



# Содержание

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1</b>	
<b>Точность металлорежущих станков и их тепловой режим</b> ..	10
1.1. Эволюция и энергетический барьер точности металлорежущих станков .....	10
1.2. Характеристика источников тепловыделений в металлорежущих станках .....	36
1.3. Конструктивные и компоновочные решения станков и их тепловой режим.....	46
1.4. Тепловое поведение металлорежущих станков при их нагреве .....	62
1.5. Изменение точности металлорежущих станков при нагреве .....	78
1.6. Эффективность металлообрабатывающего оборудования и производственных систем .....	90
1.7. Методы оценки энергоэффективности металлорежущих станков .....	97
1.8. Оценка энергоэффективности металлорежущих станков и их классификация .....	100
<b>Глава 2</b>	
<b>Теплофизическая структура металлорежущих станков</b> ..	111
2.1. Общая характеристика построения и описания компоновок металлорежущих станков.....	124
2.1.1. Функции и критерии подобия теплового поведения деталей и узлов металлорежущих станков.....	155
2.2. Закономерности теплового поведения металлорежущих станков .....	162
2.3. Метод ускоренной оценки температур и температурных деформаций металлорежущих станков.....	188
<b>Глава 3</b>	
<b>Теплофизические структуры для оценки температурного режима металлорежущих станков</b> .....	203
<b>Глава 4</b>	
<b>Характеристики источников тепловыделений в металлорежущих станках</b> .....	225
4.1. Тепловыделения в подшипниковых опорах качения узлов металлорежущих станков.....	225

4.2. Тепловыделения в узлах и деталях металлорежущих станков .....	278
--	-----

## **Глава 5**

<b>Теплофизические параметры и характеристики деталей и узлов металлорежущих станков .....</b>	<b>282</b>
--	------------

5.1. Оценка теплоотдачи узлов и деталей станков.....	282
--	-----

## **Глава 6**

<b>Методы оценки и модели стационарных температур металлорежущих станков, их деталей и узлов .....</b>	<b>308</b>
--	------------

6.1. Тепловые модели для оценки теплового режима металлорежущих станков .....	308
---	-----

6.2. Методы оценки стационарных температур деталей металлорежущих станков .....	317
---	-----

6.3. Стационарные температурные поля шпинделя и ходового винта.....	325
---	-----

6.4. Стационарные температуры базовых и корпусных деталей металлорежущих станков.....	336
---	-----

6.5. Метод конечных элементов в расчетах теплового режима деталей и узлов металлорежущих станков .....	343
--	-----

## **Глава 7**

<b>Тепловые модели и методы оценки нестационарного теплового режима деталей и узлов металлорежущих станков</b> .....	<b>365</b>
--	------------

7.1. Модели и оценка температур шпиндельных узлов и ходовых винтов металлорежущих станков.....	365
--	-----

7.2. Модели и оценка нестационарных температур базовых деталей металлорежущих станков .....	390
---	-----

## **Глава 8**

<b>Методы оценки и модели нестационарных температурных деформаций металлорежущих станков, их деталей и узлов.....</b>	<b>409</b>
---	------------

8.1. Общие положения.....	409
---------------------------	-----

8.2. Методы аналитического расчета тепловых смещений элементов станка, шпиндельные узлы .....	410
---	-----

## **Глава 9**

<b>Методы воздействия на тепловой режим металлорежущих станков.....</b>	<b>424</b>
---	------------

9.1. Классификация методов воздействия и управления тепловым состоянием металлорежущих станков .....	424
--	-----

9.2. Параметры и методы воздействия на тепловое состояние металлорежущих станков, их деталей и узлов .....	434
--	-----

9.3. Методы воздействия и управления тепловым состоянием шпиндельных узлов и передач ходовой винт – гайка качения.....	462
--	-----

## Введение

В общей совокупности процессов, протекающих при обработке металлов резанием, тепловой фактор играет весьма важную роль. Доля тепловых деформаций в общем балансе погрешностей обработки и точности станка тем выше, чем жестче требования к точности обрабатываемых деталей. Особую роль играют тепловые деформации в станках с ЧПУ, так как они являются более энергоемкими, а доля машинного времени достигает 70–90%. В станках с ЧПУ до 50% энергии, подводимой к ним, рассеивается в структуре станка, вследствие электрических, механических и иных потерь превращается в тепловую, тем самым увеличивая теплонапряженность конструкции станка, его деталей, узлов и элементов. Доля тепловых погрешностей в общем балансе точности станков с ЧПУ может достигать 30–70%, причем характер и степень их влияния неодинаковы для различных параметров точности обрабатываемых деталей.

Негативной стороной теплового фактора является также и то обстоятельство, что он ограничивает повышение скоростей перемещения (вращения) рабочих органов станка — шпиндельных узлов и приводов подач. Помимо перечисленных воздействий, тепловой режим станка влияет и на такие характеристики станка, как геометрические, упругие, параметры работоспособности, долговечности, т. е. на технический уровень станка в целом.

Современное состояние и тенденции развития металлорежущих станков, обуславливают необходимость увеличения их энергонасыщенности, времени производительного функционирования, концентрации выполняемых операций на одном станке, расширение функциональных возможностей металлорежущих станков, повышение скоростей и других параметров и характеристик, требует как значительного увеличения энергетических затрат, так и необходимости их постоянного роста. Это, в свою очередь, приводит к росту потерь механической энергии деталей поступательного и вращательного движений, электрических потерь мехатронных узлов (мотор–шпиндель, линейные приводы), потерь в подшипниковых опорах, наибольшая доля которых приходится на шпиндельные узлы. В частности, например, скорости вращения шпиндельных узлов металлорежущих станков за последние 10 лет возросли в 1,5–2 раза, а их мощность увеличилась в 7–8 раз, аналогично возросли скорости перемещения рабочих органов и их мощность.

Прогресс в создании новых инструментальных материалов позволяет существенно повысить скорости резания при обработке металлов на металлорежущих станках. Основным препятствием к повышению скоростей обработки на металлорежущих станках является невозможность адекватного повышения скоростей вращения и перемещения рабочих органов станков, и в первую очередь это относится к шпиндельным узлам и приводам подач. Создание таких быстроходных узлов обуславливает необходимость решения ряда остро стоящих проблем — снижения уровня тепловыделений и уровня нагрева узлов, который, с одной стороны, снижает работоспособность (а часто и не позволяет с помощью традиционных конструкций, материалов и методов создавать быстроходные узлы с требуемыми параметрами), а с другой стороны, высокая температура узлов обуславливает и вызывает термоупругие деформации деталей станка, что существенно влияет на параметры точности всего металлорежущего станка.

С этой целью проводятся работы по созданию специальных высокооборотных подшипников, применение таких видов и способов смазки, которые обеспечивают интенсификацию отвода тепла, систем и устройств регулирования натяга в подшипниковой опоре и т. п. Разрабатываются новые материалы, конструктивные и технологические методы по снижению потерь на трение и многое другое.

Экспериментальные исследования температурных полей и тепловых деформаций станка необходимы для определения и оценки реальных и фактических величин его теплового режима, однако они требуют значительных затрат времени и являются достаточно трудоемкими. Кроме этого, экспериментальная оценка всего комплекса параметров, которые определяют и формируют тепловой режим и температурное состояние деталей, узлов и станка в целом, является и материально, и экономически, и физически сложной задачей, анализ которой также представляет определенные трудности.

Поэтому необходимо как качественно, так и количественно оценивать ожидаемый тепловой режим и тепловое поведение металлорежущего станка, определять их характер и изменение во время его работы, что позволит как при проектировании, так и при эксплуатации станка принимать рациональные и эффективные решения по снижению, компенсации, коррекции и управлению теплостойкостью станка.

Для активного воздействия на процесс формирования технического уровня станка необходимо решать не только конкретные инженерные задачи, но и искать общие принципы и закономерности формирования теплового облика, состояния и поведения станка.

Следовательно, изучение закономерностей формирования и протекания тепловых процессов в металлорежущих станках, выявление основных принципов взаимодействия тепловой энергии, рассеиваемой в структуре станка, с элементами, деталями, узлами станка и окружающей средой являются необходимой научно-методической базой теплофизического анализа проектируемых станков. При этом должны быть разработаны методы структурного теплофизического анализа и синтеза станков, когда выбираются принципиальные компоновочные решения, методы параметрического теплофизического анализа и синтеза станков, когда определяются и оптимизируются параметры узлов, деталей и элементов станка, которые определяют уровень его теплового режима и теплонапряженности.

