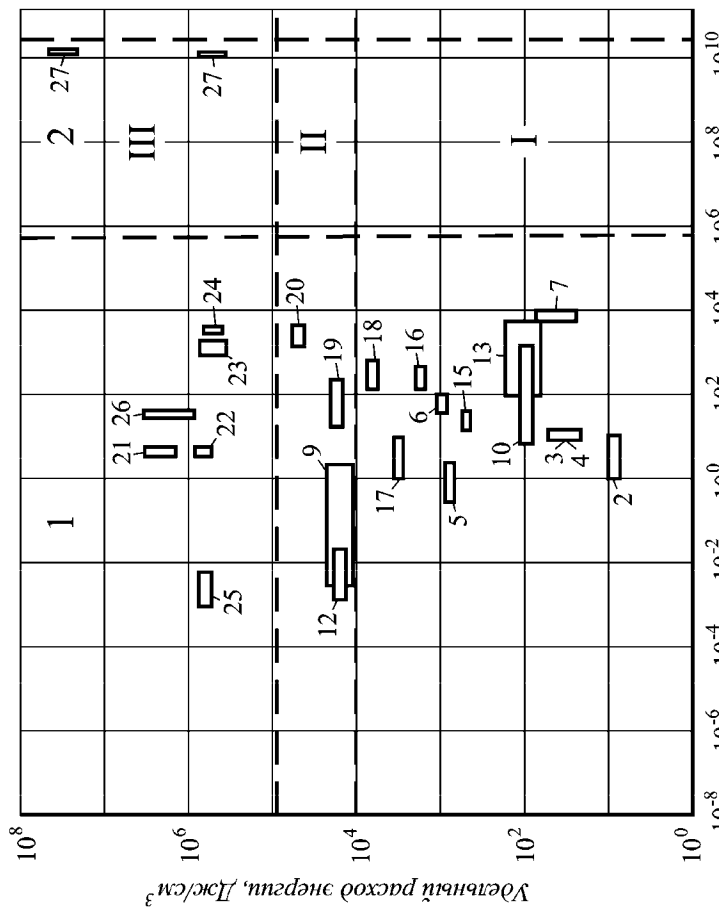


Рис. 1.1. Распределение технологических процессов обработки по энергетическим уровням и скоростным зонам: 1, 2 – скоростные зоны; I, II, III – энергетические уровни

молекул тела. Так, например, при большой степени холодной деформации смещается, в среднем, каждый восьмой атом. Такое же смещение части атомов и молекул тела имеет место при процессах резания

Первый энергетический уровень простирается до величины, равной энергии плавления стали, что составляет порядка $1 \cdot 10^4$ Дж/см³.

Второй энергетический уровень включает в себя процессы, требующие для своего осуществления ослабления связей между всеми атомами или молекулами тела. К числу характерных процессов сюда можно отнести литье. Второй энергетический уровень простирается от величины энергии плавления стали до величины энергии ее испарения и колеблется от $1 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^4$ Дж/см³.

Третий энергетический уровень включает в себя процессы, для осуществления которых необходимо затратить энергию до полного разрушения сил связи между всеми атомами или молекулами тела. Характерными процессами здесь являются процессы электрохимической, электроискровой и электроимпульсной обработки, размерной обработки электронным и световым лучами. Третий энергетический уровень расположен выше энергия испарения стали, то есть примерно выше $6 \cdot 10^4$ Дж/см³.

1.1.2. Скорость процесса

По величине достигнутых скоростей процессы делятся на две зоны.

В первой скоростной зоне расположены процессы, в основе которых лежат механические и тепловые явления (деформирование, нагрев). Они имеют свои теоретические предельные скорости – – скорости распространения звука в данном материале.

Во второй скоростной зоне расположены процессы, в основе которых лежат электрические и световые явления (электронно-лучевая и

светолучевая обработка). Они имеют теоретическую предельную скорость, равную скорости распространения света.

Внутри скоростной зоны процессы могут быть разбиты на группы по величине отношения достигнутой скорости к теоретически предельной. В первой зоне таких групп четыре. Первая – это очень медленные процессы электрохимической обработки, вторая – это процессы холодного деформирования, протягивания, разворачивания и другие медленные процессы, скорость которых примерно в десятки и сотни тысяч раз меньше предельных. Третья – это процессы горячего деформирования, течения, фрезерования и т.п., скорость которых примерно в тысячи раз меньше предельных. Четвертая – это процессы шлифования, штамповки взрывом и другие, скорости которых примерно в сотни раз меньше предельных.

Процессы первой скоростной зоны характерны тем, что они обладают большими возможностями повышения скоростей обработки.

Во второй зоне светолучевая обработка происходит с предельной скоростью – скоростью света, а электронно-лучевая обработка со скоростью порядка половины скорости света. Во второй зоне возможности увеличения скоростей обработки практически исчерпаны.

При этом следует иметь в виду, что в основу понятия «скорость обработки» положена физическая скорость взаимодействия обрабатывающего и обрабатываемого тел. При деформировании – это скорость движения пуансона или матрицы относительно штампуемого тела; при резании – скорость движения резца относительно обрабатываемой поверхности в направлении подачи; при нагреве и плавлении – скорость распространения тепловой энергии в теле; при электронно-лучевой обработке – скорость движения потока электронов. В одних случаях эта скорость постоянна, в других – переменна. Так, например, скорость потока электронов после соударения с обрабатываемым телом резко падает. В таких случаях под скоростью процесса принимается скорость

электронов на поверхности тела в момент первого соприкосновения луча с обрабатываемым телом.

1.1.3. Производительность процесса

Производительность или объемная скорость обработки ($\text{см}^3/\text{с}$) прямо пропорциональна скорости процесса ($\text{см}/\text{с}$) и площади обработки (см^2), перпендикулярной направлению скорости. При резании – это площадь сечения снимаемого слоя, при штамповке – площадь проекции штампуемой детали на плоскость стола, при гибке-подкатке – это площадь сечения обрабатываемого профиля или листа и т.п. Поэтому интенсификация всякого процесса может осуществляться как за счет увеличения скорости обработки, так и за счет увеличения одновременно обрабатываемой площади.

Из табл. 1.1 виден, кажущийся на первый взгляд парадоксальным, такой факт. Чем больше скорость процесса и чем выше удельный расход энергии – тем меньше его производительность. Но при более детальном рассмотрении это соотношение оказывается логичным. Дело в том, что все скоростные и с высоким удельным расходом энергии процессы характерны тем, что обработка ведется, образно говоря, «мелкими порциями». Объем удаляемого материала за элементарный цикл очень мал. Например, при шлифовании скорость по сравнению со многими другими процессами резания велика, однако объем снимаемой абразивным зерном стружки очень мал, поэтому и производительность процесса в целом – невелика. При обработке ультразвуком, несмотря на очень большие затраты энергии, объем элементарной стружки чрезвычайно мал и как результат – невысокая производительность обработки.

Учитывая сказанное ранее при сопоставлении различных методов обработки можно отметить следующее:

- процессы холодного деформирования выгодно отличаются по своей эффективности от всех других процессов. Они находятся на самом низком энергетическом уровне и, следовательно, требуют для своего осуществления наименьшего удельного количества энергии. Эти

процессы дают наивысший коэффициент использования материала, близкий к единице, но они обладают относительно низкой линейной скоростью при средней объемной скорости;

- процессы горячего деформирования также весьма эффективны, хотя и находятся на более высоком по сравнению с холодным деформированием энергетическом уровне. Коэффициент использования материала здесь также очень высок. Скорость процесса в целом и в особенности нагрева – невысока;

- процессы литья находятся во втором энергетическом уровне и, следовательно, требуют для своего осуществления большей энергии, чем процессы деформирования. Коэффициент использования материала при литье высок. Скорости процесса нагрева и заливки невелики;

- процессы резания расположены в двух энергетических уровнях: в первом – резание на ножницах, точение, фрезерование, протягивание и во втором – шлифование, развертывание.

Если для съема одного и того же количества материала некоторые процессы резания (шлифование, развертывание) требуют энергии на порядок больше, чем другие (точение, фрезерование), то совершенно очевидно, что эти процессы сопровождаются большими непроизводительными потерями энергии. Коэффициент использования материала в процессах резания прямо пропорционален отношению объема детали к объему заготовки. Поэтому этот коэффициент будет тем выше, чем меньший объем снимается при резании. Скорости процесса здесь выше, чем в предыдущих разобранных случаях. Однако все они являются далеко дозвуковыми, за исключением экспериментально достигнутых скоростей резания при выстреливании заготовки относительно резца, когда была достигнута скорость резания равная 0,3 скорости звука.

Процессы электроэрозионной, электрохимической и ультразвуковой обработки материалов находятся в третьем энергетическом уровне и требуют для своего осуществления большого количества энергии. Коэффициент использования материала при этих процессах так же, как

и при обработке резанием, прямо пропорционален отношению объема детали к объему заготовки. Чем меньше объем снимаемого материала, тем выше коэффициент использованного материала. Скорости данных процессов так же, как и объемные скорости или производительность являются относительно низкими.

Диаграмма распределения технологических процессов обработки по энергетическим уровням и скоростным зонам (см. рис. 1.1) позволяет предсказывать параметры новых, еще неизвестных процессов, исходя из следующих соображений:

- любой новый процесс, в основе которого лежат механические или тепловые явления, будет расположен в 1-й скоростной зоне, то есть в пределах скорости распространения звука в твердых телах. Процесс, в основе которого лежат электрические и световые явления, будет расположен во 2-й скоростной зоне – сверхзвуковой;

- любой новый процесс, в основе которого лежит ослабление связей и перегруппировка лишь некоторой части атомов – будет расположен в I энергетическом уровне. Процесс, в основе которого лежит ослабление связей всех атомов тела, будет расположен во II энергетическом уровне;

- процесс, в основе которого лежит разрушение связей между всеми атомами тела, будет расположен в III энергетическом уровне.

Совершенствование и интенсификация существующих технологических процессов обработки должны вестись также в направлении максимального приближения их к I энергетическому уровню и 2-й скоростной зоне.

Основные требования к идеальному технологическому процессу обработки можно определить так:

- энергия, необходимая для процесса обработки, должна вводиться непосредственно в рабочую зону, минуя всевозможные передаточные звенья и преобразования;

- энергия должна направляться на нарушение и ослабление минимально необходимого количества связей, не затрагивая близлежащих слоев обрабатываемого материала.

Рассматривая процессы обработки, следует остановиться на одном противоречии. Речь идет о процессах резания и вообще о процессах, при которых происходит сьем материала в виде тех или иных отходов.

Процессы деформирования характерны тем, что объем готовой детали равен объему заготовки, в отличие от процессов резания, при которых объем детали всегда меньше объема заготовки; часть материала не используется. Повышение эффективности процессов деформирования приводит к повышению общей эффективности производства. В то же время повышение интенсивности процессов резания, с одной стороны, способствует повышению эффективности обработки (быстрее изготавливаем деталь), а с другой стороны, при прочих равных условиях – росту себестоимости детали.

Уменьшение коэффициента использования материала (КИМ) при изготовлении детали одного и того же объема приводит к значительному возрастанию затрат энергии (рис. 1.2) и времени (рис. 1.3) на изготовление. Поэтому совершенно неэффективно использовать процессы со съемом материала для формообразующих операций. Процессы, сопровождающиеся съемом материала, следует использовать лишь в тех случаях, когда процессами литья и деформирования невозможно получить нужную форму детали.

Чем больше КИМ, чем меньший припуск дается на отделочную операцию, тем эффективнее процесс. Однако величина КИМ – не единственный критерий выбора того или иного процесса изготовления детали. При оценке процесса должны учитываться абсолютные величины удельного расхода энергии q и времени τ , затрачиваемые на этот процесс. От этих величин в конечном итоге зависят суммарный расход энергии и общее время обработки T .

Рассмотрим случай сочетания четырех процессов. Найденное решение будет действительно для любого встречающегося в практике числа сочетаний.

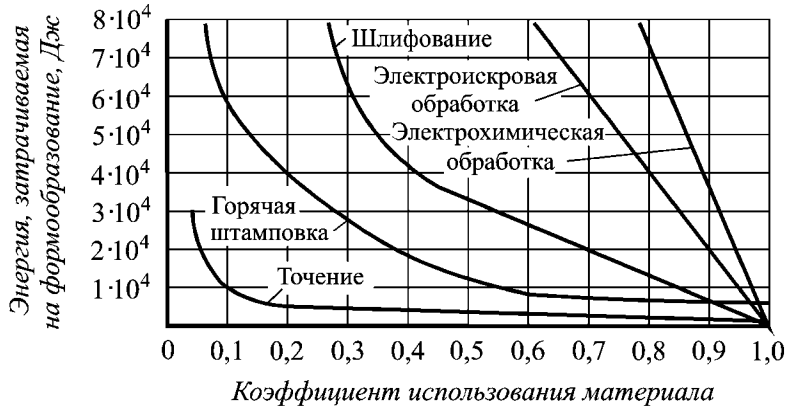


Рис. 1.2. Затраты энергии на формообразование детали в зависимости от коэффициента использования материала

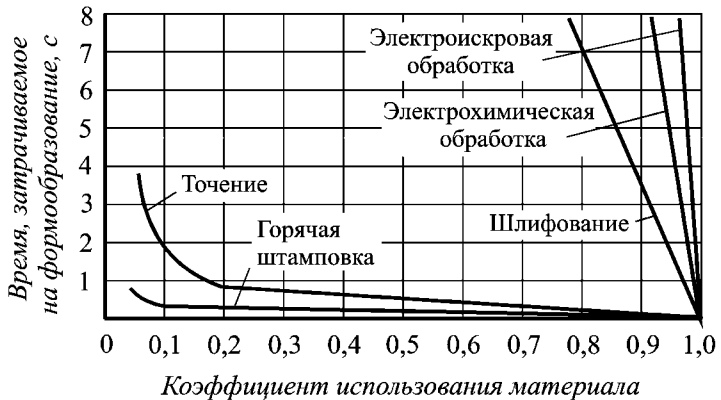


Рис. 1.3. Затраты времени на формообразование детали в зависимости от коэффициента использования материала

Предположим, необходимо изготовить деталь путем последовательного осуществления процессов: горячая штамповка заготовки, токарная обработка, электроискровая обработка и ультразвуковая обработка.

Построим векторную диаграмму (рис. 1.4) в координатах энергия – время.

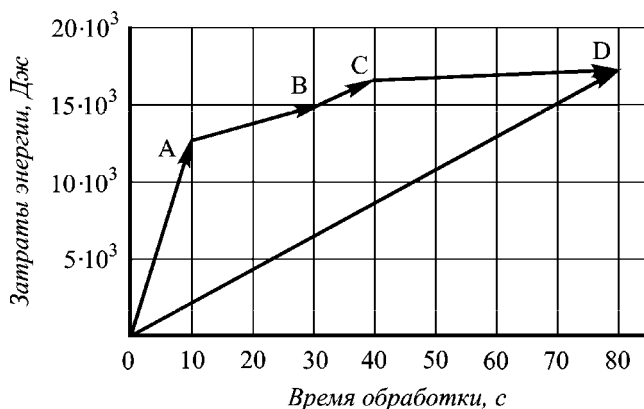


Рис. 1.4. Оценка технологических процессов на основе использования векторных диаграмм

Определим необходимый деформируемый объем заготовки и построим от начала координат первый вектор *A*, длина которого в масштабе определяет деформируемый объем заготовки. Проекция вектора на ось ординат дает величину энергии на формирование заготовки, а проекция вектора на ось абсцисс дает величину необходимого времени.

Величину единичного вектора по проекциям его на ось координат берем из табл. 1.1. Совершенно аналогичным методом, но уже от конца вектора *A*, строим вектор *B*, выражающий энергию и время токарной обработки, затем вектор *C* (электроискровая обработка) и, наконец, вектор *D* (ультразвуковая обработка). Завершаем диаграмму вычерчиванием замыкающего вектора *E*, представляющего собой векторную сумму всех составляющих векторов. Это может быть записано так:

$$\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \overline{D} = \overline{E} \quad (1)$$

или

$$\overline{aa} + \overline{bb} + \overline{cc} + \overline{dd} = \overline{ee}, \quad (2)$$

где $\overline{a}, \overline{b}, \overline{c}, \overline{d}, \overline{e}$ – единичные векторы и a, b, c, d, e – их модули.

Модули представляют собой не что иное, как численное значение деформируемого объема материала заготовки (a) и, соответственно, значения объемов удаляемого материала последующими процессами (b, c, d). Каждый единичный вектор представляет собой векторную сумму из величины энергии на обработку единичного объема (Дж/см³) и времени обработки (с/см³). Иначе говоря, проекция единичного вектора на ось ординат представляет собой энергию на обработку единичного объема материала (Дж/см³), а на ось абсцисс – время на обработку единичного объема (с/см³).

Если обозначить через V_D деформируемый объем заготовки, через v единичный объем, равный 1 см³, а через V_B, V_C, V_D соответственно объемы припусков, снимаемые во время процессов B, C, D , то справедливы следующие соотношения:

$$\frac{V_A}{v} = a, \quad \frac{V_B}{v} = b, \quad \frac{V_C}{v} = c, \quad \frac{V_D}{v} = d.$$

Величины или модули a, b, c и d показывают, сколько единичных объемов заготовки формоизменяются во время соответствующего процесса.

Величины энергии и времени по своему существу не являются векторными величинами. Но использование векторных диаграмм, как видно из рис. 1.4, значительно упрощает понимание и решение задач, связанных с оценкой технологических процессов обработки.

Необходимо отметить, что величина энергии, отсчитываемая по оси ординат, и время обработки, отсчитываемое по оси абсцисс, прямо пропорциональны деформируемому объему заготовки (при деформи-

ровании) или удаляемому объему припуска (при обработке с удалением материала), что и позволяет на плоской диаграмме связать три параметра. Два из них функционально зависят от третьего.

Каков же смысл вектора? Он заключается в том, что вектор показывает не только энергию, затраченную на осуществление того или иного процесса, но и время, в течение которого эта работа может быть совершена.

Векторные диаграммы позволяют очень наглядно оценивать различные варианты процессов, оценивать время и необходимую энергию для любых сочетаний процессов, для каждого процесса в отдельности и судить о суммарных величинах.

В табл. 1.2 приведены значения времени изготовления стального болта длиной 80 мм по четырем вариантам процесса, а также необходимая энергия, подсчитанная по данным табл.1.1. На основе табл. 1.2 построены векторные диаграммы, представленные на рис. 1.5.

Таблица 1.2
Время и энергия, необходимые для изготовления болта
по различным технологиям

Вариант процесса	Вид процесса	Время, с	Расход энергии, Дж	Коэффициент использования материала
I - изготовление болта из круглого прутка	Точение Фрезерование	580 8,4	48000 21000	0,31
II – изготовление болта из шестигранного прутка	Точение	414	35000	0,39
III – изготовление болта из горячештампованной заготовки	Горячая штамповка Шлифование Точение	12 6,6 28	80000 33000 1400	0,86
IV- изготовление болта холодной высадкой с накаткой резьбы	Холодная высадка Накатка	4,9 3	10070 690	1,0

Из табл. 1.2 и диаграмм (см. рис. 1.5) видно, что вариант IV (изготовление болта холодной высадкой) является оптимальным вариантом как по затратам времени и энергии, так и по использованию материала.

Зависимости годовых приведенных затрат от годовой программы показаны на рис. 1.6. Сравнение графиков на рис. 1.5 и 1.6 показывает, что оценка вариантов обоими методами совпадает. По эффективности в обоих случаях варианты расположились в одном и том же порядке. Методика оценки, представленная на рис. 1.5 и табл. 1.2, наглядно показывает, что I и II варианты невыгодны с точки зрения затрат материала и времени, а III вариант – с точки зрения затрат материала и энергии. В отличие от вышеупомянутых вариантов – IV вариант требует самых минимальных затрат материала, времени и энергии.

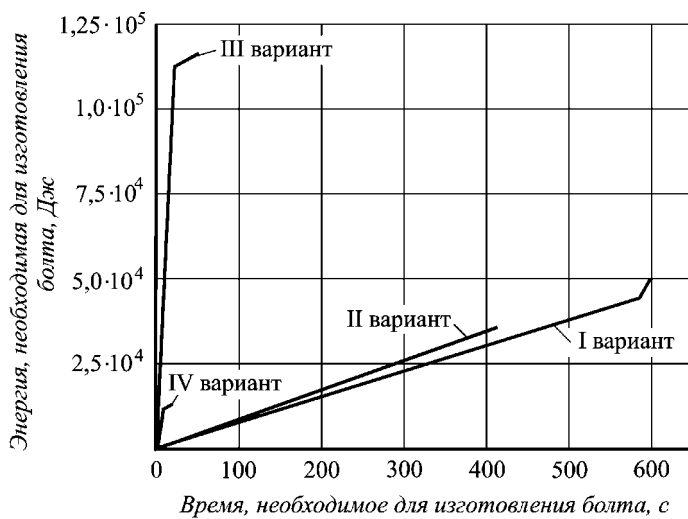


Рис. 1.5. Оценка вариантов технологических процессов при помощи векторных диаграмм

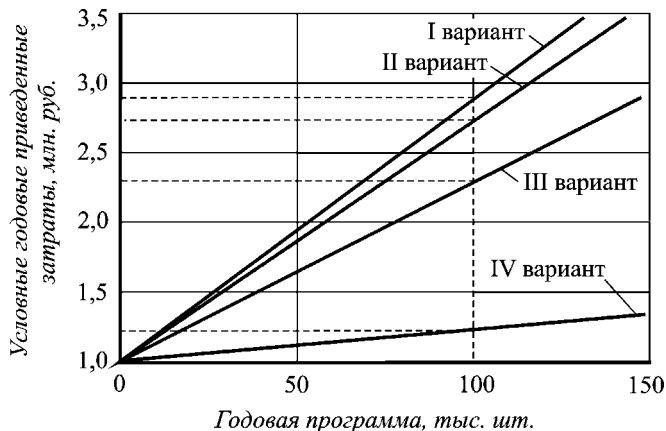


Рис. 1.6. Зависимость затрат от годовой программы

При оценке вариантов технологических процессов, конечно, в первую очередь необходимо учитывать точность и качество поверхности заготовки или детали, которые обеспечивают тот или иной варианты технологического процесса. Выбор варианта по затратам энергии и времени, а также по наивысшему коэффициенту использования материала следует производить из тех процессов, которые обеспечивают нужные точность обработки и качество поверхности.

Известные опытные данные позволяют установить зависимость между точностью обработки и качеством поверхности для различных технологических процессов формообразования (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Качество обработки при различных вариантах технологических процессов

№ процесса	Наименование процесса	Шероховатость Ra , мкм	Квалитет точности
4	Холодная штамповка в вытяжных штампах	0,63-2,5	9-13
5	Холодное выдавливание	0,63-1,25	9-10
6	Холодная высадка	0,63-5	9-19
7	Штамповка взрывом	0,63-2,5	9-11

Продолжение табл. 1.3

№ процесса	Наименование процесса	Шероховатость Ra , мкм	Квалитет точности
8	Горячее деформирование:		
	а) горячая ковка в штампах;	10-80	14-18
	б) горячая объемная штамповка без калибровки;	10-40	9-11
	в) горячая объемная штамповка с калибровкой	0,63-2,5	9-11
11	Литье:		
	а) в песчаные формы;	40-80	15-18
	б) в кокиль;	10-20	14-16
	в) по выплавляемым моделям	1,25-10	11-15
	г) в оболочковые формы;	5-20	12-15
	д) литье под давлением	1,25-5	12-15
15	Резание на ножницах	10-80	15-18
16	Точение:		
	а) черновое;	20-80	12-13
	б) получистовое;	5-20	12-15
	в) чистовое;	1,25-5	9-12
	г) тонкое (алмазное)	0,32-1,25	6-7
17	Протягивание:		
	а) получистовое;	5	9
	б) чистовое;	0,63-2,5	6-7
	в) отделочное	0,16-0,32	6
18	Фрезерование:		
	а) черновое;	5-20	12-14
	б) чистовое;	1,25-5	10-11
	в) тонкое	0,63-1,25	7-9
19	Развертывание:		
	а) получистовое;	2,5-10	9-10
	б) чистовое;	0,63-2,5	6-8
	в) тонкое	0,32-0,63	6-7
20	Шлифование:		
	а) получистовое;	2,5-5	9-11
	б) чистовое;	0,32-1,25	6-7
	в) тонкое	0,16-0,32	5-6
21	Электроискровая обработка	2,5-40	9-12
22	Электроимпульсная обработка	5-40	9-12
23	Анодномеханическая	5-40	10-12

	обработка (разрезка)		
--	----------------------	--	--

Окончание табл. 1,3

№ процесса	Наименование процесса	Шероховатость Ra , мкм	Квалитет точности
24	Электроконтактная обработка: а) разрезка листов; б) сверление	20-40 20-80	10-12 12-14
25	Электрохимическая обработка	0,32-2,5	9-12
26	Ультразвуковая обработка	0,16-2,5	5-11
Примечание. Номера процессов соответствуют обозначению их в табл. 1.1.			

Если по данным табл. 1.3 построить графики (рис. 1.7), где по оси абсцисс откладывать квалитеты, а по оси ординат – шероховатость поверхности для различных технологических процессов обработки, то ограничить круг процессов, из которых следует выбирать оптимальный вариант, можно следующим образом. Из точки с координатами заданных значений квалитета и шероховатости поверхности проводятся линии, параллельные осям абсцисс и ординат. Процессы, ограниченные этими линиями, и подлежат исследованию. Процессы, оказавшиеся за пределами этих линий, не могут рассматриваться, так как не удовлетворяют заданным условиям либо по точности обработки, либо по чистоте поверхности.

Пример построения для условия, чтобы обработанная деталь удовлетворяла по точности 4-му классу и по чистоте поверхности 5-му классу, приведен на рис. 7, а.

При высоких требованиях к точности и шероховатости поверхности детали следует изготавливать путем применения не одного, а нескольких процессов. Причем выбирать эти процессы следует, используя изложенную выше методику построения векторных диаграмм.

Номера графиков на рис. 1.7 соответствуют номерам процессов обработки по табл. 1.3.

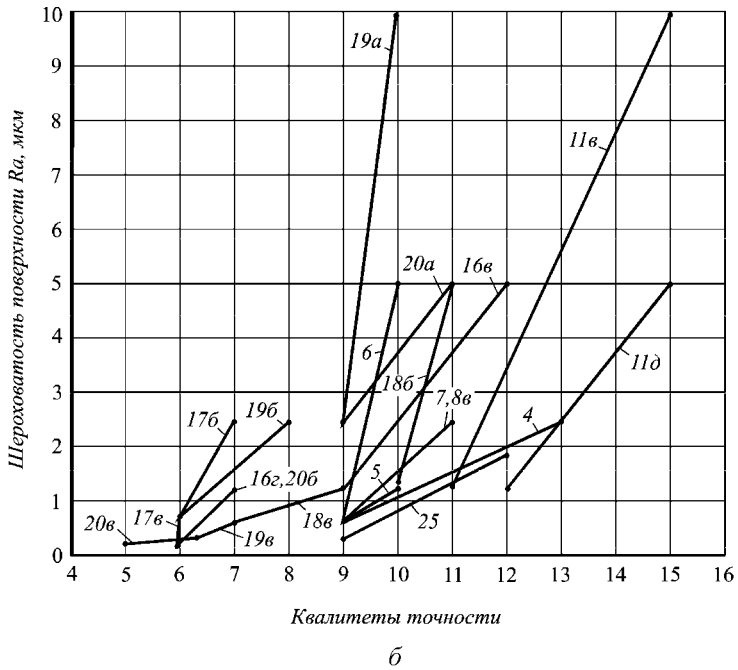
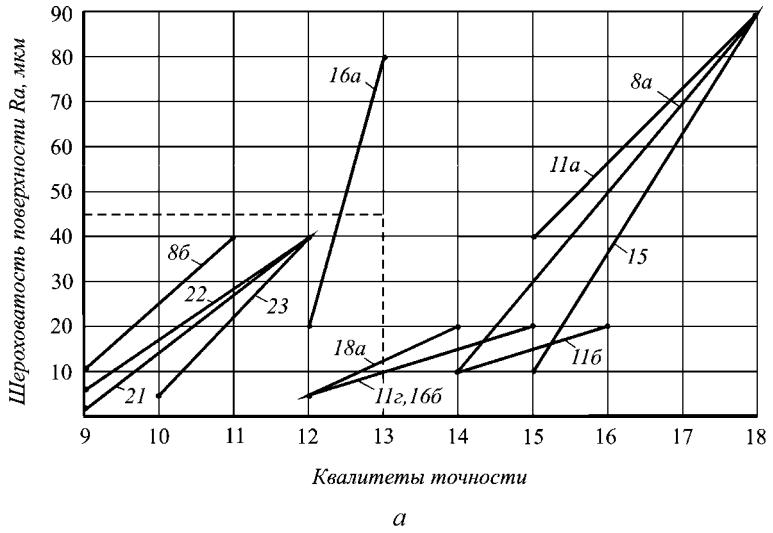


Рис. 1.7. Соотношение шероховатости и точности в зависимости от метода

обработки: a – для Ra до 90 мкм; b – для Ra до 10 мкм

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОКОНЧАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Применение существующих методов оптимизации на этапе совершенствования и разработки технологических процессов изготовления деталей позволяет повысить производительность и качество обработки, а также снизить себестоимость их производства. Модернизировать существующие или разработать новые технологические процессы изготовления деталей на основе структурно-параметрической оптимизации является весьма сложной задачей, которую можно осуществить при наличии математических моделей, позволяющих определить рациональные условия формообразования при различных видах и методах обработки. Поэтому структурно-параметрическую оптимизацию в первую очередь необходимо осуществлять на операциях, в наибольшей степени влияющих на эксплуатационные характеристики деталей, то есть на окончательных операциях.

Учитывая вышеизложенное, авторами пособия был разработан метод определения рациональных условий формообразования поверхностей на финишных операциях механической обработки заготовок. Суть данного метода, основанного на одноуровневой оптимизации, заключается в том, что выбор вида обработки, марки или характеристики инструмента, его конструкции, режима резания, СОТС и т.д., для рассматриваемой операции технологического процесса осуществляется на базе принципа структурно-параметрической оптимизации с использованием в математических моделях сопоставляемых видов механической обработки результатов исследования кинетики тепловых процессов. Однако в этом случае необходимо наличие номограмм, связывающих метастабильные диаграммы состояния материалов с параметрами, характеризующими условия обработки. Опираясь на эти номограммы можно по-

лучить зависимости для технических ограничений, базирующиеся на исследовании кинетики рассматриваемых тепловых процессов. Данные зависимости в совокупности с зависимостями, описывающими другие технические ограничения и уравнением целевой функции, образуют математические модели для рассматриваемых видов обработки. В свою очередь сам процесс оптимизации основан на использовании этих математических моделей.

2.1. Построение структурной модели определения рациональных условий обработки цилиндрических и конических поверхностей на окончательных операциях изготовления деталей

Применение одноуровневой оптимизации при определении рационального вида и условий обработки на финишных операциях технологических процессов изготовления деталей позволило существенно упростить структурную модель и привести ее к виду, представленному на рис. 2.1.