Совокупность перечисленных методов, правил их применения составляет процесс теплофизического проектирования металлорежущих станков, т. е. процесс обеспечения заданного уровня теплового режима и теплонапряженности станка.

Способность станка противостоять (сопротивляться) тепловым воздействиям характеризует его теплостойкость. Численно величина теплостойкости может быть выражена в единицах температуры, когда речь идет об уровне нагрева и его теплового режима, или в единицах смещений (линейных или угловых), когда речь идет об уровне деформаций и взаимных относительных изменений положения узлов и деталей станка.

Все это позволяет разрабатывать и обуславливает большое разнообразие методов воздействия на теплостойкость металлорежущих станков, основанных на глубоком анализе тепловых процессов, протекающих в станках при их работе. Области применения и эффективность методов воздействий на теплостойкость так же различны, как и разнообразны способы и средства, реализующие их.

В настоящей работе приведены как аналитические, так и численный метод — метод конечных элементов — решения задач по определению и оценке температуры нагрева основных теплоактивных и теплонапряженных деталей и узлов станков — шпиндельных узлов, ходовых винтов, корпусных и базовых деталей. Приводятся критерии для быстрой инженерной оценки уровня нагрева, рассмотрены и обосновываются мероприятия по направлениям и методам снижения воздействия на уровень их теплового режима.

Систематизирована и дана классификация тепловых моделей, приведены типовые расчетные схемы, даны необходимые сведения по определению коэффициентов теплоотдачи. Подробно рассмотрены существующие и проверенные методы по определению коэффициентов теплоотдачи, методы определения потерь мощности, даны соответствующие зависимости.

Указаны пути и направления снижения и стабилизации температур шпиндельных узлов металлорежущих станков. Установлены параметры, оказывающие влияние на тепловой режим деталей и узлов станка, дана оценка значимости и степени их влияния на формирование теплового режима, что в целом позволит найти и сопоставить эффективность тех или иных конструктивных решений и иных мероприятий для обеспечения заданного уровня теплового режима.

# ГЛАВА I

## ТОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИХ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ

### I.1. Эволюция и энергетический барьер точности металлорежущих станков

Научно-технический прогресс в области материального производства обусловлен применением научных и технических достижений, базирующихся на изучении физических процессов, явлений, систем и структур, способов, форм и видов их взаимодействий, приводящих к созданию более эффективных технологий, машин, оборудования, а также к совершенствованию существующих способов производства изделий. Материальное производство как система состоит из двух элементов: предмета с присущими ему свойствами и технологии его изготовления. Это обуславливает принципиальную возможность развития такой системы в двух направлениях: 1 — совершенствование и создание нового предмета (машин, оборудования) и 2 — новых технологий производства.

Совершенствование и создание новых предметов (деталей, устройств, механизмов и машин), вызываемое развитием нужд и потребностей общества, изменение и формирование новых функциональных и качественных свойств предметов, их характеристик и параметров обуславливают соответствующие требования к изменению, развитию и созданию новых процессов как технического, так и технологического оборудования, а также его (оборудования) технико-технологических и иных параметров и характеристик, в частности производительности, точности и эффективности, которая определяется затратами ресурсов на их создание и эксплуатацию.

Развитие сложных технико-технологических систем происходит в направлении достижения ими максимальной степени идеальности их функционирования, что происходит как в рамках совершенствования существующих конструктивных решений, так и при принципиальном изменении конструктивных решений на новых физических принципах или их сочетаниях. Такое направление развития определяется и обуславливается за счет всестороннего использования более глубоких физико-химических свойств материи и энергии при их взаимодействии. Это приводит к переходу на новый уровень структурных составляющих технико-технологических систем — с макро- до микро- и наноуровня.

Требования к необходимости достижения изделиями высоких показателей степени идеальности (точности) и ее постоянный рост особенно ярко проявляют-



ся в таких отраслях, как астрономическая, авиационная, космическая, атомная, электронная, медицинская, биологическая, и некоторых других.

Металлорежущие станки, технологическое оборудование и системы являются основными средствами производства деталей как элементной базы для всех перечисленных выше отраслей промышленности, и поэтому к ним предъявляются еще более высокие и жесткие требования точности, производительности и эффективности.

Высокие требования к достижимым параметрам точности обрабатываемых на станках изделий обуславливают необходимость постоянного увеличения точности самих металлорежущих станков. В течение многих десятилетий инженерами и специалистами постоянно проводятся работы по достижению требуемых высоких параметров и характеристик точности станков, формирование которых обуславливается на всех этапах их жизненного цикла — при проектировании, производстве и промышленной эксплуатации станков.

Представления, понятия и степень их глубины, системность и адекватность модели формирования указанных характеристик и описание процесса их функционирования является важнейшим средством познания их состояния, эволюции и тенденций развития.

Различные подходы к методам оценки и контроля точности и качества металлорежущих станков, разнообразие терминологических понятий и характеристик, несоответствие предпочтительности способов оценки станков потребителями и изготовителями обусловлены широким спектром представлений о выходных параметрах точности станков, которые предполагаются всеми одинаково понимаемыми, допускают аналогичное толкование и содержат одну и ту же смысловую нагрузку.

Структура выходных параметров точности металлорежущего станка и их взаимосвязь с выходными параметрами технологической системы, реализующей процесс обработки металлов резанием, результатом которого является изделие, а свойства изделия, в частности достигаемая точность обработки, формируются во время осуществления технологического процесса его обработки, характеризуют качество всего технологического процесса и являются его естественными выходными параметрами. При этом технологический процесс рассматривается как последовательность или совокупность взаимосвязанных технологических состояний, позволяющих оценить показатели качества выходных параметров (например, геометрической точности), достигаемых в результате выполнения отдельных технологических операций.

Таким образом, технологическая система, построенная на основе металлорежущего станка, предназначена для осуществления всего технологического процесса обработки резанием либо его определенной информационно и технологически законченной части, выполняемой на одном рабочем месте, и обеспечивает формирование изделия с заданными свойствами, а под выходными параметрами технологической системы, одним из элементов которой является станок, понимают достигаемые точность и/или производительность выполняемого технологического процесса.

В этом случае под показателями качества обрабатываемых изделий, характеризующими отдельные их свойства, выступают точность размера, формы и расположения обрабатываемых поверхностей, их шероховатость и физико-механические параметры.



В качестве выходных параметров точности станка также используются (и понимаются) точность размеров, формы и расположения обрабатываемых деталей, и по величинам их отклонений оценивается точность металлорежущего станка. Очевидно, что одни и те же выходные параметры не могут одновременно объективно характеризовать точность и качество станка, как элемента технологической системы, так и всю технологическую систему, выходные параметры которой формируются совокупностью всех ее элементов, каждый из которых вносит свой вклад и имеет свою собственную долю влияния на параметры и свойства изделия. Хотя обработанная на станке деталь и концентрирует в себе свойства технологической системы и их проявление всеми ее элементами, но это не позволяет объективно судить о выходных параметрах каждого элемента в силу сложных взаимосвязей и взаимодействий между всеми элементами технологической системы.

Поэтому для более достоверной оценки точности и качества станков необходимо определить такие их выходные параметры, которые объективно отражают свойства станка, обусловленные его функциональным назначением, и которые могут быть рассчитаны, оценены и/или определены экспериментально.

Рассмотрим в исторической перспективе понятие *точность* применяемое в отношении металлорежущих станков.