Как видно из представленной на рис. 2.1 модели, входные параметры технологической системы (блок 4) подразделяются на определяющие, управляемые и возмущающие [27, 28], обозначенные соответственно как блоки 1, 2 и 3.

К определяющим параметрам относят заданную марку обрабатываемого материала и его состояние, требования к точности обработки и отклонения формы, шероховатости поверхности, структурному и фазовому состоянию поверхностного слоя и т.д.

Управляемыми параметрами при оптимизации являются вид обработки, модель станка, способ закрепления заготовки на станке, влияющий на жесткость системы СПИД, марка инструментального материала или характеристика инструмента, конструкция и геометрия режущего инструмента, СОТС и другие параметры.

Предлагаемая структурная модель была использована для определения рациональных условий обработки наружных и внутренних

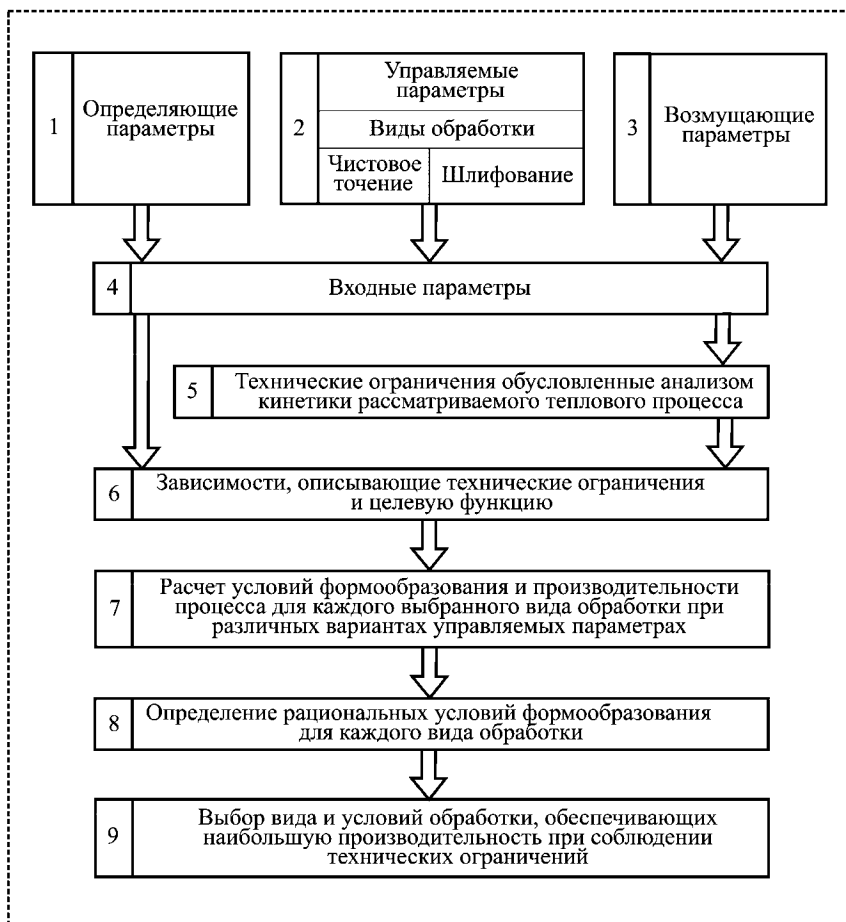


Рис. 2.1. Структурная модель определения рациональных условий обработки заготовок на финишных операциях

цилиндрических поверхностей, осуществляемых методом продольной подачи инструмента, и конических поверхностей с небольшим углом конусности, когда изменение скорости резания не превышало 15 % от первоначальной скорости. Исходя из того, что для формообразования этих поверхностей применяются преимущественно процессы чистового

точения и растачивания и круглого наружного и внутреннего шлифования, данные виды обработки введены в управляемые параметры (см. рис. 2.1). Представленная на рис. 2.1 структурная модель может быть использована для определения рациональных условий обработки при формообразовании любых поверхностей деталей, однако в этом случае в управляемые параметры должны быть введены рассматриваемые виды обработки.

Возмущающие параметры процесса резания, как отмечено в работе [28], делятся на систематические и случайные. К систематическим возмущающим параметрам относят закономерное изменение скорости, глубины резания, геометрии инструмента, которые вызваны конструктивными особенностями обрабатываемых заготовок и кинематикой резания, закономерными изменяющимися износом инструмента и температурными деформациями системы. К возмущающим параметрам, имеющим случайную природу, относятся неконтролируемые изменения физико-механических свойств заготовки и инструмента, припуска на обработку, статических и динамических характеристик оборудования и системы СПИД в целом и т.д.

На основе использования входных параметров и зависимостей, описывающих целевую функцию и технические ограничения (блоки 5, 6), в том числе и ограничения, связанные с результатами исследования кинетики тепловых процессов, в блоке 7 при помощи разработанных программных продуктов производится расчет условий формообразования заданной цилиндрической или конической поверхности при различных вариантах управляемых параметров. В процессе расчета в этом блоке определяются условия обработки либо для процессов точения и круглого наружного шлифования, либо для процессов растачивания и круглого внутреннего шлифования. Зависимости целевой функции и технических ограничений для каждого рассматриваемого вида формообразования представляют собой математические модели по определению рациональных условий обработки для соответствующих процессов. При этом следует отметить, что в зависимостях, описывающих техни-

ческие ограничения, конструкторские (точность обработки, шероховатость поверхности, структурно-фазовое состояние поверхностного слоя) и функциональные (мощность резания, температура в зоне контакта, стойкость инструмента) параметры, а также ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, являются функцией, в то время как искомые условия обработки – аргументом. Использование функциональных параметров в технических ограничениях обусловлено тем, что они характеризуют физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой во времени.

После проведения всех расчетов, осуществленных при различных вариантах управляемых параметров, в блоке 8 производится определение рациональных условий обработки для каждого рассматриваемого вида формообразования, после чего в блоке 9 осуществляется окончательный выбор вида и условий обработки.

Оптимизация при токарной обработке и шлифовании осуществлялась в детерминированной постановке, поэтому действие возмущающих параметров во внимание не принималось.

Следует отметить, что разработанные программные продукты для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании, а также при круглом наружном и внутреннем шлифовании могут широко использоваться при параметрической оптимизации на этапе проектирования любого технологического процесса изготовления детали.

2.2. Выбор целевой функции и технических ограничений

Чаще всего при определении рациональных условий резания (характеристики инструмента и его геометрии, режима резания, СОТС и т.д.) при обработке на металлорежущих станках в качестве целевой функции принимается себестоимость операции. При этом переменная

доля себестоимости операции при резании одним инструментом определяется по формуле [4]

$$C = t_o E + \frac{t_c}{Q} E + \frac{\mathcal{E}_u}{Q},$$

где t_o - основное технологическое (машинное) время, мин; E - себестоимость одной минуты работы станка и станочника, руб.; t_c - время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента, установку переточенного и подналадку станка, мин; \mathcal{E}_u - затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за период его стойкости, руб.; Q - количество деталей, обработанных за период стойкости, шт.

В свою очередь затраты, связанные с эксплуатацией инструмента за его период стойкости, могут быть определены по формуле

$$\mathcal{E}_u = t_c E_n + C_{зат} + \frac{(C_{ин} - C_{отх})k_y}{i + 1},$$

где E_n - номинальная заработная плата наладчика в одну минуту, руб.; $C_{зат}$ - стоимость заточки затупившегося инструмента, руб.; $C_{ин}$ - первоначальная стоимость инструмента, руб.; $C_{отх}$ - стоимость отходов инструмента, руб.; k_y - коэффициент, учитывающий случайную убыль инструмента; i - число переточек, допускаемых инструментом до его полного износа, шт.

При проектировании технологического процесса изготовления детали большое значение имеет правильный выбор периода стойкости режущего инструмента для каждой операции. В зависимости от конкретных условий и задач производства могут использоваться различные периоды стойкости: T_{max} - максимальный период стойкости, мин; T_{opt} - период стойкости, соответствующий оптимальной скорости резания, мин; $T_{эк}$ - экономический период стойкости, соответствующий минимальной себестоимости операции; $T_{н.пр}$ - период стойкости, соответствующий наибольшей (максимальной) производительности. На

практике наиболее часто используют экономический период стойкости и период стойкости, соответствующий наибольшей производительности:

$$T_{\text{эк}} = \frac{1-m}{m} \left(t_c + \frac{\mathcal{E}_u}{E} \right); \quad T_{\text{н.пр}} = \frac{1-m}{m} \cdot t_c,$$

где m - показатель относительной стойкости инструмента.

Работа с максимальной производительностью, как правило, не соответствует минимальной себестоимости обработки. В связи с этим при правильном построении производственного процесса определение рационального режима резания должно основываться на экономическом периоде стойкости. Обработка заготовок на режимах, соответствующих наибольшей производительности, в условиях производства ведется лишь в случаях крайней необходимости, когда требуется, не считаясь с затратами, изготовить максимально возможное количество деталей. Режимы резания, рассчитанные с использованием экономических периодов стойкости инструментов и обеспечивающие наименьшее время обработки, будут одновременно и наиболее экономичными [6]. Поэтому в качестве целевой функции при точении и растачивании и круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки.

Исходя из вышеизложенного, уравнение целевой функции будет иметь вид:

- при продольном точении и растачивании заготовок

$$f_m = \frac{l_m A}{n_s S t_p}, \quad (2.1)$$

где A - припуск на обработку (на сторону), мм; S - продольная подача, мм/об; t_p - глубина резания, мм; l_m - длина пути резца в направлении подачи, мм; n_s - частота вращения заготовки (детали¹), об/мин;

¹ В нормативной и справочной литературе по механической обработке и на практике заготовку часто именуют деталью.

- при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи

$$f_{\text{ш}} = \frac{l_{\text{ш}} A}{n_3 S_{\text{пр}} S_x}, \quad (2.2)$$

где $l_{\text{ш}}$ - длина пути шлифовального круга в направлении продольной подачи, мм; $S_{\text{пр}}$ - продольная подача, мм/об; S_x - поперечная подача на один ход стола, мм/ход.

2.2.1. Выбор технических ограничений при продольном точении и растачивании заготовок

Ограничение, связанное с режущими свойствами инструмента

Скорость резания при продольном точении и растачивании определяется из условия полного использования режущих свойств инструмента на основании неравенства

$$v \leq v_m, \quad (2.3)$$

где v - скорость резания, м/мин; v_m - максимально допустимая скорость резания при заданной стойкости резца, м/мин.

Подставив значения v и v_m , определяемые по формулам

$$v = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}, \quad v_m = \frac{C'_v k_v}{T_p^m t_p^{x_v} S^{y_v}},$$

в неравенство (2.3) и решая его относительно $t_p S n_3$, получим первое техническое ограничение:

$$n_3 (100 S)^{y_v} (100 t_p)^{x_v} \leq \frac{318 C'_v k_v 100^{(x_v + y_v)}}{T_p^m D_3}, \quad (2.4)$$

где n_3 - частота вращения заготовки, об/мин; S - подача, мм/об; t_p - глубина резания, мм; C'_v - коэффициент, характеризующий условия обработки, для которых разрабатывались нормативные материалы; k_v - поправочный коэффициент, учитывающий изменение реальных усло-

вий обработки от тех, при которых определялся коэффициент C'_v ; T_p - заданный период стойкости резца, мин; D_3 - диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; m, x_v, y_v - показатели степени, характеризующие влияние T_p, t_p, S на скорость резания.

В неравенстве (2.4) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято вместо $S \rightarrow 100S$, а вместо $t_p \rightarrow 100t_p$, с соответствующими поправками в правой части.

Ограничение, связанное с мощностью станка

При токарной обработке заготовок необходимо, чтобы эффективная мощность $N_{эф}$ не превышала мощности, подводимой к шпинделю станка, то есть выполнялось условие

$$N_{эф} \leq N_{инт}, \quad (2.5)$$

где $N_{эф}$ - эффективная мощность, кВт; $N_{инт}$ - мощность, подводимая к шпинделю станка, кВт.

Подставив в неравенство (2.5) $N_{эф} = \frac{P_z \nu}{60 \cdot 1000}$, $N_{инт} = N_{эд} \eta$ и учитывая, что $P_z = C_{P_z} t_p^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} \nu^{z_{P_z}}$ и $\nu = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}$, получим после соответствующего преобразования и решения относительно $t_p S n_3$ второе техническое ограничение в виде

$$n_3^{(1+z_{P_z})} (100S)^{y_{P_z}} (100t_p)^{x_{P_z}} \leq \frac{N_{эд} \eta \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 318^{(1+z_{P_z})} 100^{(x_{P_z}+y_{P_z})}}{C_{P_z} D_3^{(1+z_{P_z})}} \quad (2.6),$$

где $N_{эд}$ - мощность электродвигателя механизма главного движения станка, кВт; η - КПД кинематической цепи механизма главного движения; C_{P_z} - коэффициент, отражающий влияние условий обработки на составляющую силы резания P_z ; $x_{P_z}, y_{P_z}, z_{P_z}$ - показатели степени, ха-

рактически характеризующие интенсивность влияния соответственно t_p , S и ν на величину силы P_z .

Ограничение, связанное с точностью обработки

Для обработки заданной поверхности заготовки с погрешностью, не превышающей допуск на диаметральный размер обрабатываемой поверхности, необходимо выполнить следующее условие [13]:

$$P_y \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_p} \right) \leq k_3 \frac{\delta_p}{2}, \quad (2.7)$$

где $P_y = C_{P_y} t_p^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} \nu^{z_{P_y}}$ - радиальная составляющая силы резания, Н;

$\frac{1}{j_{заг}}$, $\frac{1}{j_{см}}$, $\frac{1}{j_p}$ - податливость соответственно заготовки, станка и резца, мм/Н; k_3 - коэффициент, показывающий, в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией заготовки, составляющих станка и резца, $k_3 = 0,7 \dots 0,8$; δ_p - допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм.

Подставив в эмпирическую зависимость для определения силы P_y формулу для расчета скорости резания $\nu = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}$, а затем вновь полученную зависимость в неравенство (2.7) и решив это уравнение относительно $n_3 S t_p$, третье техническое ограничение получим в следующем виде:

$$n_3^{z_{P_y}} (100S)^{y_{P_y}} (100t_p)^{x_{P_y}} \leq \frac{318^{z_{P_y}} 100^{(x_{P_y} + y_{P_y})} k_3 \delta_p}{2C_{P_y} D_3^{z_{P_y}} \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_p} \right)}, \quad (2.8)$$

где C_{P_y} - коэффициент, отражающий влияние условий обработки на составляющую силы резания P_y ; x_{P_y} , y_{P_y} , z_{P_y} - показатели степени,

характеризующие интенсивность влияния соответственно t_p , S и v на величину силы P_y .

Для расчета податливости заготовки, станка и резца могут быть использованы следующие зависимости:

- для определения податливости заготовки

$$\frac{1}{j_{заг}} = \frac{L^3}{k_1^j J E},$$

где L - свободная длина заготовки, мм; k_1^j - коэффициент, учитывающий влияние способа закрепления заготовки (при закреплении в патроне $k_1 = 3$, в центрах – 70, в патроне с поджатием центром задней бабки – 100 [15]); J - момент инерции наиболее опасного сечения заготовки, выбранного с учетом способа закрепления, мм⁴, для сплошного сечения $J = 0,05D^4$, для кольцевого сечения $J = 0,05(D^4 - d^4)$; E - модуль продольной упругости материала обрабатываемой заготовки, МПа;

- для определения податливости станка

$$\frac{1}{j_{ст}} = 0,000025 k_2^j \sqrt[3]{\frac{200}{H_ц}},$$

при закреплении заготовки в центрах и в патроне с поджатием центром задней бабки станка $k_2^j = -1,0$, где знак «-» учитывает конкурирующее влияние смещений на погрешность обработки, при закреплении заготовки в патроне $k_2^j = 0,03L$, где L - вылет заготовки из патрона, мм; $H_ц$ - высота центров станка, мм;

- для определения податливости резца

$$\frac{1}{j_p} = \frac{l^3}{3J_p E_p},$$

где l - вылет резца из резцедержателя, если державка резца имеет круглое сечение по всей длине, или расстояние от вершины резца до перехода круглого сечения в призматическое; E_p - модуль продольной упругости материала державки резца, МПа; J_p - момент инерции поперечного сечения державки резца, мм⁴, для прямоугольного сечения $J_p = \frac{HB^3}{12}$, для круглого $J_p = 0,05d_p^4$ (если круглое сечение переходит в прямоугольное, то расчет производится по наибольшему диаметру круглого сечения).

При обточке наружных поверхностей заготовок проходной резец обладает очень высокой жесткостью в направлении действия радиальной составляющей силы резания по сравнению с другими компонентами системы СПИД. Поэтому его податливость $\frac{1}{j_p} = 0$. При рас-

точке внутренних поверхностей заготовок жесткость резца, как правило, оказывается существенно ниже других компонентов системы СПИД и поэтому определяет величину допустимой подачи, то есть в этом случае можно считать $\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} = 0$.

Зависимость (2.8) может быть использована на первом этапе определения рациональных условий обработки при точении и растачивании, так как она не учитывает температурные деформации резца и его размерный износ, а по данным работы [21] величина удлинения резца при работе без охлаждения может составлять 30...50 мкм.

При последующей итерации ограничение, связанное с точностью обработки, будет иметь вид

$$n_3^{z_{P_y}} (100S)^{y_{P_y}} (100t_p)^{x_{P_y}} \leq \frac{318^{z_{P_y}} 100^{(x_{P_y} + y_{P_y})} \left[k_3 \delta_p - 2 \left(\Delta_{\theta.p} - \Delta_{из.p} \right) \right]}{2C_{P_y} D_3^{z_{P_y}} \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_p} \right)}, \quad (2.9)$$

где $\Delta_{\theta,p}$ - погрешность, обусловленная температурной деформацией резца, мм; $\Delta_{из,p}$ - погрешность, вызванная линейным износом резца, мм.

Величину $\Delta_{\theta,p}$ можно определить по формуле, приведенной в работе [29]:

$$\Delta_{\theta,p} = \Delta'_{\theta,p} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{4}} \right),$$

где τ - время обработки, мин; $\Delta'_{\theta,p}$ (мм) для условий чистовой обработки определяется из выражения [29]

$$\Delta'_{\theta,p} = 4,5 \cdot 10^{-4} \frac{l}{F} \sigma_e (tS)^{0,75} \sqrt{v},$$

где l - вылет резца, мм; F - поперечное сечение державки резца, мм²; σ_e - предел прочности обрабатываемого материала при растяжении, МПа; t - глубина резания, мм; S - подача, мм/об; v - скорость резания, м/мин.

В свою очередь погрешность, вызванная линейным износом резца, определяется по формуле [21]:

$$\Delta_{из,p} = \frac{2u_o \pi D_s l_m n}{10^9 S},$$

где u_o - относительный износ резца, мкм/км; D_s - диаметр заготовки, мм; l_m - длина пути резца в направлении подачи, мм; n - количество деталей в партии, обрабатываемой в период между подналадками станка.

Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности

Обработка заданной поверхности заготовки с допускаемой шероховатостью поверхности может быть осуществлена при условии:

$$(100S)(100r_p)^x \leq \frac{C_s Rz^y r^n (90 + \gamma)^{0,15} \alpha^{0,25} \cdot 100^{(x+1)}}{(\varphi\varphi_1)^z h_3^{0,2}} k_s, \quad (2.10)$$

где C_s, n, x, y, z - коэффициент и показатели степени, зависящие от обрабатываемого материала; Rz - высота неровностей по десяти точкам, мкм; r - радиус закругления вершины резца, мм; γ - главный передний угол, градус; α - главный задний угол, градус; φ и φ_1 - главный и вспомогательный углы в плане, градус; h_3 - износ по задней поверхности резца, мм; k_s - коэффициент, учитывающий группу обрабатываемого материала.

Неравенство (2.10) является четвертым техническим ограничением, оно получено на основании собственных экспериментальных данных авторов пособия и экспериментальных данных других исследователей. В отличие от подобного неравенства, представленного в работе [24], данное неравенство учитывает возможность обработки заготовок резцами с отрицательными передними углами.

Ограничение, связанное с температурой обработки

При точении и растачивании заготовок температура в зоне резания, а также время нагрева и охлаждения могут быть достаточными для того, чтобы в поверхностном слое произошли структурно-фазовые превращения. Поэтому необходимо, чтобы температура в зоне резания не превышала критических значений, то есть должно выполняться условие

$$\theta \leq \theta_{kp}, \quad (2.11)$$

где θ - температура в зоне резания, °С; θ_{kp} - критическая температура в зоне резания, °С.

Температура в зоне резания при точении и растачивании заготовок может быть определена по эмпирической зависимости

$$\theta = C_\theta t_p^{x_\theta} S^{y_\theta} v^{z_\theta},$$

где C_θ - коэффициент, отражающий влияние условий обработки на температуру в зоне резания; $x_\theta, y_\theta, z_\theta$ - показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно t, S и v на величину температуры резания.

Подставив вышеприведенную эмпирическую зависимость и формулу для расчета скорости резания в неравенство (2.11) и решив его относительно $n_3 St_p$, получим пятое техническое ограничение:

$$n_3^{z_\theta} (100S)^{y_\theta} (100t_p)^{x_\theta} \leq \frac{\theta_{кр} \cdot 318^{z_\theta} \cdot 100^{(x_\theta + y_\theta)}}{C_\theta D_3^{z_\theta}}. \quad (2.12)$$

Ограничения, связанные с результатами исследования кинетики тепловых процессов

Возникновение структурных и фазовых превращений в поверхностном слое заготовок связано не только с температурой в зоне резания, но также со скоростью его нагрева и в большей степени со скоростью охлаждения, то есть с кинетикой тепловых процессов.

При механической обработке материалов скорость охлаждения обработанной поверхности зависит от скорости подачи СОЖ в зону резания и от скорости вращения заготовки. Увеличение скорости резания (скорости вращения заготовки) на операциях точения и растачивания, во-первых, приводит к повышению температуры в зоне резания за счет увеличения общего тепловыделения $Q = P_z v$, во-вторых, как правило, к небольшому уменьшению главной составляющей силы резания P_z [22] и, в-третьих, к росту скорости охлаждения.

При постоянной скорости подачи СОЖ в зону резания ограничения, обусловленные результатами исследования кинетики тепловых процессов, основаны на использовании диаграмм, связывающих метастабильные диаграммы состояния материалов со скоростью вращения заготовок. На рис. 2.2 и 2.3 в качестве примера приведены диаграммы, связывающие соответственно метастабильное состояние сталей 30ХГСН2А и ЭП517-Ш со скоростью резания

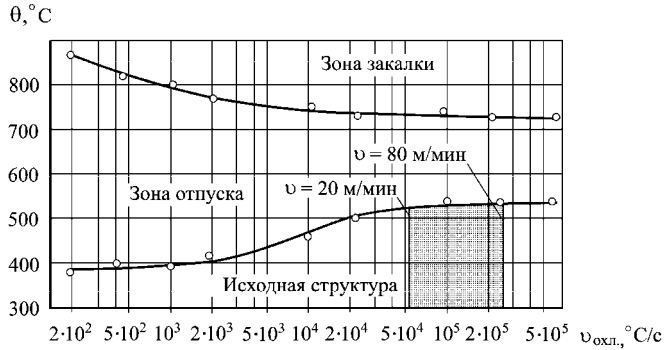


Рис. 2.2. Диаграмма, связывающая метастабильное состояние стали 30XГСН2А со скоростью резания (скоростью вращения заготовок) при чистовом точении и растачивании

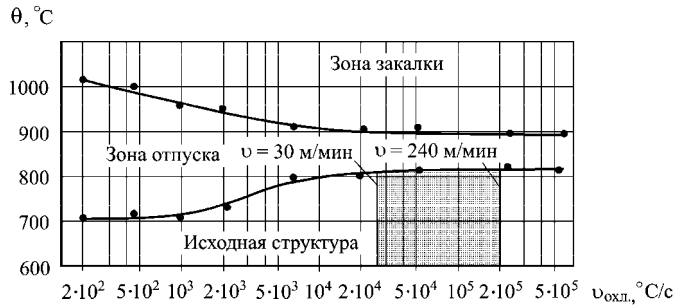


Рис. 2.3. Диаграмма, связывающая метастабильное состояние стали ЭП1517-Ш (б) со скоростью резания (скоростью вращения заготовок) при чистовом точении и растачивании

(скоростью вращения заготовок). Исходя из этих диаграмм, производительная обработка материалов при гарантированном отсутствии структурных и фазовых изменений в поверхностном слое возможна в том случае, если выполняются условия

$$v \geq v_{\text{пр.наим}} ; \quad (2.13)$$

$$v \leq v_{\text{пр.наиб}} , \quad (2.14)$$

где $v_{пр.наим}$ - наименьшая предельная допустимая скорость резания, м/мин; $v_{пр.наиб}$ - наибольшая предельная допустимая скорость резания.

Наименьшая предельная допустимая скорость резания при чистовом точении и растачивании связана с требованиями, предъявляемыми к производительности и качеству обработки, а наибольшая предельная допустимая скорость резания обусловлена требованиями, предъявляемыми к себестоимости обработки.

Решив неравенства (2.13) и (2.14) относительно n_3 , предварительно представив в них v , как $\frac{\pi D_3 n_3}{1000}$, получим шестое и седьмое технические ограничения:

$$n_3 \geq \frac{1000v_{пр.наим}}{\pi D_3}; \quad (2.15)$$

$$n_3 \leq \frac{1000v_{пр.наиб}}{\pi D_3}. \quad (2.16)$$

Ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, используемого для точения или растачивания заготовки

При обработке заготовки частота ее вращения и продольная подача, сообщаемая резцу, должны быть ограничены, соответственно, наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя и наибольшей и наименьшей подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

- восьмое техническое ограничение

$$n \geq n_{ст\ min}, \quad (2.17)$$

где $n_{ст\ min}$ - минимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

- девятое техническое ограничение

$$n \leq n_{ст\ max}, \quad (2.18)$$

где $n_{ст\ max}$ - максимальная частота вращения шпинделя станка, об/мин;

- десятое техническое ограничение

$$100S \geq 100S_{ст\ min}, \quad (2.19)$$

где $S_{ст\ min}$ - минимальная продольная подача станка, мм/об;

- одиннадцатое техническое ограничение

$$100S \leq 100S_{ст\ max}, \quad (2.20)$$

где $S_{ст\ max}$ - максимальная продольная подача станка, мм/об.

Ограничения, связанные с глубиной резания

Для обеспечения заданного качества точности детали глубина резания t_p не может быть меньше некоторой определенной для каждого инструмента и обрабатываемого материала величины $t_{p\ min}$. С другой стороны, глубина резания не может быть больше припуска на обработку. Тогда технические ограничения, обусловленные глубиной резания, будут иметь вид:

- двенадцатое техническое ограничение

$$100t_p \geq 100t_{p\ min}; \quad (2.21)$$

- тринадцатое техническое ограничение

$$100t_p \leq 100A, \quad (2.22)$$

где A - припуск на обработку (на сторону), мм.

2.2.2. Выбор технических ограничений при круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок методом продольной подачи

Ограничение, связанное со стойкостью шлифовального круга

Наиболее существенными факторами, влияющими на период стойкости шлифовального круга, являются его размеры, конструкция, характеристика, марка обрабатываемого материала и режимы резания. Для получения технического ограничения, связанного со стойкостью шлифовального круга при круглом наружном и внутреннем шлифовании, была использована формула, приведенная в работе [24]:

$$n_3^2 S_{np}^2 (1000 S_x)^2 \leq \frac{C_m \cdot 318000^2 B_k^2}{T_k D_3^{q_m}} k_1^T k_2^T k_3^T, \quad (2.23)$$

где n_3 - частота вращения заготовки, об/мин; S_{np} - продольная подача, мм/об; S_x - поперечная подача на один ход стола, мм/ход; C_m - коэффициент, характеризующий условия, для которых определялся период стойкости шлифовального круга; B_k - высота круга, мм; T_k - период стойкости шлифовального круга, мин; D_3 - диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; q_m - показатель степени, характеризующий интенсивность влияния диаметра детали на период стойкости круга; k_1^T - коэффициент, учитывающий влияние марки обрабатываемого материала на период стойкости круга; k_2^T, k_3^T - коэффициенты, учитывающие соответственно влияние размера и конструкции круга на его период стойкости.

Период стойкости шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью (прерывистых, композиционных, комбинированных) в 1,5..3 раза выше периода стойкости кругов со сплошной рабочей поверхностью [24]. Поэтому введение в формулу (2.23) коэффициента k_3^T в значительной мере повышает точность определения периода стойкости абразивных кругов, используемых при круглом шлифовании заготовок.

В табл. 2.1 представлены средние значения коэффициента k_3^T для кругов со сплошной и прерывистой режущей поверхностью.

В неравенстве (2.23) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято вместо $S_x \rightarrow 1000 S_x$, с соответствующими поправками в правой части.

Таблица 2.1

Значения коэффициента k_3^T для кругов различных конструкций

Круг		
Сплошной	Прерывистый	Композиционный и комбинированный
1,0	2,0	2,5

Ограничение, связанное с мощностью станка

При шлифовании, так же как и при других видах механической обработки, проводимой на металлорежущих станках, необходимо, чтобы эффективная мощность $N_{эф}$ не превышала мощности, подводимой к шпинделю шлифовальной бабки станка, то есть выполнялось условие

$$N_{эф} \leq N_{ин шб} , \quad (2.24)$$

где $N_{эф}$ - эффективная мощность, кВт; $N_{ин шб}$ - мощность, подводимая к шпинделю шлифовальной бабки станка, кВт.

Для определения эффективной мощности при круглом наружном и внутреннем шлифовании методом продольной подачи за основу использованы формулы, приведенные в работе [26]. В уточненном и общем виде эти формулы можно представить как [24]

$$N_{эф} = C_N (\nu_s S_{np} S_x)^{0,7} D_s^{0,25} B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N , \quad (2.25)$$

где C_N - коэффициент, характеризующий условия обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании, для которых была получена вышеприведенная эмпирическая зависимость; k_1^N, k_2^N, k_3^N - поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние изменения твердости шлифовального круга, марки обрабатываемого материала и конструкции круга на эффективную мощность.

Использование на операциях шлифования абразивных кругов специальных конструкций (прерывистых, композиционных, комбинированных) взамен сплошных позволяет уменьшить эффективную мощность шлифования на 20...25%. Средние значения коэффициента k_3^N для кругов различных конструкций приведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Средние значения коэффициента k_3^N для шлифовальных кругов различных конструкций

Круг		
Сплошной	Прерывистый и комбинированный	Композиционный
1,0	0,75-0,85	0,7-0,8

Подставив в неравенство (2.24) формулу (2.25) и $N_{шп шб} = N_{эд шб} \eta$, а также учитывая, что $v_s = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}$, после несложного преобразования и решения относительно $n_3 S_{np} S_x$ второе техническое ограничение получим в следующем виде:

$$n_3^{0,7} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,7} \leq \frac{318000^{0,7} N_{эд шб} \eta}{C_N D_3^{0,95} B_k^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N}, \quad (2.26)$$

где $N_{эд шб}$ - мощность электродвигателя шлифовальной бабки станка, кВт; η - КПД механизма шлифовальной бабки.