«Представляя общую поверхность детали, состоящей из отдельных участков, отождествляемых с некоторыми геометрическими образами, мы можем говорить о соответствии реальной и заданной детали в четырех направлениях: точность формы, точность размеров, точность взаимного расположения и чистота поверхности» [118, с. 5]

«Понятие «точность» относится к сравнению двух деталей реальной и заданной, различие между которыми обусловлено несовершенством изготовления. Конструктивные различия (варианты конструкции) к понятию точность отношения не имеют» [118, с. 5, 6]

«Точность — один из важнейших показателей качества машин, существенно влияющих на все критерии работоспособности их механизмов, а следовательно, и на выходные показатели машин: быстроходность, энергетическую эффективность, материалоемкость, надежность и долговечность. Точность технологических машин в решающей степени определяет точность изделий ... Проблема точности станков является первостепенной» [119, с. 5]

«Точность — это разница между фактическим и номинальным значением. Ее также называют как ошибка» [120, с. 226]

«Точность — максимальная линейная или угловая погрешность (ошибка, отклонение) между любыми двумя точками в рабочем объеме станка» [121, с. 58]

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 «точность (ассигасу): степень близости результата измерения к принятому опорному значению». Термин *точность*, когда он относится к серии результатов измерений (испытаний), включает сочетание случайных составляющих и общей систематической погрешности. Принятое опорное значение служит в качестве согласованного для сравнения и получено как теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах, приписанное или аттестованное, базирующееся на экспериментальных работах, согласованное или аттестованное, базирующееся на совместных экс-

периментальных работах математическое ожидание измеряемого значения лишь в случаях, когда предыдущие три недостатны.

«Одной из основных характеристик, определяющих функционирование механизма, является точность его работы. Точность механизма характеризуется разностью фактических и расчетных значений параметров механизма» [122, с. 5] которые [123, с. 3] рассматривается как «ошибка механизма», а «идеальный механизм осуществляет предписанный закон движения с абсолютной точностью или воспроизводит [124, с. 7] заданную зависимость с абсолютной точностью».

«Точность определяется как близость между эталонным и полученным значениями величины. В инженерных системах точность — это максимальная ошибка поступательного или вращательного движения между заданным и фактическим положением [125, с. 14] Причем эта ошибка рассматривается как вдоль линии перемещения, в плоскости между двумя произвольно расположенными точками, так и в объеме — между точками расположенными в пространстве» [126, с. 59, 60]

«Танигучи, говоря о точности, понимал прецизионность, точность и шероховатость, но не повторяемость. . . . мы заинтересованы в понятиях *точность*, *повторяемость* и *разрешение* (рис. 1.1). Разные авторы имеют немного отличающиеся представления относительно этих понятий. Когда люди говорят о «точности станка», то часто подразумевают широкий смысл исполнения станка. Например, под понятием *точность станка* может подразумеваться разрешение, повторяемость и точность в том же самом значении понятия» [126, с. 49]

Потребителями металлорежущих станков предпочтение отдается прежде всего понятию «достижимая точность обработки» деталей на этих станках.

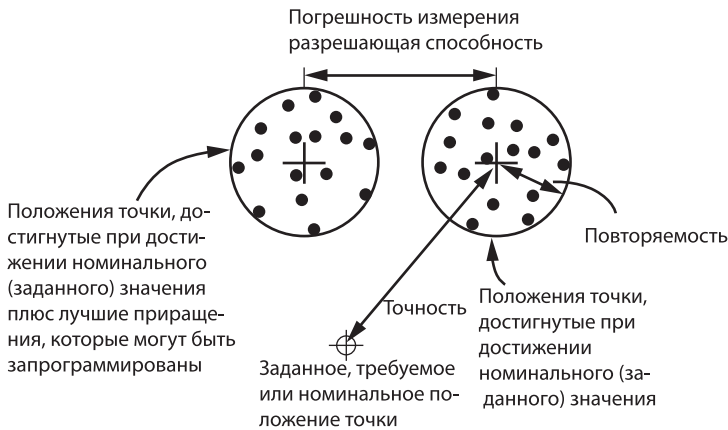


Рис. 1.1. Схема, иллюстрирующая понятия *точность*, *повторяемость* и *разрешение* [121, 127]

Поэтому разнообразие характеристик терминологического понятия «точность станков» при всей их относительной близости и содержательном представлении, широкий спектр выходных параметров станков требует их рассмотрения и обобщения с позиций системного единства.

Для этого рассмотрим энергоинформационную модель [128], основным результатом функционирования которой является производство деталей с заданными свойствами, параметрами и характеристиками (рис. 1.3). Применитель-

но к процессам обработки металлов резанием, результатом которой является деталь, на этом рисунке приведена структура взаимосвязей физических процессов и формируемых ими свойств детали. Выделены составляющие элементы системы, которые обеспечивают формирование размера детали — физический процесс I осуществляемый инструментом, и поверхности детали — физический процесс II формообразования поверхности, осуществляемый рабочими органами станка. Другие характеристики и параметры, которые описывают свойства (информационный образ) детали формируются иными методами обработки в соответствии с технологическим образом детали [129].

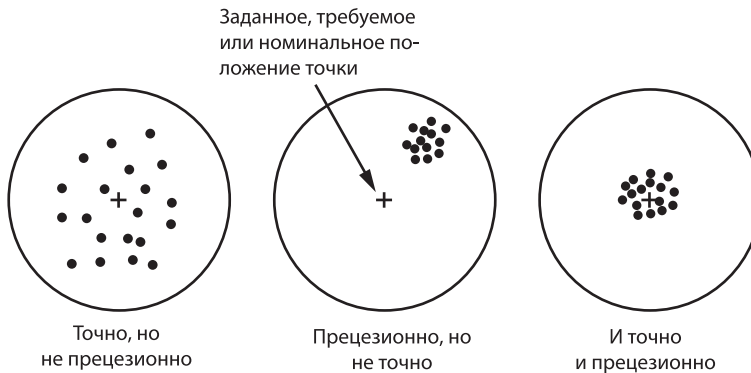


Рис. 1.2. Схема, иллюстрирующая понятия *точность* и *прецизионность* [127]

Следовательно, технологический процесс (ТП) производства детали является множеством физических процессов I (на рис. 1.3 для обработки резанием применено понятие *физический процесс пластического деформирования*, который обуславливает получение размера) и соответствующее ему множество структур пространственно-временных законов преобразования положения II физического процесса (на рис. 1.3 — кинематический процесс формообразования, который определяет получение требуемой формы детали). Для достижения другого требуемого свойства детали, например твердости, необходимы другие физические процессы (отличные от пластического деформирования) и соответствующие законы их пространственно-временного преобразования.

В зависимости от вида энергии, направленной и осуществляющей изменение состояния, структуры и свойств материала, количества и способа передачи информации различают виды реализуемых технологических процессов: обработка резанием (механообработка), обработка давлением, литье, сварка, термическая обработка, гибка и другие.

Информация о количественных, качественных, геометрических параметрах, форме, структуре, состоянии, положении и свойствах изделия (предмета, детали), заключенная в его описании или чертеже, является **информационным образом изделия**.

Информация о геометрических параметрах, форме изделия и их свойствах, заключенная в ее описании или чертеже, является **геометрическим образом изделия**.

Информация о последовательности преобразования материи, энергии и информации, заключенная в документах, определяющих модель последовательного

достижения равенства (в широком смысле) информации о материальном объекте и его информационном образе, — **технологический образ изделия**.