Ограничение, связанное с точностью обработки

Требуемая точность обработки поверхности заготовки обеспечивается условием [14]

$$\frac{P_y}{j} \leq a_n \delta_p, \quad (2.27)$$

где P_y - радиальная составляющая силы резания, Н; $\frac{1}{j}$ - податливость системы СПИД, мм/Н; δ_p - допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм; a_n - коэффициент, показывающий, в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией системы СПИД. Для черного и получистового шлифования при консольном

закреплении заготовки $a_n = 0,1$, а для чистового шлифования, соответственно, $a_n = 0,05$. Для чернового, получистового и чистового шлифования при закреплении в центрах или в патроне с поджатием центром задней бабки $a_n = 0,1...0,15$ [17]; для расчета по допускаемой форме допуск на форму цилиндрических поверхностей заготовок $\delta_\phi = 0,3\delta_p$, при уровне относительной геометрической точности А (ГОСТ 24643-81).

Податливость системы СПИД может быть определена по формуле

$$\frac{1}{j} = \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{опр}} \right), \text{ тогда неравенство (2.27) примет вид}$$

$$P_y \left(\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{опр}} \right) \leq a_n \delta, \quad (2.28)$$

где $\frac{1}{j_{заг}}$, $\frac{1}{j_{см}}$, $\frac{1}{j_{опр}}$ - податливость соответственно заготовки, станка и оправки, на которую устанавливается круг при круглом внутреннем шлифовании (или шпинделя внутришлифовальной бабки при установке круга непосредственно на шпиндель), мм/Н.

Для расчета податливости заготовки при круглом шлифовании может использоваться та же самая зависимость, что и при точении. Причем при закреплении заготовки в патроне и в центрах значения коэффициента k_1^j для процессов точения и шлифования – одинаковы (см. 2.2.1). В случае закрепления заготовки в самозажимном поводковом патроне с поджатием центром задней бабки коэффициент k_1^j принимает значение, равное 140 [17].

Для расчета податливости станка могут быть использованы следующие, полученные авторами работы [24], зависимости:

- для станков с неповоротными шлифовальной и передней бабками

$$\frac{1}{j_{cm}} = 0,00007292 k_2^j \sqrt[1,5]{\frac{185}{H_{\text{ц}}}} ;$$

- для станков с поворотными шлифовальной и передней бабками

$$\frac{1}{j_{cm}} = 0,0001429 k_2^j \sqrt[1,3]{\frac{185}{H_{\text{ц}}}} ,$$

при закреплении заготовки в центрах и в патроне с поджатием центром задней бабки станка значения коэффициента k_2^j при точении и шлифовании не отличаются, при закреплении заготовки в патроне величина k_2^j подсчитывается по той же самой формуле, что и для процесса точения.

Податливость оправки (или шпинделя внутришлифовальной бабки) рассчитывалась по формуле

$$\frac{1}{j_{опр}} = \frac{l_{опр}^3}{3J_{опр}E_{опр}} ,$$

где $l_{опр}$ - длина оправки (или вылет шпинделя), мм; $E_{опр}$ - модуль продольной упругости материала оправки (шпинделя), МПа; $J_{опр} = 0,05d_{опр}^4$ - момент инерции поперечного сечения оправки (шпинделя), мм⁴.

При круглом наружном шлифовании заготовок планшайба с кругом без использования каких-либо оправок непосредственно устанавливается на шпиндель шлифовальной бабки, поэтому $\frac{1}{j_{опр}} = 0$. При круглом внутреннем шлифовании поверхностей заготовок жесткость оправки, как правило, оказывается существенно ниже других компонентов системы СПИД и поэтому определяет величину допустимой подачи, то есть в этом случае можно считать

$$\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{cm}} = 0 .$$

При шлифовании большинства материалов различными кругами радиальная составляющая силы резания всегда больше главной составляющей, а отношение $k_{ин} = \frac{P_y}{P_z}$ чаще всего находится в интервале от 2,2 до 3,3 [19]. Отношение сил $\frac{P_y}{P_z}$ является наиболее стабильным силовым показателем при шлифовании, поэтому его достаточно часто используют для оценки режущей способности кругов. С уменьшением этого отношения снижаются затраты энергии на трение и в целом на работу разрушения металла.

Главную составляющую силы резания можно определить из формулы для определения эффективной мощности при шлифовании [25]:

$$P_z = \frac{1000N_{эф}}{v_k},$$

где P_z - главная составляющая силы резания, Н; v_k - скорость круга, м/с.

Тогда формула для определения радиальной составляющей силы резания будет иметь вид

$$P_y = \frac{1000N_{эф}}{v_k} k_{ин},$$

где P_y - радиальная составляющая силы резания, Н.

Величину коэффициента $k_{ин}$ можно рассчитать по приближенной формуле [5]

$$k_{ин} = 5 - \frac{50\rho_3^{0,7}}{v_k^{0,53}},$$

где ρ_3 - радиус закругления вершины зерна, мм.

Подставив формулу для определения силы P_y в неравенство (2.28), а затем в полученное неравенство последовательно формулу (2.25) и

формулу для определения скорости вращения заготовки v_3 , после соответствующего преобразования и решения относительно $n_3 S_{np} S_x$ получим третье техническое ограничение

$$n_3^{0,7} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,7} \leq \frac{318000^{0,7} v_{\kappa} a_n \delta_p}{1000 C_N \left[\frac{1}{j_{заг}} + \frac{1}{j_{см}} + \frac{1}{j_{онп}} \right] D_3^{0,95} B_{\kappa}^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N k_u} \quad (2.29)$$

Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности

При круглом наружном и внутреннем шлифовании с продольной подачей среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Ra может быть определено по формуле [24], полученной на основании анализа и обобщения имеющихся данных и собственных исследований авторов пособия:

$$Ra = C_{Ra} \left(\frac{v_3}{60 v_{\kappa}} \right)^{0,5} \left(\frac{S_x}{D_{\kappa}} \right)^{0,25} \left(\frac{S_{np}}{B_{\kappa}} \right)^{0,5} k_{общ}^{0,5} k_{Ra} d_{зеп}^{0,5} n^{m_{Ra}}, \quad (2.30)$$

где Ra - среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; C_{Ra}, m_{Ra} - коэффициент и показатель степени, зависящие от марки обрабатываемого материала и вида шлифования (табл. 2.3); D_{κ} - диаметр круга, мм; $k_{общ}$ - коэффициент, учитывающий влияние марки абразивного материала, поверхностной пористости [18] и структуры круга, а также условий его правки на формирование шероховатости поверхности; при обработке сталей и сплавов электрокорундовыми кругами твердостью МЗ...СМ2 и структурой 6...8 $k_{общ}$ можно принимать равным 0,2942, при обработке титановых сплавов кругами из карбида кремния вышеуказанной твердости и структуры $k_{общ}$ можно принимать, соответственно, равным 0,2148; k_{Ra} - коэффициент, учитывающий влияние кон-

струкции круга на шероховатость поверхности (табл. 2.4); $d_{зep}$ - размер зерна, мм; n - число ходов выхаживания.

Т а б л и ц а 2.3

Значения коэффициента C_{Ra} и показателя степени m_{Ra} в формуле (2.29) при шлифовании кругами твердостью МЗ...СМ2 и структурой б...8

Материал	Вид шлифования			
	Круглое наружное		Круглое внутреннее	
	C_{Ra}	m_{Ra}	C_{Ra}	m_{Ra}
Стали и сплавы	715	- 0,024	400	- 0,012
Титановые сплавы	1150	- 0,024	465	- 0,012

Т а б л и ц а 2.4

Средние значения коэффициента k_{Ra} для шлифовальных кругов различных конструкций

Круг		
Сплошной	Прерывистый и комбинированный	Композиционный
1,0	1,15	1,25

После несложного преобразования и решения формулы (2.30) относительно $n_3 S_{np} S_x$, учитывая, что $v_3 = \frac{\pi D_3 n_3}{1000}$, четвертое техническое ограничение примет вид

$$n_3^{0,5} S_{np}^{0,5} (1000 S_x)^{0,25} \leq \frac{Ra(60 \cdot 1000 v_k B_k)^{0,5} (1000 D_k)^{0,25}}{C_{Ra} (\pi D_3 k_{общ} d_{зep})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}}. \quad (2.31)$$

Ограничение, связанное с температурой шлифования

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования материалов, могут оказывать решающее влияние как на протекание самого процесса, так и на качество шлифованных поверхностей. Анализ исследований, проведенный многими авторами [9, 25, 30, 33 и др.], показы-

васт, что физико-механическое состояние поверхностного слоя шлифованных деталей определяется не только контактной температурой, а всем пространственно-временным температурным полем. Поэтому при решении задач, связанных с определением рациональных условий обработки, наличие технического ограничения по температуре, в качестве которой в первом приближении может использоваться температура, соответствующая точке A_{C_1} - аллотропического изменения обрабатываемого материала, является обязательным, но не достаточным условием. Нахождение области рациональных условий обработки (конструкции и характеристики круга, режима резания и т.д.), исключающих возможность возникновения структурно-фазовых превращений в поверхностном слое заготовок при шлифовании, предполагает использование результатов исследования кинетики тепловых процессов и метастабильных диаграмм состояния материалов.

Исходя из вышесказанного, должно выполняться условие

$$\theta_{\max} \leq \theta_{кр}, \quad (2.32)$$

где θ_{\max} и $\theta_{кр}$ - соответственно максимальная и критическая температуры в зоне контакта круга с заготовкой, °С.

Максимальную температуру в зоне контакта круга с заготовкой можно определить по формуле

$$\theta_{\max} = \theta_0 + \Delta\theta_{\max}, \quad (2.33)$$

где θ_0 - начальная температура поверхности заготовки, °С; $\Delta\theta_{\max}$ - максимальное приращение температуры поверхности заготовки в зоне контакта за счет тепла, поступающего в заготовку при шлифовании, °С.

Подставив формулу (2.33) в неравенство (2.32), получим техническое ограничение, связанное с температурой шлифования:

$$\Delta\theta_{\max} \leq \theta_{кр} - \theta_0. \quad (2.34)$$

Максимальное приращение температуры поверхности заготовки в зоне контакта можно определить по формуле, приведенной в работе [25]:

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{aL_{\kappa}}{\pi v_3}}, \quad (2.35)$$

где q - плотность теплового потока, Вт/м²; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); a - коэффициент температуропроводности, м²/с; L_{κ} - длина дуги контакта круга с заготовкой (деталью), м; v_3 - скорость вращения заготовки, м/с.

Независимо от используемой системы единиц физических величин (СИ или МКС) числовое значение приращения температуры одинаково, так как по размеру градус Цельсия равен градусу Кельвина.

При шлифовании заготовок плотность теплового потока может быть определена по следующей формуле:

$$q = \frac{N_{\text{эф}}}{F_{\kappa}} k_{\text{Q}} = \frac{N_{\text{эф}}}{L_{\kappa} \cdot B_{\kappa}} k_{\text{Q}}, \quad (2.36)$$

где q - плотность теплового потока, Вт/м²; $N_{\text{эф}}$ - эффективная мощность, Вт; F_{κ} - площадь контакта круга с заготовкой, м²; L_{κ} - длина дуги контакта круга и заготовки, м (формулы для определения L_{κ} при различных видах шлифования приведены в работе [14]); B_{κ} - высота шлифовального круга, м; k_{Q} - коэффициент, показывающий, какая доля выделившейся при шлифовании тепловой мощности поступила в заготовку; средние значения коэффициента k_{Q} для круглого наружного и внутреннего шлифования при обработке различных групп материалов приведены в табл. 2.5.

Учитывая, что мощность резания подсчитывается по эмпирической формуле (2.25), в которой значения D_3, B_{κ} задаются в мм, то в формулах (2.35) и (2.36) значения L_{κ} и B_{κ} также целесообразно задавать в мм, введя соответствующие переводные коэффициенты. Тогда формула

(2.35) после подстановки в нее формул (2.36) и (2.25) с учетом, что

$$v_3 = \frac{\pi D_3 n_3}{60 \cdot 1000}, \text{ после преобразования примет вид}$$

$$\Delta\theta = \frac{8,729 \cdot 10^7 C_N D_3^{0,45} n_3^{0,2} S_{np}^{0,7} S_x^{0,7} a^{0,5} k_Q^N k_1^N k_2^N k_3^\theta}{\lambda B_K^{0,75} L_K^{0,5}}, \quad (2.37)$$

где k_3^θ - коэффициент, учитывающий влияние конструкции шлифовального круга на изменение температуры в зоне контакта круга с деталью.

Т а б л и ц а 2.5

Средние значения коэффициента k_Q для круглого наружного и внутреннего шлифования при обработке различных групп материалов

Материал	Вид шлифования	
	Круглое наружное	Круглое внутреннее
Стали коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные	0,860	0,900
Сплавы: жаростойкие и жаропрочные на никелевой основе	0,825	0,875
титановые	0,835	0,885

При шлифовании заготовок кругами с прерывистой режущей поверхностью происходит существенное снижение максимальной температуры в зоне контакта по сравнению с температурой, имеющей место при шлифовании сплошными кругами. Это обусловлено, во-первых, уменьшением эффективной мощности, затрачиваемой на процесс резания, во-вторых, периодическим прерыванием поступающего в заготовку теплового потока и, в-третьих, отводом тепла из зоны резания смазывающе-охлаждающими элементами композиционных и комбинированных кругов благодаря их высокой теплопроводности. Как видно, в формуле (2.37) отсутствует коэффициент k_3^N (см. формулу 2.25), его

влияние на снижение температуры учитывает коэффициент k_3^θ . Значения коэффициента k_3^θ для случая шлифования заготовок кругами различных конструкций твердостью МЗ-СМ2 с применением СОЖ, подаваемой свободно падающей струей, приведены в табл. 2.6 [24].

Таблица 2.6

Средние значения коэффициента k_3^θ для случая шлифования заготовок кругами различных конструкций твердостью МЗ-СМ2 с использованием СОЖ, подаваемой свободно падающей струей

Круг		
Сплошной	Прерывистый и комбинированный	Композиционный
1,0	0,75-0,85	0,6-0,7
Примечание. Меньшие значения коэффициентов следует брать для более твердых кругов, а также при работе на высокопроизводительных режимах.		

Подставив формулу (2.37) в неравенство (2.34), предварительно выразив длину дуги контакта круга с заготовкой L_k для круглого наружного и внутреннего шлифования по формулам Е.Н. Маслова [14], после соответствующего преобразования и решения данного неравенства относительно $n_3 S_{np} S_x$ получим пятое техническое ограничение

$$n_3^{0,2} S_{np}^{0,7} (1000 S_x)^{0,45} \leq \frac{C_\theta (\theta_{kp} - \theta_0) \lambda B_k^{0,75} D_k^{0,25}}{D_s^{0,2} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta}, \quad (2.38)$$

где для круглого наружного шлифования $C_\theta = \frac{1,2328 \cdot 10^{-6}}{(D_k + D_s)^{0,25}}$, а для

круглого внутреннего $C_\theta = \frac{1,1105 \cdot 10^{-6}}{(D_s - D_k)^{0,25}}$.

Ограничения, связанные с результатами исследования кинетики тепловых процессов

Как уже отмечалось в 2.2.1, при механической обработке материалов скорость охлаждения обработанной поверхности зависит от скорости подачи СОЖ в зону резания и от скорости вращения заготовки.

При круглом шлифовании увеличение скорости вращения заготовки может привести как к увеличению, так и к снижению средней контактной температуры в зоне резания, либо не влиять на нее вовсе. Это обусловлено тем, что с увеличением скорости вращения заготовки, с одной стороны, возрастает плотность теплового потока в зоне контакта круга с заготовкой, а с другой стороны, уменьшается время контакта. В зависимости от того, какой из факторов будет доминировать (и будет ли доминировать вообще), возможны различные варианты изменения температуры. В справочной литературе по шлифованию [1, 10, 20] заданные диапазоны изменения скорости вращения заготовок для каждой группы материалов обусловлены требованиями, предъявляемыми к производительности, себестоимости и качеству обработки.