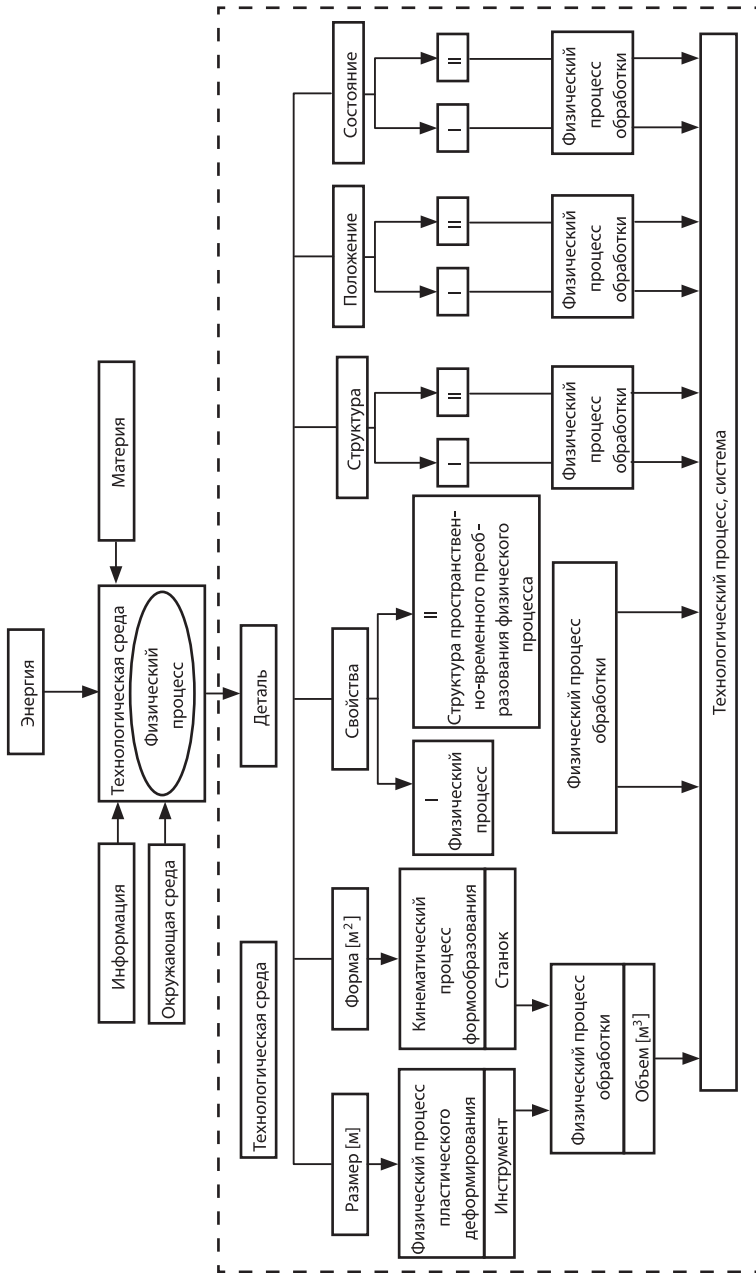


Рис. 1.3. Энергоинформационная модель технологического оборудования, процесса, системы, взаимосвязей видов физических процессов и свойств детали

Образы, которые характеризуются неизменностью одного или нескольких свойств, будем называть **единичными образами**.

Образы, которые не изменяют свои заданные свойства, будем называть **номинальные**, или идеальные, образы. Тогда реальные образы — это изделия, информационное содержание которых описывается фактическими, реальными свойствами, формируемыми в технологическом процессе производства при взаимодействии материи, энергии и информации.

Информация о геометрических параметрах, форме и свойствах изделий характеризует виды технологий:

- *нанотехнологии* — характерный геометрический размер менее  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  м.;
- *микротехнологии* — характерный геометрический размер  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  м.;
- *обычные, или традиционные, технологии* — характерный геометрический размер больше  $10^{-3}$  м.

Изменения, деформация, искажения свойств и отношений соответствующих образов обуславливают и определяют их качественные и количественные показатели, параметры и характеристики. К таким показателям можно отнести точность, производительность, надежность, энерго- и материалоемкость и т. п.

Например, *точность технологического процесса* определяется уровнем соответствия или степенью приближения реальных свойств, параметров и характеристик процесса получения изделия (предмета, продукта или детали) его образу (информационному, геометрическому, технологическому) — номинальному, заданному или идеальному значению. Поэтому необходимо различать следующие понятия «точность»:

*точность изделия, физически (реально) достижимая точность, энергетически достижимая точность, точность физического процесса, технологическая точность, точность машины, оборудования, производственной системы, структурная точность, эффективная точность* и т. п.

Иными словами точность как свойство системы при системном рассмотрении также является результатом отражения взаимодействия структурных связей и отношений элементов системы, которые в данном случае порождают, как сказано выше, новую систему, основным свойством которой является точность.

Таким образом,

*точность (ассигасу) — степень соответствия свойств(а) предмета, объекта, системы, процесса, явления его номинальному, заданному, установленному, допустимому, идеальному значению или закону.*

*Информационное определение:* точность — разность массивов информации, описывающих идеальные свойства объекта и их реальное, фактическое значение.

*Математическое понятие:* точность — отклонение детерминированное, векторное или отклонение величины поля состояния свойств объекта относительно его теоретического.

*Структурное определение:* точность — степень отклонения связей и/или отношений между элементами структуры.

*Элементами структуры* понятия *точность* как системы являются их погрешности, ошибки (error) и отклонения их свойств в поле состояния объекта [130, 131].

Создание станков, в которых одновременно или последовательно выполняются различные методы обработки разными инструментами, каждый из которых

осуществляет независимо от другого линейное и/или вращательное движения, например токарно-фрезерные центры, фрезерно-шлифовальные станки, привело к дополнению к традиционной классификации новым классом, который по достаточно удачному термину, предложенному Т. Moriwaki получил название «Multi-functional Machine Tool» («Многофункциональные станки»). Кроме этого, появилась группа станков под общим названием класса — «Multitask Machine Tool» («многозадачные» станки), в которых применяются и другие физические принципы изменения свойств детали, например лазерная обработка и т. п. Поэтому целесообразно ввести наименования групп и классов оборудования, которые отражают не только метод обработки (точение, сверление и т. п. (количество которых достаточно велико), а в первую очередь физические принципы, реализуемые этим оборудованием. Например, возможны следующие группы:

1. Оборудование, которое реализует взаимодействия:

- 1.1. «Твердое тело» — «Твердое тело»
- 1.2. «Твердое тело» — «Состояние среды»
- 1.3. «Твердое тело» — «Физическое поле».

2. Оборудование, которое реализует комбинацию взаимодействия:

- 2.1. «Твердое тело» — «Твердое тело» — «Состояние среды»
- 2.2. «Твердое тело» — «Твердое тело» — «Физическое поле»
- 2.3. «Твердое тело» — «Состояние среды» — «Физическое поле».

3. Оборудование, которое реализует взаимодействие твердых тел и полей без изменения параметров, свойств и характеристик детали:

- 3.1. Контрольно-измерительные машины.
- 3.2. Контрольно-измерительные приборы и устройства.
- 3.3. Ручные средства контроля и измерения.

В свою очередь физический процесс взаимодействия, реализуемого в оборудовании как системе, также может быть как однородным, например, пластическое деформирование, так и множественным, например, пластическое деформирование (резание) и плавление (шлифование), пластическое деформирование (резание) и нагрев лазерным лучом и т. п., которые по времени могут происходить одновременно или последовательно и в разных технологических средах, например в среде инертных газов и др. В этом случае реализуются так называемые гибридные технологии, разнообразие которых достаточно велико.

Размер, который требуется обеспечить любым из указанных методов взаимодействия, характеризуется как требуемое расстояние между взаимодействующими объектами (телами, полями, состояниями) в направлении, перпендикулярном к поверхности продукта, которое является необходимым и достаточным и которое обусловлено законами протекания и осуществления физических процессов или явлений, в то время как форма поверхности определяется видом закона одновременных взаимосвязанных относительных движений (элементарных линейных и вращательных) объектов при непрерывном осуществлении физического процесса.

Металлорежущий станок, у которого физический процесс I (см. рис. 1.3) отсутствует, является измерительной машиной (СММ).

Следовательно, при таком системном энергоинформационном рассмотрении модели структур различных видов технологического оборудования получим, исходя из вышеприведенного определения, *точность, как понятие*, которое содержательно отражает свойство размера (линейная или векторная величина), и как понятие, которое содержательно отражает свойства и характеристики законов положения, движения, состояний, взаимодействий.

Исторический процесс повышения точности происходил быстро. К 1776 г., согласно письму Уатта, можно было получить точность расточки цилиндра длиной 72 дюйма в толщину шестипенсовой монетки (т. е. 2000 мкм) [119, с. 4], а по данным Дж. Уилкинсона (1775 г.), расточка цилиндра диаметром 57 дюймов производилась с такой же достижимой точностью 2000 мкм. [120, с. 11]. Темп роста достижимой точности изготовления особенно высок в наше время. Он возрос в 10 раз каждые 20 лет. Так, относительная погрешность изготовления в 1940 г. составляла  $10^{-4}$ , в 1960 г. —  $10^{-5}$ , в 1980 г. —  $10^{-6}$  м.

В научной литературе приводятся схемы — графики изменения достижимой точности обработки с 1900 г. по 1980 г. с прогнозными значениями до 2000–2020 гг. Начиная с работы Taniguchi N. (1974 и 1983, 1994 гг.) и модификации этой схемы (по отношению к первоначальной) представления опубликованы с различной степенью полноты и детализации видов станков и технологических процессов в работах McKeown P.A. (1987 г.), Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. (2003 г.). Данные также схемы изменения достижимой точности обработки с 1900 г. по 1980 г. с прогнозными значениями до 2000 г., а в работах (табл. 1.1) Mekid S. [125, с. 131, 2009 г.] и CIRP Encyclopedia [133, с. 798, 2014 г.] приводятся данные до 2020 г. На рис. 1.4 приведена схема [134, с. 144], которая иллюстрирует изменение достижимой точности, а случайные составляющие на схеме добавлены из [132].

Необходимо заметить, что в настоящее время применяются следующие характеристики видов обработки и их обобщенных понятий, приведенных на рис. 1.4:

- традиционная (стандартная, ординарная) обработку включает — точение, фрезерование, прецизионное точение, шлифование, полирование, хонингование, обработка на станках с ЧПУ;
- прецизионные виды обработки — координатно-расточная, координатно-шлифовальная, суперфинишное полирование, шлифование, алмазное точение и шлифование;
- высокопрецизионная обработка — высокопрецизионное шлифование, притирание, полирование;
- ультрапрецизионная обработка — атомарная, молекулярная, ионно-лучевая, нанопроцессы и нанообработка.

В отличие от схемы Taniguchi N. (1974 г.), где было поименовано три вида обработки (традиционная, прецизионная, ультрапрецизионная) на рис. 1.4 появилась дополнительная кривая между прежними традиционной и прецизионной, что, по всей видимости, обусловлено иллюстрацией более строгого соблюдения пропорций расположения кривых с кратностью в 10 раз между ними (5–0, 5–0,05–0,005 мкм). Это и привело к большей дифференциации наименований и к появлению дополнительного вида высокопрецизионной обработки. В этом

усматривается определенный смысл, так как все виды механической обработки лежат выше кривой высокопрецизионная обработка после 1980 г. с потенциально достигаемой точностью не более 0,01 мкм (10 нм).



Рис. 1.4. Схема изменения достижимой точности обработки

Таблица 1.1. Прогноз изменения достижимой точности

Вид обработки	1920	1940	1960	1980	2000	2020 (Прогноз)
Традиционная, мкм	–	60	30	5	1	0,1
Прецизионная, мкм	–	75	5	0,5	0,1	0,03
Высокопрецизионная, мкм	75	5	0,5	0,05	0,01	≥ 0,003
Ультрапрецизионная, мкм	5	0,5	0,05	0,005	0,001	≤ 0,3 нм

Очевидно, что необходимо задаться вопросом о пределе достижимой точности и ее обосновании, что авторами указанных схем не рассматривалось и пределы указаны неочевидно. Так как реально измерить достижимую точность в 2020 г. пока невозможно, а вопрос необходимости и обоснованности затрат и усилий на достижение не совсем очевидного результата неоднозначен для каждого вида обработки, что требует достаточно строгого или вероятного в своем максимальном правдоподобии ответа. Кроме этого, не ясен вопрос о виде и характере кривых как до, так и после рассмотренного периода (1990–1980 гг.).

История исследований процесса резания металлов [135] концептуально базировалась на следующей принципиальной физической постановке задачи, в которой принимались следующие положения:

- Физическая модель — удаление (отделение) материала;
- Физический процесс — деформирование упругое, пластическое;
- Физическое явление — разрушение за счет образования дислокаций, трещин.



Пластическая деформация наступает при достижении касательных напряжений предела текучести на сдвиг и завершается макроразрушением. Деформация происходит за счет скользящего, двойникового и относительного перемещения зерен. На атомном уровне к внутривитеренному сдвигу приводят различные способы движения дислокаций в плоскостях скользящего и двойникового, а межвитеренный сдвиг — диффузией точечных дефектов по границам зерен, при этом диффузии вакансий уступают скорости движения дислокаций, которая соизмерима со скоростью распространения звука (порядка 5000 м/с).

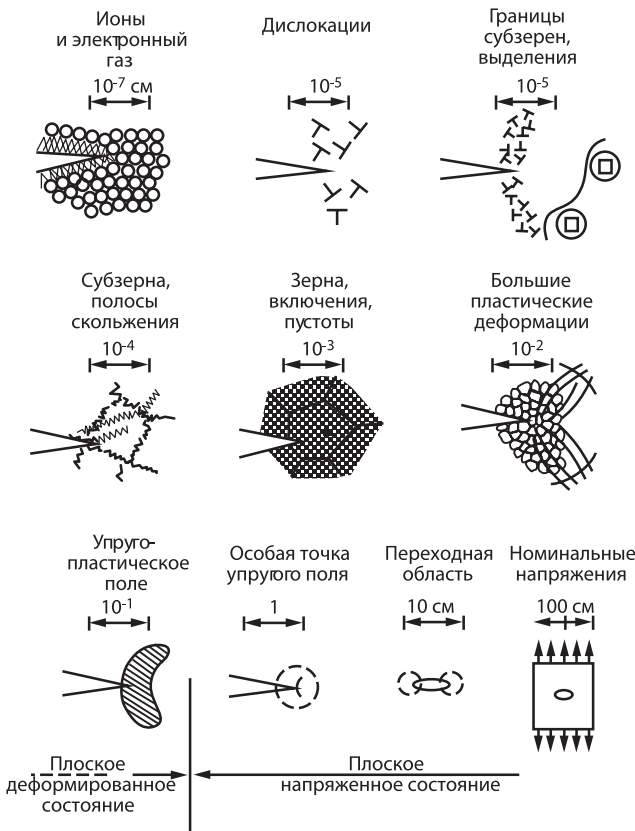


Рис. 1.5. Геометрические соотношения в схемах физического явления разрушения

На рис. 1.5 показаны геометрические размеры для оценки вида процесса физического явления разрушения. Следовательно, модели образования и описание механизма процесса разрушения можно разделить на уровни относительно геометрического размера их рассмотрения:

- субмикроскопический уровень (атомные размеры порядка  $10^{-9}$  м), когда происходит нарушение атомных связей;
- микроскопический уровень (размеры порядка  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  м), когда образуются микротрещины по границам зерен;
- макроскопический уровень (размеры порядка  $10^{-3}$  м), когда образуются трещины и происходит их движение из области концентрации напряжений.

Применительно к процессу обработки материала различают пластическое разрушение, которое происходит при пластической деформации по всему объему тела (обработка давлением), и хрупкое разрушение (обработка резанием), которое происходит за счет распространении трещины при пластической деформации, происходящей в малой области.

Таблица 1.2. Удельная энергоёмкость видов разрушения при резании

Типоразмер схема стружки		Вид разрушения		Дефект	Удельная энергоёмкость, Дж/м <sup>3</sup>
Вид	Диапа- зон, м	Хрупкое	Сдвигом		
Атомарный	10 <sup>-9</sup> –10 <sup>-7</sup>	Атомарная трещина	Атомарное смещение	Точечный	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>
Субкристал- лический	10 <sup>-7</sup> –10 <sup>-5</sup>	Микро- трещина	Сколь- жение	Межкристал- лический	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>
Мультикри- сталлический	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-3</sup>	Хрупкая трещина	Дефор- мация сдвига	Межзерен- ный	10 <sup>1</sup> –10 <sup>2</sup>

Рассмотрим с энергетической точки зрения приведенные выше три уровня процесса разрушения: в табл. 1.2 приведены диапазоны значений удельной энергии, необходимой для выполнения собственно физического процесса резания — пластической деформации материала, характер которой определяется физическим явлением, обуславливающим этот процесс (трещина, смещение, сдвиг) в соответствии с величиной снимаемого материала [134]–[137].

Развитие техники обусловило необходимость изменения тенденции развития и областей применения процессов резания, которые, как отмечалось, осуществляют процессы обработки деталей разных геометрических размеров и с разной величиной срезаемого материала: субмикронное резание (размер порядка 10<sup>-6</sup> м), микрорезание (размер порядка 10<sup>-5</sup>–10<sup>-6</sup> м), тонкое резание (размер порядка 10<sup>-4</sup>–10<sup>-5</sup> м), ординарное, или традиционное, резание (размер порядка 10<sup>-3</sup>–10<sup>-4</sup> м), толстое, или тяжелое, резание (размер свыше 10<sup>-3</sup> м). Поэтому если рассматривать физическую причину, то объяснение приведенных на рис. 1.4 значений достигаемой точности, которые, как это следует из вышеописанного механизма резания и его геометрической аналогии, обусловлены в первую очередь энергетическими и соответствующими им геометрическими характеристиками удаляемого слоя материала резанием. Возможность достижения металлорежущим станком технологически и конструктивно оправданного обеспечения уровня энергии, требуемого для соответствующего процесса резания, определяется уровнем развития преобразователей энергии, применяемой в металлорежущих станках наряду с другими составляющими, формирующими точность обработки. В идеальном случае, когда обеспечивается необходимый размер срезаемого материала, можно говорить об **энергетическом барьере уровня достигаемой точности** и соответствующем пределе достижимой точности.