На операциях шлифования, так же как и на операциях точения, ограничения, обусловленные результатами исследования кинетики тепловых процессов, основаны на использовании диаграмм, связывающих метастабильные диаграммы состояния материалов со скоростью вращения заготовок. На рис. 2.4 и 2.5 приведены диаграммы, связывающие соответственно метастабильное состояние сталей 30ХГСН2А и ЭП517-Ш со скоростью вращения заготовок при круглом шлифовании. Исходя из этих диаграмм, производительная обработка материалов при гарантированном отсутствии структурных и фазовых изменений в поверхностном слое возможна в том случае, если выполняются условия

$$v_3 \geq v_{пр.наим} ; \quad (2.39)$$

$$v_3 \leq v_{пр.наиб} ; \quad (2.40)$$

где $v_{пр.наим}$ - наименьшая предельная допустимая скорость вращения заготовки, м/мин; $v_{пр.наиб}$ - наибольшая предельная допустимая скорость вращения заготовки, м/мин.

Решив неравенства (2.39) и (2.40) относительно n_3 , предварительно представив в них v_3 , как $\frac{\pi D_3 n_3}{1000}$, получим шестое и седьмое технические ограничения:

$$n_3 \geq \frac{1000v_{\text{пр.наим}}}{\pi D_3}; \quad (2.41)$$

$$n_3 \leq \frac{1000v_{\text{пр.наиб}}}{\pi D_3}. \quad (2.42)$$

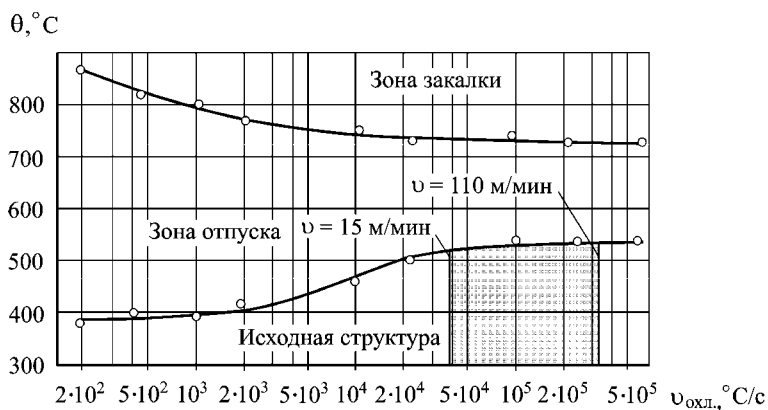


Рис. 2. 4. Диаграмма, связывающая метастабильное состояние стали 30XГСН2А со скоростью вращения заготовок при круглом шлифовании

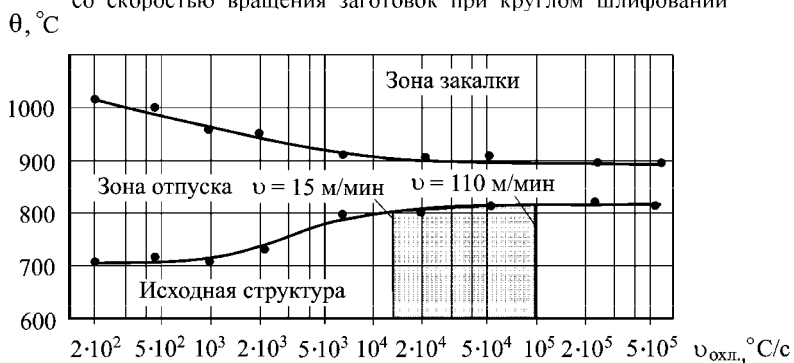


Рис. 2.5. Диаграмма, связывающая метастабильное состояние стали ЭП517-Ш со скоростью вращения заготовок при круглом шлифовании

Ограничения, связанные с кинематическими возможностями шлифовального станка

При круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовки частота ее вращения, продольная и поперечная подачи должны быть ограничены, соответственно, наибольшим и наименьшим числом оборотов шпинделя (планшайбы) передней бабки, наибольшей и наименьшей продольной и поперечной подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями выбранного станка, будут иметь вид:

- восьмое техническое ограничение

$$n_3 \geq n_{ct \min}, \quad (2.43)$$

где $n_{ct \min}$ - минимальная частота вращения шпинделя (планшайбы) передней бабки станка, об/мин;

- девятое техническое ограничение

$$n_3 \leq n_{ct \max}, \quad (2.44)$$

где $n_{ct \max}$ - максимальная частота вращения шпинделя (планшайбы) передней бабки станка, об/мин;

- десятое техническое ограничение

$$S_{np} \geq S_{np \ ct \ min}, \quad (2.45)$$

где $S_{np \ ct \ min}$ - минимальная продольная подача станка, мм/об;

- одиннадцатое техническое ограничение

$$S_{np} \leq S_{np \ ct \ max}, \quad (2.46)$$

где $S_{np \ ct \ max}$ - максимальная продольная подача станка, мм/об;

- двенадцатое техническое ограничение

$$1000S_x \geq 1000S_{x \ ct \ min}, \quad (2.47)$$

где $S_{x \ ct \ min}$ - минимальная поперечная подача станка, мм/ход;

- тринадцатое техническое ограничение

$$1000S_x \leq 1000S_{x \text{ см max}}, \quad (2.48)$$

где $S_{np \text{ см max}}$ - максимальная поперечная подача станка, мм/ход.

2.3. Построение и анализ математической модели для определения рациональных условий резания на окончательных операциях механической обработки заготовок

Выбранные и описанные выше технические ограничения, отражающие с определенной степенью точности в совокупности с целевой функцией физический процесс резания, позволяют построить математическую модель для определения рациональных условий обработки.

Математическую модель для определения рациональных условий резания на окончательных операциях механической обработки цилиндрических поверхностей целесообразно представить в виде двух независимых модулей, описывающих процессы точения и растачивания и круглого наружного и внутреннего шлифования заготовок. Учитывая то, что целевая функция и технические ограничения для каждого из указанных выше видов обработки приводятся к линейному виду, математические модели, описывающие эти процессы, могут быть получены в виде линейной (целевой) функции и системы линейных ограничений-неравенств. Поэтому определение рациональных условий обработки сводится к задаче линейного программирования, решаемой посредством симплекс-метода или при помощи графического метода [6-8, 11]. В том случае, если уравнения целевой функции и технических ограничений или хотя бы одно из них представляют собой полином n -го порядка, то решение задачи осуществляется итерационными (поисковыми) методами.

Аналитическое или графическое решение полученных систем линейных уравнений для исследуемых процессов механической обработ-

ки, при заданных определяющих и управляемых параметрах, позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные режимы резания для операций точения и растачивания и круглого наружного и внутреннего шлифования, оценить производительность рассматриваемого процесса и обоснованно выбрать наиболее выгоднейшие вид и условия обработки. А это в свою очередь позволит стабильно обеспечивать технические требования, предъявляемые к качеству обработки на заданной операции.

2.3.1. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы продольного точения и растачивания заготовок, прологарифмируем зависимости (2.4), (2.6), (2.8)-(2.10), (2.12), (2.15)-(2.22) и (2.1), которые после введения обозначений будут иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + y_\nu x_2 + x_\nu x_3 \leq b_1; \\ (1 + z_{P_z})x_1 + y_{P_z}x_2 + x_{P_z}x_3 \leq b_2; \\ z_{P_y}x_1 + y_{P_y}x_2 + x_{P_y}x_3 \leq b_3; \\ x_2 + x x_3 \leq b_4; \\ z_\theta x_1 + y_\theta x_2 + x_\theta x_3 \leq b_5; \\ x_1 \geq b_6; \\ x_1 \leq b_7; \\ x_1 \geq b_8; \\ x_1 \leq b_9; \\ x_2 \geq b_{10}; \\ x_2 \leq b_{11}; \\ x_3 \geq b_{12}; \\ x_3 \leq b_{13}; \end{array} \right. \quad (2.49)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2 - x_3,$$

где

$$x_1 = \ln n_s; \quad x_2 = \ln(100S); \quad x_3 = \ln(100t_p);$$

$$b_1 = \ln \frac{318 C'_\nu k_\nu \cdot 100^{(x_\nu + y_\nu)}}{T_p^m D_s};$$

$$b_2 = \ln \frac{N\eta \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 318^{(1+z_{P_z})} \cdot 100^{(x_{P_z} + y_{P_z})}}{C_{P_z} D_s^{(1+z_{P_z})}};$$

$$b_3^I = \ln \frac{318^{z_{P_y}} \cdot 100^{(x_{P_y} + y_{P_y})} k_3 \delta_p}{2C_{P_y} D_s^{z_{P_y}} \left(\left(\frac{1}{j_{3ae}} + \frac{1}{j_{cm}} + \frac{1}{j_p} \right) \right)};$$

$$b_3^{II} = \ln \frac{318^{z_{P_y}} 100^{(x_{P_y} + y_{P_y})} \left[k_3 \delta_p - 2 \left(\Delta_{\theta, p} - \Delta_{uz, p} \right) \right]}{2 C_{P_y} D_3^{z_{P_y}} \left[\frac{1}{j_{3a\epsilon}} + \frac{1}{j_{cm}} + \frac{1}{j_p} \right]};$$

$$b_4 = \ln \frac{C_s R z^y r^n (90 + \gamma)^{0,15} \alpha^{0,25} \cdot 100^{(x+1)}}{(\varphi \varphi_1)^z h_3^{0,2}} k_s;$$

$$b_5 = \ln \frac{\theta_{xp} \cdot 318^{z_\theta} \cdot 100^{(x_\theta + y_\theta)}}{C_\theta D_3^{z_\theta}};$$

$$b_6 = \ln \frac{1000 v_{np, \text{наим}}}{\pi D_3}; \quad b_7 = \ln \frac{1000 v_{np, \text{наиб}}}{\pi D_3}; \quad b_8 = \ln n_{cm \min};$$

$$b_9 = \ln n_{cm \max}; \quad b_{10} = \ln(100 S_{cm \min});$$

$$b_{11} = \ln(100 S_{cm \max}); \quad b_{12} = \ln(100 t_{p \min}); \quad b_{13} = \ln(100 A);$$

$$f_0 = \ln f_m; \quad c_0 = \ln(10000 l_m A).$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (2.49) и линейная функция f_0 представляют собой математическую модель определения рациональных режимов резания при продольном точении и растачивании заготовок одним резцом.

Решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (2.49) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи осуществляется в двухмерном пространстве. Для проведения преобразований выразим x_1 из ограничения-неравенства, связанного с режущими свойствами инструмента, которые в значительной мере определяются его стойкостью:

$$x_1 = b_1 - y_v x_2 - x_v x_3,$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (2.49). При токарной обработке ограничение, связанное с режущими свойствами инструмента, является одним из основных ограничений. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных, x_2 и x_3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} (y_{P_z} - y_v - z_{P_z} y_v) x_2 + (x_{P_z} - x_v - z_{P_z} x_v) x_3 \leq b_2 - (1 + z_{P_z}) b_1; \\ (y_{P_y} - z_{P_y} y_v) x_2 + (x_{P_y} - z_{P_y} x_v) x_3 \leq b_3 - z_{P_y} b_1; \\ x_2 + x x_3 \leq b_4; \\ (y_\theta - z_\theta y_v) x_2 + (x_\theta - z_\theta x_v) x_3 \leq b_5 - z_\theta b_1; \\ -y_v x_2 - x_v x_3 \geq b_6 - b_1; \\ -y_v x_2 - x_v x_3 \leq b_7 - b_1; \\ -y_v x_2 - x_v x_3 \geq b_8 - b_1; \\ -y_v x_2 - x_v x_3 \leq b_9 - b_1; \\ x_2 \geq b_{10}; \\ x_2 \leq b_{11}; \\ x_3 \geq b_{12}; \\ x_3 \leq b_{13}; \end{array} \right. \quad (2.50)$$

$$f_0 = c_0 - b_1 - [(1 - y_v) x_2 + (1 - x_v) x_3].$$

Так как в условиях конкретной задачи $c_0 - b_1$ является величиной постоянной, то целевая функция f_0 достигнет минимального значения в том случае, когда в уравнении целевой функции достигнет максимального значения величина, заключенная в квадратные скобки, то есть неизвестные x_2 и x_3 примут максимально допустимые значения, удовлетворяющие системе ограничений (2.50).

В практике нередко встречаются случаи, когда система ограничений-неравенств является несовместной. Поэтому, прежде чем присту-

пить к решению задачи, необходимо привести систему линейных ограничений-неравенств к совместному виду. Для этого необходимо откорректировать исходные данные и технические ограничения [16].

2.3.2. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процессы круглого наружного и внутреннего шлифования методом продольной подачи, прологарифмируем зависимости (2.23), (2.26), (2.29), (2.31), (2.38), (2.41)-(2.48) и (2.2), которые после введения обозначений будут иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq b_1; \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_2; \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_3; \\ 0,5x_1 + 0,5x_2 + 0,25x_3 \leq b_4; \\ 0,2x_1 + 0,7x_2 + 0,45x_3 \leq b_5; \\ x_1 \geq b_6; \\ x_1 \leq b_7; \\ x_1 \geq b_8; \\ x_1 \leq b_9; \\ x_2 \geq b_{10}; \\ x_2 \leq b_{11}; \\ x_3 \geq b_{12}; \\ x_3 \leq b_{13}; \end{array} \right. \quad (2.51)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2 - x_3.$$

где $x_1 = \ln n_s$; $x_2 = \ln S_{np}$; $x_3 = \ln(1000S_x)$;

$$b_1 = \ln \frac{C_m \cdot 318000^2 B_\kappa^2}{T_\kappa D_3^{q_m}} k_1^T k_2^T k_3^T ; \quad b_2 = \ln \frac{318000^{0,7} N_{\text{эошоб}} \eta}{C_N D_3^{0,95} B_\kappa^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N} ;$$

$$b_3 = \ln \frac{318000^{0,7} \nu_\kappa a_n \delta_p}{1000 C_N \left(\frac{1}{j_{\text{заэ}}} + \frac{1}{j_{\text{см}}} + \frac{1}{j_{\text{онп}}} \right) D_3^{0,95} B_\kappa^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N k_{\text{иу}}}$$

$$b_4 = \ln \frac{Ra(60 \cdot 1000 \nu_\kappa B_\kappa)^{0,5} (1000 D_\kappa)^{0,25}}{C_{Ra} (\pi D_3 k_{\text{обш}} d_{\text{зеп}})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}}$$

$$b_5 = \ln \frac{C_\theta (\theta_{\text{кр}} - \theta_0) \lambda B_\kappa^{0,75} D_\kappa^{0,25}}{D_3^{0,2} a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta}$$

$$b_6 = \ln \frac{1000 \nu_{\text{нр.наим}}}{\pi D_3} ; \quad b_7 = \ln \frac{1000 \nu_{\text{нр.наиб}}}{\pi D_3} ;$$

$$b_8 = \ln n_{\text{см min}} ; \quad b_9 = \ln n_{\text{см max}} ; \quad b_{10} = \ln S_{\text{нр см min}} ;$$

$$b_{11} = \ln S_{\text{нр см max}} ; \quad b_{12} = \ln 1000 S_{\text{x см min}} ; \quad b_{13} = \ln 1000 S_{\text{x см max}} ;$$

$$f_0 = \ln f_{\text{иу}} ; \quad c_0 = \ln(1000 l_{\text{иу}} A).$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (2.51) и линейная функция f_0 представляют собой математическую модель определения рациональных условий резания на операциях круглого наружного и внутреннего шлифования, осуществляемого методом продольной подачи одним шлифовальным кругом.