Кроме этого, для более полного и всестороннего представления об эволюции изменения точности рассмотрим ее в контексте представлений об эволюции развития техники (рис. 1.6) и технологических укладов (рис. 1.7) согласно циклам Кондратьева Н.Д. на протяжении обозримой истории.

Развитие технического объекта по известной и широко применяемой схеме, так называемой S-образной кривой (рис. 1.6), происходит до уровня предельных

возможностей развития для физического принципа действия, который реализует рассматриваемый технический объект. В настоящее время считается [138], что мировая экономика в своем развитии прошла пять технологических укладов и приближается к шестому технологическому укладу (ТУ). 1-й ТУ (1770–1830), ядро уклада — текстильная промышленность; 2-й ТУ (1830–1880), ядро уклада — паровое судоходство, добыча угля, развитие железнодорожного транспорта; 3-й ТУ (1880–1930), ядро уклада — черная металлургия, железные дороги, кораблестроение, производство взрывчатых веществ; 4-й ТУ (1930–1970), ядро уклада — автомобилестроение, самолетостроение, нефтехимия; 5-й ТУ (1970 — н.в.), ядро уклада — электронная промышленность, вычислительная техника, оптиковолоконная техника, программное обеспечение, телекоммуникации; 6-й ТУ будет основываться на биотехнологиях, нанотехнологиях, робототехнике, технологиях виртуальной реальности и др.

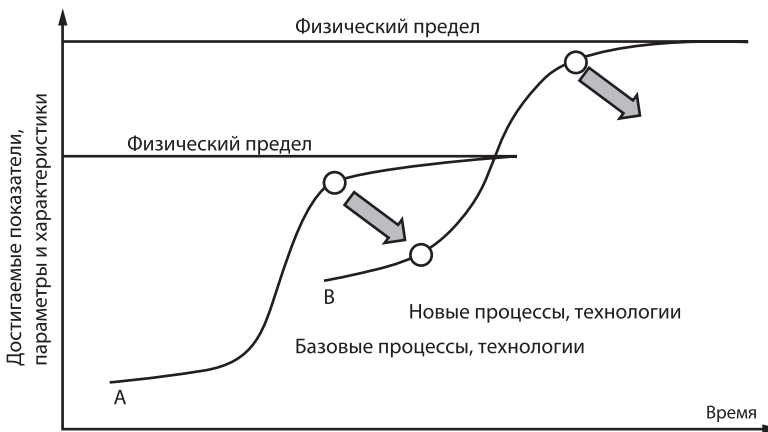


Рис. 1.6. Схема развития техники

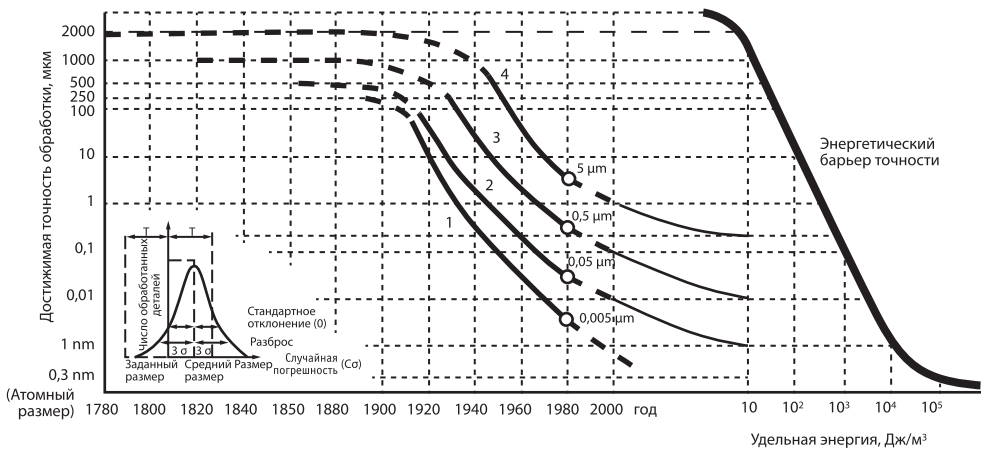
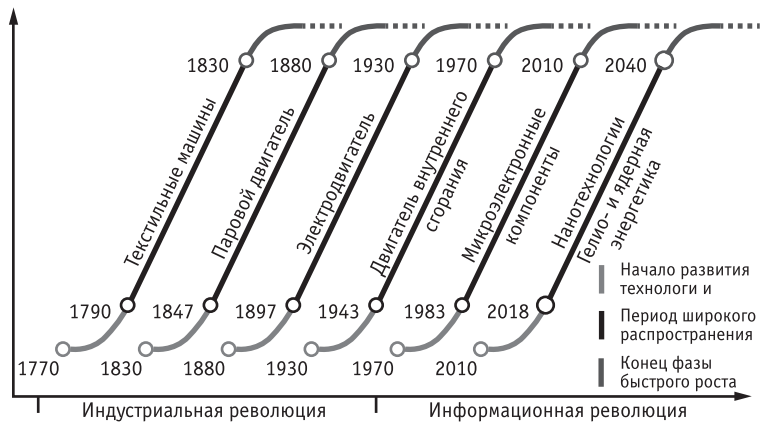
Таким образом, эволюция развития достижимой точности и технологического оборудования, в частности металлорежущих станков, обусловлена в первую очередь требованиями, потребностями и направлениями развития общества, и в частности промышленности. Это определяло и необходимый для этого уровень развития техники, требования к ее деталям, узлам, механизмам, устройствам и системам, потенциала технологии и процессов, используемые ими физические принципы и явления, уровень их совершенства и др. Следовательно, учитывая изложенное, представляется возможным процесс (эволюцию) изменения достижимой точности иллюстрировать на рис. 1.8.

Очевидно, что высокие требования к параметрам точности обрабатываемых на станках изделий обуславливает необходимость постоянного увеличения точности самих металлорежущих станков. В течение многих десятилетий инженерами и специалистами постоянно проводятся работы по достижению требуемых параметров точности станков на всех этапах их жизненного цикла — при проектировании, производстве и промышленной эксплуатации станков.

Как следует из представленных характеров изменения уровней достижимой точности обработки (рис. 1.8) изделий для нормальных, прецизионных, высоко-

прецизионных и ультрапрецизионных, видов обработки, скорость изменения точности практически одинаковая, а точность между ними отличается на порядок, и, следовательно, точность самих металлорежущих станков должна как минимум соответствовать этому уровню. Более очевидным и соответствующим принципам развития техники (рис. 1.7) рассматривается изменение величины, обратной значениям достижимой точности обработки, которые приведены на рис. 1.9.

**Рис. 1.7.** Схема технологических укладов



**Рис. 1.8.** Схема эволюции достижимой точности обработки. (1 — Сверхвысокоточная (ультрапрецизионная) обработка; 2 — Высокоточная (высокопрецизионная) обработка; 3 — Прецизионная обработка; 4 — Стандартная (нормальная) обработка)

Непосредственная оценка характеристик точности станка дает возможность проводить качественное и количественное определение влияния конструктивных, технологических и иных факторов на точность обрабатываемых изделий и создает все необходимые предпосылки для разработки средств и методов управления рассматриваемыми свойствами точности станка при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Различные подходы к методам оценки и контроля качества металлорежущих станков, разнообразие терминологических

понятий и характеристик, несоответствие предпочтительности способов оценки станков их потребителями и изготовителями обусловлены широким спектром представлений о выходных параметрах точности станков, которые предполагаются всеми одинаково понимаемыми, допускают аналогичное толкование и содержат одну и ту же смысловую нагрузку. Очевидно, что одни и те же выходные параметры не могут одновременно объективно характеризовать точность и качество станка, как элемента технологической системы, так и всю технологическую систему, выходные параметры которой формируются совокупностью всех ее элементов, каждый из которых вносит свой вклад и имеет свою собственную долю влияния на параметры и свойства изделия — достижимую точность обработки.

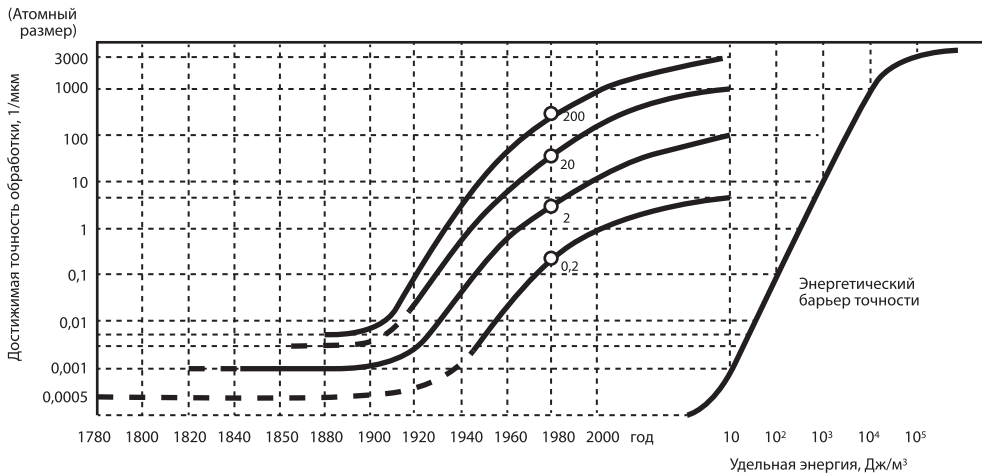


Рис. 1.9. Эволюционная схема развития достижимой точности обработки

Поэтому необходимо также рассмотреть эволюцию методов оценки точности металлорежущих станков, ее структуру, взаимосвязи и модели, которые объясняют закономерности формирования, достижения и обеспечения требуемой точности, исходя из потенциала точности физических методов обработки, реализуемого металлорежущими станками и удовлетворяющих требованиям потребителей станков. Для более достоверной оценки точности и качества станков необходимо определить такие их выходные параметры, которые объективно отражают свойства станка, обусловленные его функциональным назначением, и которые могут быть рассчитаны, оценены и/или определены экспериментально.

Металлорежущий станок при анализе точности рассматривается как система (рис. 1.10), состоящая из множества деталей и узлов, которые в соответствии с заданными и осуществляемыми функциями делятся на две группы: *неподвижные и подвижные*. К ним относятся: станины, колонны, столы, салазки, каретки, направляющие, шпиндельные бабки и т. п., которые сами по себе в разных случаях могут быть как подвижными, так и неподвижными фиксированными (например, стол может быть как подвижным (с линейным перемещением или вращением), так и неподвижным, т. е. фиксированным, или колонна может также быть как подвижной, так и неподвижной, и т. д.). Детали и узлы в свою очередь характеризуется присущими им параметрами, свойствами и характеристиками:

геометрическими размерами и формой, физико-механическими характеристиками их материала и теплофизическими свойствами материала и параметрами теплообмена с окружающей средой и сопряженными элементами станка.

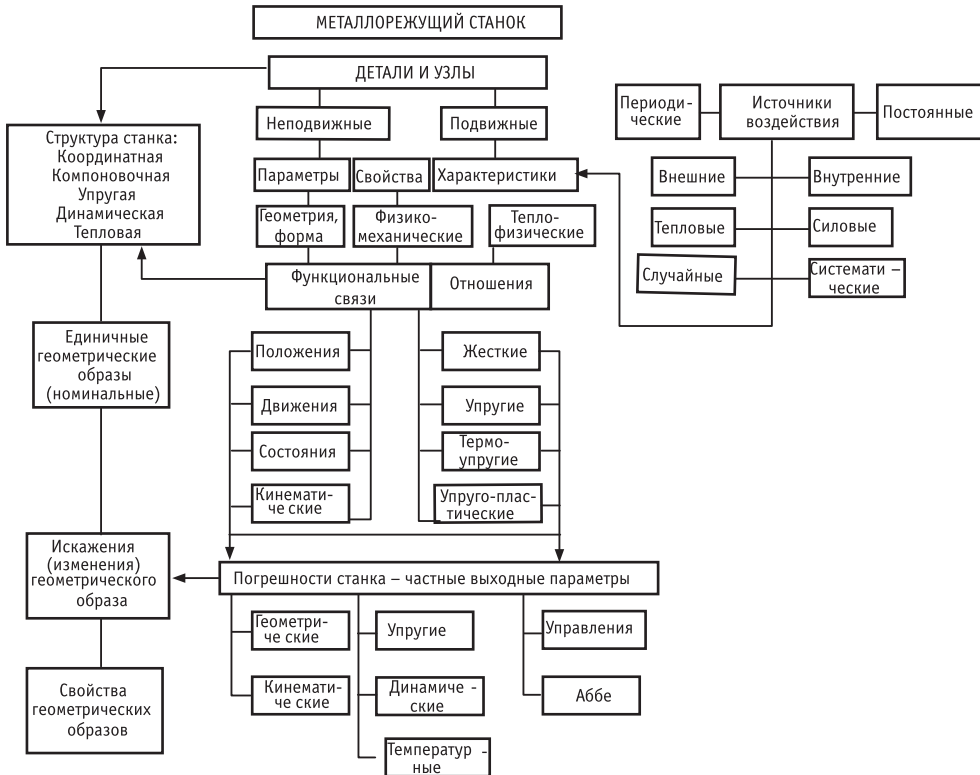


Рис. 1.10. Выходные параметры и характеристики точности станка

Неподвижные и подвижные детали и узлы станка через функциональные связи и отношения образуют различные структуры металлорежущего станка, которые в зависимости от способа их формирования (связей и отношений) могут характеризовать и определять следующие 12 структуры: координатную, компоновочную, упругую, динамическую, тепловую, термоупругую и др.

Отношения между деталями и узлами, а также их связи определяются видом и характером взаимодействия: жестким (неподвижным), упругим, термоупругим, и упругопластическим.

John Loxham, основатель группы Cranfield Precision, первым ввел в оборот понятие детерминизма в контексте точки зрения инженеров-технологов, в соответствии с которой «автоматические станки и измерительные машины совершенно повторяемые, как звезды и планеты». Детерминизм в этом смысле является одним из основополагающих принципов в проектировании, обеспечении и достижении точности станков. Предполагается, что нет такого понятия, как случайное поведение и, что каждая часть машины и процесса подчиняется причинно-следственным связям, которые могут быть объяснены на основании известных инженерных принципов. Детерминистский способ мышления не признает понятия

«случайная ошибка». Считается, что любое поведение станка является результатом некоторых условий, которыми можно управлять, а перечень этих условий достаточно мал, что позволяет им управлять.

Изменения параметров, свойств, характеристик неподвижных и подвижных деталей и узлов, а также их функциональных связей и отношений происходит вследствие воздействия основных видов источников их дестабилизации, таких как силовые и температурные, которые могут быть как постоянными, так и периодическими, случайными и систематическими, внутренними и внешними.

Тогда выходные параметры, характеризующие свойства станка, будут определяться способностью системы сохранять требуемые положения, связи и отношения неподвижных и подвижных деталей и узлов, обусловленные их функциональными назначениями. По причине возникновения отклонений выходные параметры можно разделить на три группы [131, 139, 140]: *положения, движения, состояния*.

*Погрешности положения* обусловлены ошибками изготовления и монтажа (а также износом) узлов и деталей станка. К ним относятся такие погрешности, как, например, отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола, отклонение от параллельности оси шпинделя направляющим, отклонения от параллельности/перпендикулярности направляющих и т. п. Исходя из функционального назначения элементов станка, погрешности положения определяются в виде характеристик взаимных положений в выбранной системе координат таких типовых геометрических элементов, как «точка — точка», «точка — линия», «линия — линия», «линия — плоскость», «плоскость — плоскость».

*Погрешности движения* обусловлены ошибками изготовления, монтажа и управления подвижными элементами станка. К ним относятся кинематические погрешности, погрешности функционирования, погрешности траектории движения рабочих органов, погрешность позиционирования и т. п. Следовательно, погрешности движения определяются как любые отклонения от заданного закона изменения таких типовых геометрических элементов, как «точка», «линия», «плоскость», «объем», или взаимного относительного движения подвижных деталей и узлов станка в выбранной системе координат типовых геометрических элементов «точка — точка», «точка — линия», «точка — плоскость», «линия — линия», «линия — плоскость», «плоскость — плоскость», которые обуславливают и отражают требуемые функциональные законы их движения.