По аналогии с вышеизложенным решение задачи может быть упрощено за счет приведения системы (2.51) с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными, в результате чего аналитическое и графическое решение задачи также осуществляется в двухмерном простран-

стве. Для проведения преобразований выразим x_1 из ограничения-неравенства, связанного с температурой шлифования:

$$x_1 = 5b_5 - 3,5x_2 - 2,25x_3,$$

и подставим его значение во все остальные неравенства системы (2.51). Выбор этого ограничения-неравенства обусловлен тем, что при шлифовании именно температура в зоне контакта круга с заготовкой наиболее часто является основным ограничивающим фактором, не позволяющим вести формообразование поверхностей на более производительных режимах из-за возможности образования структурных и фазовых изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. В результате получим новую систему, содержащую два неизвестных x_2 и x_3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} -5x_2 - 3x_3 \leq b_1 - 10b_5; \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_2 - 3,5b_5; \\ -1,75x_2 - 0,875x_3 \leq b_3 - 3,5b_5; \\ -1,25x_2 - 0,875x_3 \leq b_4 - 2,5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \geq b_6 - 5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \leq b_7 - 5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \geq b_8 - 5b_5; \\ -3,5x_2 - 2,25x_3 \leq b_9 - 5b_5; \\ x_2 \geq b_{10}; \\ x_2 \leq b_{11}; \\ x_3 \geq b_{12}; \\ x_3 \leq b_{13}; \end{array} \right. \quad (2.52)$$

$$f_0 = c_0 - 5b_5 + 2,5x_2 + 1,25x_3.$$

Так как в условиях конкретной задачи $c_0 - b_5$ является величиной постоянной, то f_0 достигнет минимального значения в том случае, ко-

гда примут минимально допустимые значения неизвестные x_2 и x_3 , удовлетворяющие системе ограничений (2.52).

Следует отметить, что математические модели, разработанные для определения рациональных условий обработки на операциях чистового точения и растачивания и круглого наружного и внутреннего шлифования цилиндрических поверхностей, получаемых методом продольной подачи инструмента, могут быть использованы также для определения рациональных условий обработки конических поверхностей с небольшим углом конусности, то есть когда изменение скорости вращения заготовки не превышает 15 %.

2.4. Создание рабочих программ

На основании полученных математических моделей разработаны алгоритмы и написаны на языке Delphi программы для расчета рациональных режимов резания на операциях чистового точения и растачивании заготовок, а также круглого наружного и внутреннего шлифования. Совместное использование этих программ, представляющих собой отдельные модули, позволяет осуществить структурно-параметрическую оптимизацию при проектировании окончательных операций технологических процессов изготовления деталей. Данные программы с успехом могут быть использованы также для осуществления параметрической оптимизации на соответствующих операциях технологического процесса. Программы имеют сходный интерфейс и принципы работы. Основные процедуры по решению системы уравнений-неравенств и нахождению оптимального решения практически идентичны для обеих программ. Каждая из программ сделана в двух реализациях с использованием двух СУБД:

- для локального использования – BDE (Borland DataBase Engine);
- для многопользовательского сетевого использования – InterBase

6.5.

В программах реализован редактор базы данных, для возможности добавления новых станков, марок и характеристик инструмента, материалов и т.д.

2.4.1. Программа для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании заготовок

Решение задачи по определению рациональных условий обработки при точении и растачивании осуществляется на ЭВМ посредством симплекс-метода, т.е. совместно решаются все возможные пары линейных неравенств. Каждое ограничение описывает линию на плоскости. Совместное решение системы из двух таких уравнений дает точку пересечения этих двух линий. Таким образом, получают точки всех вершин области оптимальных решений. Далее из этого множества точек, удовлетворяющих всем ограничениям, выбирается точка, соответствующая минимуму целевой функции.

Блок-схема основного модуля программы приведена на рис. 2.6.

В программе можно выделить две основные части: ввод исходных данных, просмотр и анализ полученного решения.

Исходные параметры разделены на три логические группы:

- параметры, относящиеся к станку, на котором производится обработка. В этом блоке задаётся, кроме того, вид обработки (обточка или расточка) и отображаются коэффициенты, определяющие скорость резания;

- параметры, относящиеся к резцу, при помощи которого ведётся обработка. В данном блоке выбирается материал резца, геометрические параметры его режущей части и державки;

- параметры, относящиеся к обрабатываемой заготовке. Здесь указываются материал заготовки, ее состояние и геометрические параметры, требования к качеству обработки, вид охлаждения, отображаются коэффициенты, определяющие температуру в зоне резания.

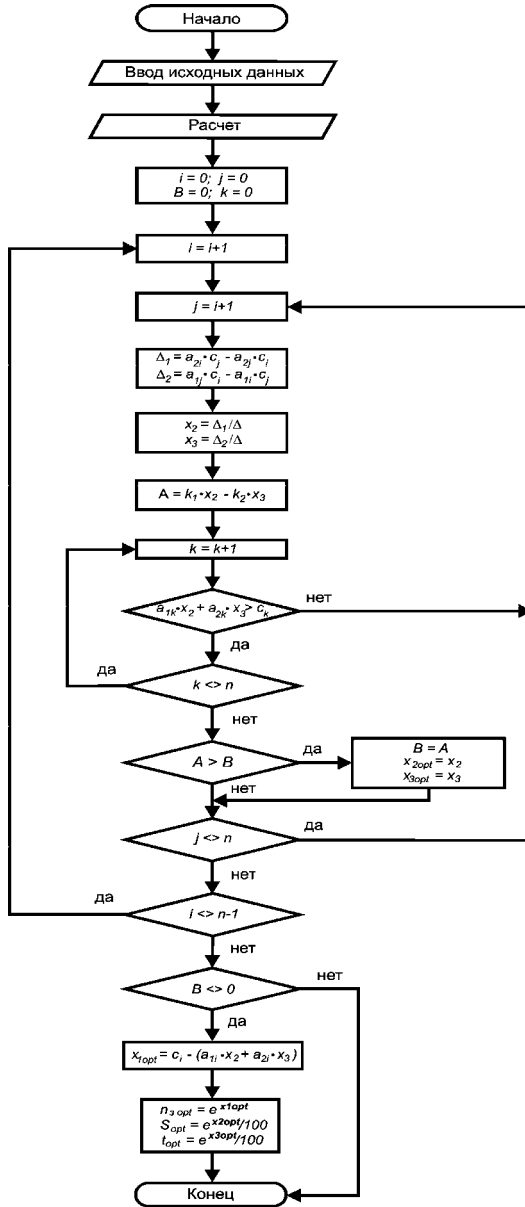


Рис. 2.6. Блок-схема основного модуля программы для определения

рациональных условий обработки при точении и растачивании

Ввод исходных данных существенно упрощен за счет автоматической загрузки из созданной базы данных различных параметров и коэффициентов, необходимых для решения задачи. В созданную базу данных внесены параметры и коэффициенты, позволяющие определить рациональные условия резания при обработке различных сталей, а также жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов. Многие коэффициенты, например, используемые в эмпирических зависимостях для расчета температуры и шероховатости поверхности, были получены авторами пособия. Ручной ввод значений сведён к минимуму. После ввода всех входных параметров осуществляется расчёт коэффициентов системы уравнений, которые записываются в таблицу (рис. 2.7). Напротив каждой строки таблицы указано, к какому ограничению относятся данные коэффициенты, а также представлен цвет, которым будет отображаться ограничивающая прямая соответствующего ограничения. Есть возможность учитывать не все ограничения, а лишь те, которые необходимы.

По результатам аналитического решения строится его графическая интерпретация. Каждое техническое ограничение-неравенство представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы ограничений-неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений, внутри которого любая точка удовлетворяет всем неравенствам. Из этой области выбираются оптимальные параметры, определяющие режимы резания.

Пользователю предоставлены удобные средства для просмотра графического решения (перемещение области, изменение масштаба, мерцание выделенной прямой ограничения и т.д.). Графический метод дает наглядное представление о влиянии технических ограничений на режимы обработки, позволяет проанализировать, за счет чего в данном конкретном случае можно увеличить производительность процесса.

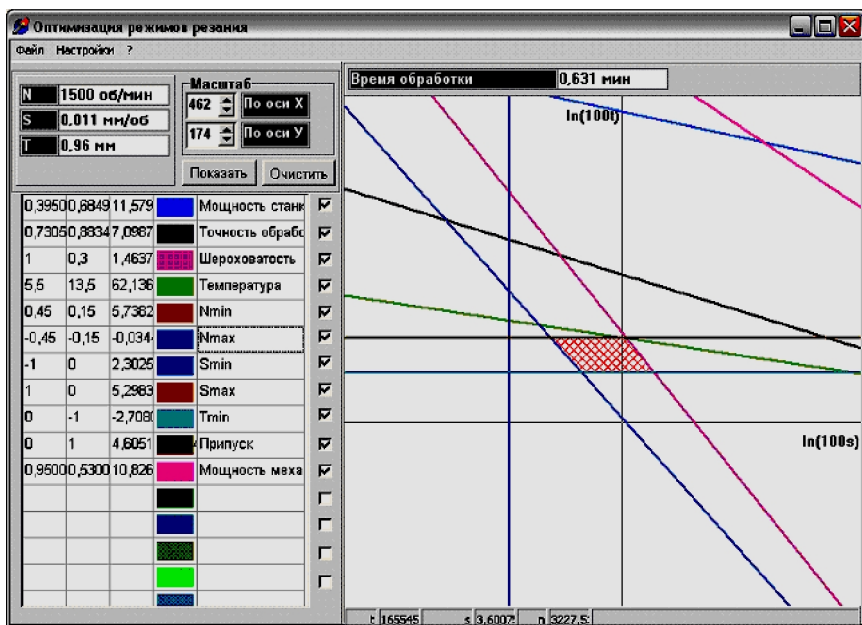


Рис. 2.7. Главная форма программы (точение)

Внешний вид интерфейса программы представлен на рис. 2.7-2.10.

2.4.2. Программа для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании

Блок-схема основного модуля программы по определению рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании (рис. 2.11) практически ни чем не отличается от блок-схемы, описанной в пункте 2.4.1.

Данные для расчёта

Применить

Станок | Резец | Заготовка

Характеристики станка

Марка	Вид обработки
ТПК125В	Обточка
N мин., об/мин	10,00
N макс., об/мин	3000,00
S мин., мм/об	0,001
S макс., мм/об	2,000
Наиб. усилие, Н	1000,00
Мощность дв., кВт	175,00
Высота центров, мм	120,00

Скорость резания

Cv	50,00
Vv	0,45
Xv	0,15
t	0,2ф

Рис. 2.8. Ввод исходных данных в блок «станок» при расчете рациональных режимов резания при точении

Данные для расчёта

Применить

Станок | Резец | Заготовка

Основные параметры

Материал резца	Поправочные коэффициенты	
ВК6М	Гл. угол в плане	Радиус
E, МПа	90	0,5
Прямоугольная	KfPx	KfPy
H, мм	1,15	0,50
B, мм	KfPz	KfV
D, мм	0,90	0,75
L, мм	КлPx	КлPy
T, мин	15	1,00
	КлPz	КлPz
	1,00	1,00
	Вспом. угол в плане	Gamma
	15	10
		Alfa
		15

Рис. 2.9. Ввод исходных данных в блок «резец» при расчете рациональных режимов резания при точении

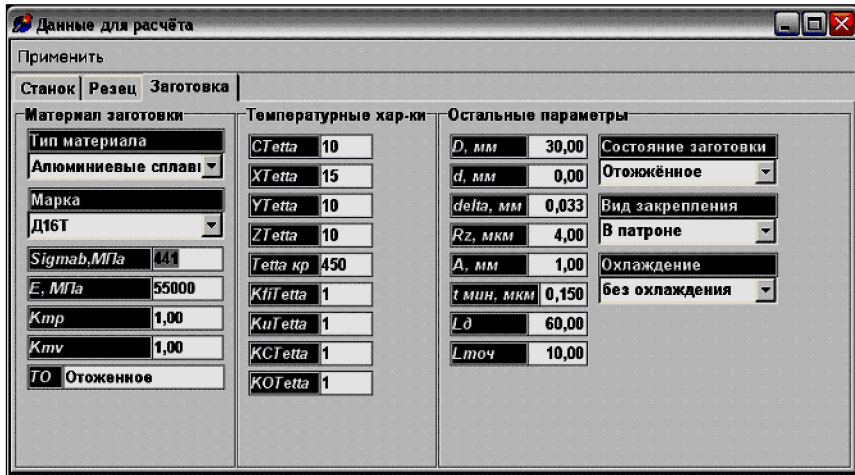


Рис. 2.10. Ввод исходных данных в блок «заготовка» при расчете рациональных режимов резания при точении

В этой программе также можно выделить две основные части – ввод исходных данных и просмотр результатов расчета.

Исходные параметры разделены на три логические группы:

- параметры, относящиеся к станку, на котором производится обработка. В этом же блоке программы задаются также вид шлифования и тип операции;

- параметры, относящиеся к шлифовальному кругу, который используется для проведения обработки. В данном блоке выбирается конструкция круга и задаются марка абразива, зернистость, твердость круга и его геометрические параметры;

- параметры, относящиеся к заготовке: тип материала и его марка, состояние, теплофизические свойства, вид охлаждения, вид закрепления, геометрические параметры, требования к качеству обработки.

Многие коэффициенты, используемые в эмпирических зависимостях по определению стойкости круга, эффективной мощности, затрачиваемой на процесс резания, температуры в зоне контакта

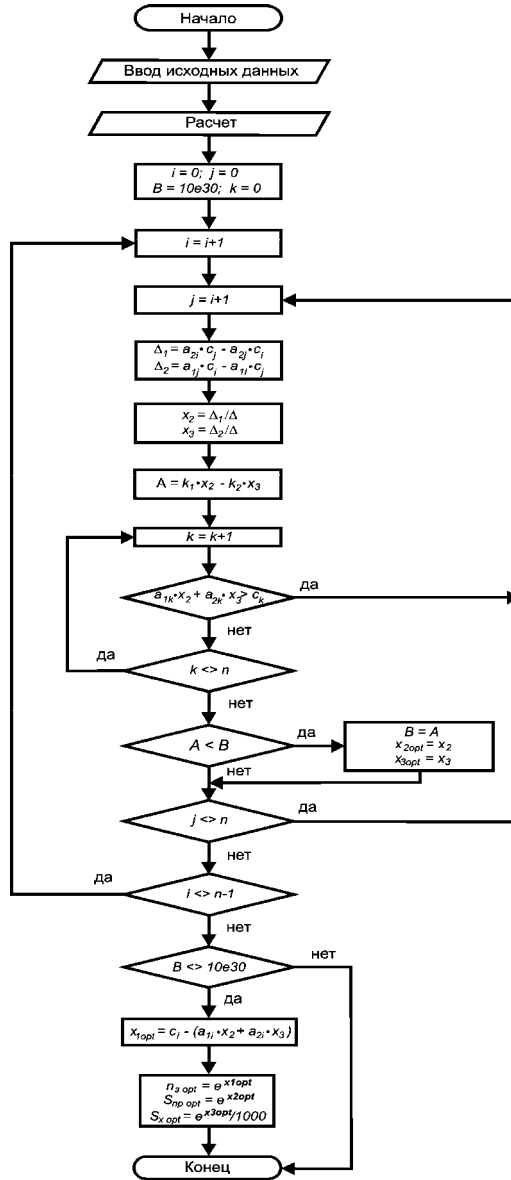


Рис. 2.11. Блок-схема основного модуля программы для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем

шлифовании

круга с заготовкой и шероховатости поверхности, были введены авто-рами впервые.

2.5. Примеры определения рациональных условий формообразования на окончательных операциях механической обработки

Созданный метод и разработанные программы расчета были использованы для определения рационального вида и условий обработки на окончательной операции формообразования цилиндрической поверхности штока (рис. 2.12) телескопической стойки передней подвески автомобиля ВАЗ 2110, изготовленного из высокопрочной стали 30ХГСН2А. Механические свойства этой стали после термообработки были следующие: $\sigma_e = 1750 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = \quad = 1400 \text{ МПа}$, твердость – 47 HRC₉. Общая длина штока равнялась 406 мм. Диаметр, длина и шероховатость обрабатываемой поверхности составляли соответственно $\varnothing 21^{+0,21} \text{ мм}$, $l = 330 \text{ мм}$, $Ra = \quad = 0,4 \text{ мкм}$.

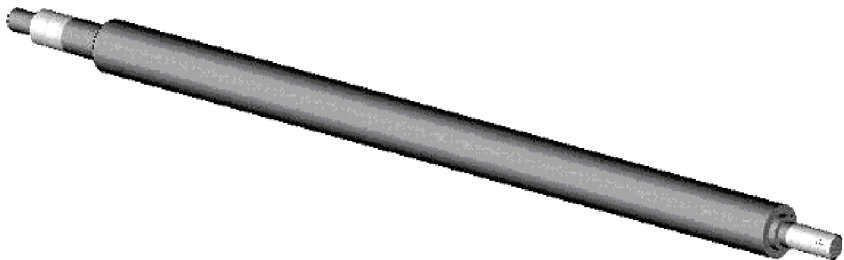


Рис. 2.12. Шток телескопической стойки передней подвески автомобиля ВАЗ 2110

Вышеуказанные технические требования, предъявляемые к точности и шероховатости поверхности, могут быть обеспечены как на операции тонкого точения, так и круглого наружного шлифования. Пред-

полагалось, что операция тонкого точения цилиндрической поверхности штока в условиях производства будет осуществляться на универсальном токарно-винторезном станке 1В616П при закреплении заготовки в патроне с поджатием центром задней бабки резцом с пластиной из твердого сплава группы ТК. Операция шлифования этой же поверхности будет производиться на круглошлифовальном станке модели ЗБ153 при точно таком же закреплении заготовки кругом из электрокорунда.

Определение рациональных условий резания для каждого вида обработки осуществлялось путем варьирования управляющих параметров (марки инструментального материала или характеристики круга, конструкции и геометрии инструмента, СОТС и т.д.).

Проведенные расчеты показали, что при точении цилиндрической поверхности штока твердосплавным режущим инструментом невозможно обеспечить заданные технические требования по шероховатости, поэтому для обработки этой поверхности используется процесс шлифования, который следует вести абразивным кругом со сплошной рабочей поверхностью на режиме: $n_s = 150$ об/мин, $S_{np} = 5$ мм/об, $S_x = 0,012$ мм/ход. Результаты расчета показаны на рис. 2.13.

На рис. 2.14-2.16 показан внешний вид интерфейса для ввода исходных данных. Использование кругов с прерывистой режущей поверхностью на данной операции невозможно, так как требования к шероховатости поверхности при такой длине заготовки – достаточно жесткие, а данные круги являются источником дополнительного динамического воздействия на систему СПИД.

На рис. 2.17 представлен фасонный валик, изготовленный из алюминиевого сплава Д16Т. Для формообразования точением всех поверхностей этого валика на основе использования соответствующей программы были определены наивыгоднейшие условия

Данные для расчёта

Станок | Абразивный круг | Заготовка

Конструкция круга
Сплошной

Геометрические параметры
Вк, мм: 40
Dк, мм: 400

Характеристики круга
Марка абразива: Электрокорунд белый
Зернистость: 0,12
Твердость: М3

Поправочные коэффициенты

K1T: 0,9	K1N: 0,9	K3tetta: 1	mra: -0,024
K2T: 0,67	K2N: 1,1	адс: 0,125	kq: 0,86
K3T: 1	K3N: 1	Cra: 705	

Рис. 2.15. Ввод исходных данных в блок «абразивный круг» при расчете рациональных режимов резания при круглом наружном шлифовании

Данные для расчёта

Станок | Абразивный круг | Заготовка

Материал
Тип материала: Сталь
Марка: Э0ХГСН2А
Sig σ b, МПа: 1167
E, МПа: 196200
 λ mbda, Вт/(м*К): 20,93
 ν , м³/с: 3,12E-6
TO: 30

Вид закрепления
В центрах

Состояние заготовки
Отожженное

Dз, мм: 21	Tetta_кр, °C: 450
dз, мм: 0	A, мм: 0,15
lш, мм: 330	lз, мм: 330
lопр, мм: 20	n: 5
dопр, мм: 20	delta, мм: 0,21
Eопр, МПа: 200000	Ra, мкм: 0,4
T, мин: 15	

Рис. 2.16. Ввод исходных данных в блок «заготовка» при расчете рациональных режимов резания при круглом наружном шлифовании

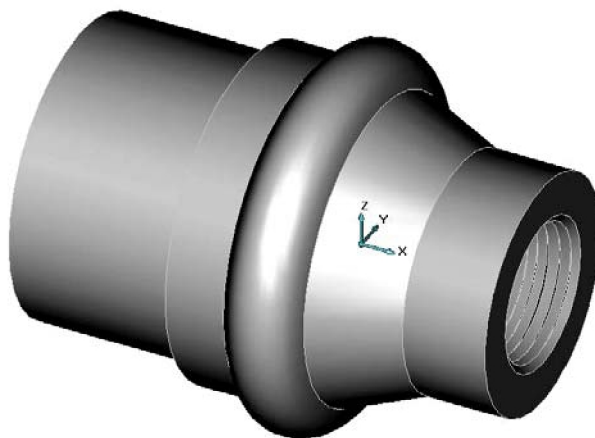


Рис. 2.17. Фасонный валик

обработки. На рис. 2.7-2.10 приведены результаты расчета и блоки ввода исходных данных для поверхности $\varnothing 30^{+0,033}$ мм длиной $l = 10$ мм. После обработки шероховатость этой поверхности не должна превышать $Rz = 4$ мкм. Заданные требования к качеству обработки могут быть обеспечены при $n = 1500$ об/мин, $S = 0,011$ мм/об и глубине t не более 0,96 мм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяются удельные затраты энергии?
2. Что такое скорость процесса?
3. Что такое скоростная зона?
4. Что такое энергетический уровень?
5. Как определяются скоростные зоны?
6. Как определяются энергетические уровни?
7. Каким образом можно объективно сравнить технологические процессы?
8. Какая оптимизация называется параметрической?
9. Какая оптимизация называется структурной?
10. Какая оптимизация называется структурно-параметрической?
11. Чем отличаются параметрическая, структурная и структурно-параметрическая оптимизации?
12. Объяснить, что представляет собой математическая модель для определения рациональных условий обработки?
13. Что называется целевой функцией?
14. Что понимается под техническими ограничениями?
15. В каком случае задача по определению рациональных условий обработки может быть приведена к задаче линейного программирования?
16. Каким методом может быть решена задача линейного программирования?
17. Какая оптимизация называется детерминированной?
18. Что понимается под кинетикой теплового процесса на операциях механической обработки?
19. Дать определение метастабильной диаграмме состояния материалов.
20. Какие параметры относятся к определяющим?
21. Какие параметры относятся к управляемым?

22. Какие параметры относятся к возмущающим?

23. Какие параметры являются исходными при определении рациональных условий обработки при точении и растачивании?

24. Какие параметры являются исходными при определении рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании?

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Задача линейного программирования – заключается в нахождении r переменных X_1, X_2, \dots, X_r , минимизирующих данную линейную функцию (целевую функцию)

$$z = F(X_1, X_2, \dots, X_r) \equiv C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_r X_r$$

(или максимизирующую $-z$) при линейных ограничениях-равенствах

$$a_{i1} X_1 + a_{i2} X_2 + \dots + a_{ir} X_r = A_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

и линейных ограничениях-неравенствах

$$A_{j1} X_1 + A_{j2} X_2 + \dots + A_{jr} X_r \geq B_j \quad (j = 1, 2, \dots, m).$$

Кинетика тепловых процессов при механической обработке – изменение температуры во времени и пространстве, включающем заготовку, инструмент, стружку, приспособление и т.д.

Коэффициент использования материала – отношение объема (массы) готовой детали к объему (массе) заготовки.

Линейное программирование – раздел математики, в котором изучаются методы нахождения минимума или максимума линейной функции конечного числа переменных при условии, что переменные удовлетворяют конечному числу дополнительных условий (ограничений), имеющих вид линейных уравнений или линейных неравенств.

Математическая модель для определения рациональных условий резания – совокупность уравнения целевой функции и технических ограничений, представленных в виде системы ограничений-неравенств.

Метастабильная диаграмма состояния материала – диаграмма состояния, определяющая образование различных структур материала в зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения заготовки.

Ограничения-неравенства – неравенства, связывающие параметры режима резания с параметрами, определяющими качество обработ-

ки, функциональными параметрами и кинематическими возможностями станка.

Оптимизация – процесс выбора наилучшего варианта из возможных или приведения системы в наилучшее (оптимальное) состояние.

Оптимизация процесса механической обработки в детерминированной постановке – не учитывается действие систематических и случайных возмущающих параметров.

Параметрическая оптимизация – расчет оптимальных параметров технологического процесса или операции (перехода) при заданной структуре с позиции некоторого технологического критерия, т.е. определение таких значений параметров x , при которых некоторая функция $F(x)$, называемая целевой, или функцией эффективности, принимает экстремальное значение.

Производительность процесса – объем припуска, снятого в единицу времени.

Рациональные условия формообразования (резания, обработки) – параметры обработки, лежащие в допустимой области, близкие к оптимальным, но не равные им, например, в связи со ступенчатым изменением частот оборотов и величин подач станка.

Симплекс-метод – наиболее распространенный метод решения задач линейного программирования, позволяющий найти крайнюю точку допустимой области (или вершину многогранника) и определить, является ли она точкой экстремума целевой функции. Если нет, то обеспечивается переход в соседнюю вершину, где значение функции цели больше (или меньше) предыдущего. Тем самым делается шаг, приближающий решение. Решение задачи находится за конечное число шагов или признается несуществующим (например, в случае несовместимости ограничений задачи).

Скоростная зона – область достижимых скоростей обработки технологического процесса.

Скорость процесса – скорость относительного перемещения заготовки и инструмента.

Структурная оптимизация – выбор наилучшего варианта технологического маршрута обработки или последовательности и количества переходов при проектировании операций технологического процесса.

Структурно-параметрическая оптимизация – выбор наивыгоднейшего варианта технологического маршрута формообразования заготовки, последовательности переходов и оптимальных параметров обработки на операциях (переходах).

Удельный расход энергии – количество энергии, затрачиваемой на съем единицы объема припуска.

Целевая функция – уравнение, связывающее параметры режима резания с критерием оптимальности.

Энергетический уровень – уровень удельных затрат энергии, необходимый для ослабления или нарушения сил связи атомов или молекул материала заготовки.

Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
2. Автоматизация машиностроения: Учебник для втузов / Н.М. Капустин, Н.П. Дьяконова, П.М. Кузнецов; Под ред. Н.М. Капустина. М.: Высшая школа, 2002. 223 с.
3. Анферов М.А. Метод структурной оптимизации технологических операций на многопозиционных станках // Оптимизация процессов обработки конструкционных материалов: Межвуз. тематич. науч. сб. Уфа, 1996. С. 73-79.
4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
5. Богомолов Н.И. Исследование прочности абразивных зерен в процессе микрорезания // Заводская лаборатория. 1966. № 3. С. 353–354.
6. Горанский Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин. Минск: Госиздательство БССР, 1963. 192 с.
7. Горанский Г.К., Владимиров Е.В., Ламбин Л.Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1976.
8. Горанский Г.К., Кочуров В.А., Франковская Р.П. и др. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. 240 с.
9. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 128 с.
10. Кащук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. М.: Машиностроение, 1988. 480 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. 832 с.
12. Леонов С.Л. Структурная оптимизация процессов механической обработки // Известия ТАИ. Барнаул, 1997. Вып. 1. С. 48–50.
13. Лепилин В.И. Режимы резания авиационных материалов при точении: Учебное пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2000. 128 с.
14. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
15. Медведев Л.П. Производительность и точность обработки на токарных станках в связи с их жесткостью // Труды Всесоюз. межвуз. конф. Обработываемость жаропрочных и титановых сплавов. Куйбышев, 1962. С. 104–117.
16. Назначение режимов резания конструкционных материалов с применением

ЭВМ: Метод. указания / Моск. авиац. ин-г; Сост. А.Д. Чубаров, В.Н. Ботяшин. М., 1979. 48 с.

17. Носов Н.В., Кравченко Б.А. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. М.: Машиностроение-1», 2003. 257 с.

18. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.

19. Попов С.А. Шлифовальные работы. М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 1999. 383 с.

20. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина и др.; Под общ. ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

21. Проектирование технологических процессов в машиностроении: Учебное пособие для вузов /И.П. Филонов, Г.Я. Беляев, Л.М. Кожуро и др.; Под общ. ред. И.П. Филонова. Минск: УП «Технопринт», 2003. 910 с.

22. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Зайцев и др. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.

23. Рьжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.

24. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Определение рациональных условий обработки при производстве деталей ГТД. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2002. 152 с.

25. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.

26. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, 1987. 846 с.

27. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.

28. Старков В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1984. 120 с.

29. Технология машиностроения: В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: Учеб. пособ. для вузов /Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин и др.; Под ред. С.Л. Мурашкина. М.: Высш. шк., 2005. 278 с.

30. Урьевский Ф.П. Влияние параметров термического цикла на формирование свойств поверхностного слоя при шлифовании титановых сплавов и закаленных сталей // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб. Куйбышев, 1981. С. 71–78.

31. Швец В.В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1967. 67 с.

32. Якобс Г.Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

33. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 184 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	5
1.1. Классификация технологических процессов по их возможностям и перспективам совершенствования.....	5
1.1.1. Удельный расход энергии.....	5
1.1.2. Скорость процесса.....	9
1.1.3. Производительность процесса.....	11
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОКОНЧАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК	24
2.1. Построение структурной модели определения рациональных условий обработки цилиндрических и конических поверхностей на окончательных операциях изготовления деталей.....	25
2.2. Выбор целевой функции и технических ограничений.....	28
2.2.1. Выбор технических ограничений при продольном точении и растачивании заготовок.....	31
2.2.2. Выбор технических ограничений при круглом наружном и внутреннем шлифовании заготовок методом продольной подачи.....	41
2.3. Построение и анализ математической модели для определения рациональных условий резания на окончательных операциях механической обработки заготовок.....	57
2.3.1. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании.....	58
2.3.2. Математическая модель для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании.....	62
2.4. Создание рабочих программ.....	65
2.4.1. Программа для определения рациональных условий обработки при точении и растачивании заготовок.....	66
2.4.2. Программа для определения рациональных условий обработки при круглом наружном и внутреннем шлифовании.....	69
2.5. Примеры определения рациональных условий формообразования на окончательных операциях механической обработки.....	73
Контрольные вопросы	78
Основные понятия	80
Список литературы	83

Учебное издание

*Скуратов Дмитрий Леонидович,
Трусов Владимир Николаевич,
Ласточкин Дмитрий Анатольевич*

**ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Технический редактор *В.П. Самохвалов*
Редакторская обработка *И.И. Проломова*
Корректорская обработка *И.И. Проломова*
Доверстка *А.А. Нечитайло*

Подписано в печать 28.12.06. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,1. Усл. кр.-отт. 5,2. Печ. л. 5,5 .
Тираж 50 экз. Заказ . ИП-73/2006

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34