К *погрешностям состояния* относят отклонения, вызванные изменением состояния узлов и деталей станка вследствие статических и динамических воздействий на них силовых, тепловых и других видов энергии. К ним относятся, например, вибрации, упругие и тепловые деформации и т. п. Тогда характеристики положения, движения или состояния геометрических объектов деталей и узлов металлорежущих станков могут быть описаны аналитическими зависимостями (табл. 1.3), которые определяют геометрические свойства их положения в пространстве и изменение состояния вследствие силовых и тепловых воздействий (см. рис. 1.10).

Все это обуславливает, формирует и определяет совокупность погрешностей (параметров точности) металлорежущего станка (см. рис. 1.10): геометрических, кинематических, упругих, динамических, температурных погрешностей, а также погрешностей управления (аппроксимации) и Аббе, которые (в отдельности) в до-

статочной степени описаны, систематизированы и представлены в отечественных и зарубежных стандартах. Рассмотренные погрешности зависят от многих факторов, поэтому они являются функциями состояний основных элементов. Под состоянием в широком смысле этого слова понимается совокупность пространственных, временных и энергетических параметров, определяющих значения данной функции. Областью состояний для одноименной погрешности является множество значений погрешности внутри рабочего объема станка.

**Таблица 1.3.** Характеристики деталей станка как геометрических объектов

Положение	Движение		Состояние	
	Траектория	Динамика	Стационарное	Нестационарное
$F(u) = F(x, y, z) = 0;$ $F(u^1) = F(x^1, y^1, z^1) =$ $= AF(x, y, z) + \xi;$ $A = \frac{dF(u^1)}{du};$ $f = \det A \neq 0$	$\sum \left\{ \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} = Q_i \right\}$	$\sum F = \sum ma;$ $\frac{d^2u}{dt^2} + b \frac{du}{dt} + ru + f = 0;$ $u \wedge (\nabla)y^1$	$\frac{d^2\Omega}{du^2} = 0;$ $\Omega = \Omega_0 \Big _{u=u_0};$ $\frac{d\Omega}{du} = p \wedge k\Delta\Omega;$	$\frac{d^2\Omega}{dt^2} = \frac{d^2\Omega}{dt^2};$ $\Omega = \Omega_0 \Big _{u=u_0};$ $\frac{d\Omega}{du} = p \wedge k\Delta\Omega;$

Прогресс в обеспечении точности обработки и металлорежущих станков связан с развитием методов моделирования и ее оценки, эволюция которых приведена в табл. 1.4. В частности в 1940–1960 гг. были предложены расчетно-аналитические и статистические методы оценки точности (Соколовский А.П.), а также методы анализа размерных цепей (Балакшин Б.С.). В период 1960–1980 гг. появились новые подходы в объяснении и формировании параметров и характеристик точности, их взаимосвязей и взаимовлияний на конечные выходные показатели: векторный анализ объемной точности (Schultchik R.), вероятностная модель изменения точности станка во времени (Проников А.С), метод координатных систем с деформируемыми связями (Базров Б.М).

В 1980–2000 гг. происходило дальнейшее развитие методов описания механизмов формирования выходных параметров точности станка, углубление знаний о взаимодействии, взаимосвязях и взаимозависимостях между составляющими элементарных погрешностей: анализ составляющих погрешностей (Donaldson R.), вариационный метод расчета поведения станков (Решетов Д.Н., Портман В.Т), геометрическое представление однородных преобразований координатных систем (Slocum A.), точность движений формообразования (shapegeneration) на основе однородных преобразований координатных систем (Moriwaki T, Sugimura N, Miao Y, Inasaki I., Kishinami K., Sakamoto S., Takeuchi Y., Tanaka F.), кинематика твердого (rigid) тела (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем (Kiridena V.S.B., Okafor A.C, Ertekin Y.M.). В 2000–2016 гг. повышение точности станков, в дополнение к традиционным конструкторско-технологическим методам, развивается на основе применения систем коррекции и управления с использованием функциональных возможностей систем ЧПУ на основе уже известных методов оценки точности, а также создание различных их модификаций: на основе теории нейронных сетей (Chen J., Yang H., Lee, Mize, Zeigert, Ramesh R.), авторегрессионного анализа (Ni J.), грей-систем (Wangetal), статистических методов повышения геометрической точности (Knapp W.) и др. Продолжаются работы по созданию системных представлений о точности станков и методов их оценки: объемные ошибки нетвердого (non-rigid) тела (Wang C., Svoboda O., Bach P., Liotto G.), объемные 3D-ошибки твердого и нетвердого (non-rigid) тела (Mekid S., Jedrzejewski J., Kiong T.K., Wang C.), структурная точность



и точность образов, формируемых станком, на основе функций поля состояний (Кузнецов А.П.), экспоненциальная модель интеграции геометрических ошибок станка (Fu G., Fu J., Xu Y., Chen Z.), модель общих смещений из-за погрешностей частей деталей станка и обрабатываемой детали в системах координат КИМ (Jie Gu, John S. Agariou and Sheri Kurgin).

В табл. 1.4 приведены в исторической последовательности основные принципы, используемые в методах оценки показателей точности станков, а также технические и технологические события, приводящие к качественному изменению конструктивно-компоновочных решений самих станков, повышению их точности и функциональных возможностей, что требует соответственного изменения методов оценки, которые должны быть адекватными уровню качества станка.

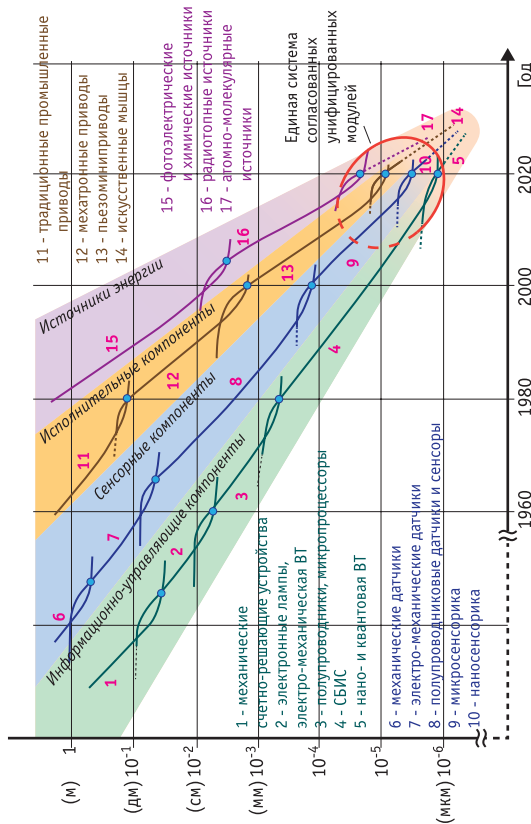


Рис. 1.11. Развитие компонентов технических систем [25]

На современном этапе таким техническим событием можно считать преимущества мехатронного подхода [141], что позволяет реализовать синергетический эффект функционального интегрирования (рис. 1.11) в виде улучшения технических и эксплуатационных параметров устройств, таких как надежность, эффективность, удельное энергопотребление и т. д., а также создавать уникальные компоненты и системы, в целом не реализуемые без использования подобных технологий разработки и изготовления мехатронных модулей движения. Первый качественный прорыв был сделан в информационно-управляющих компонентах на базе 2D-микроэлектронных технологий.

Таблица 1.4. Методы оценки точности металлорежущих станков

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое. Достижимая точность обработки, мкм
Н.Г. Бруевич	1941, 1946	Вариация функции входных и выходных параметров	Положение конечного звена	–/60
Н.А. Бородачев	1950	Теоретико-вероятностные и статистические методы	Деталь. Метрологические свойства детали	–
А.П. Соколовский	1952	Расчетно-аналитические и статистические методы оценки точности обработки и ее составляющих	Деформации и погрешности технологической системы	–
Б.С. Балакшин	1957	Размерные цепи	Деталь. Метрологические свойства детали	Числовое программное управление (NC)/30
А.С. Проников	1971, 1982	Вероятностная модель изменения во времени точности станка. Программный метод испытаний	Изменение во времени выходных параметров точности станка	ШВП – 1969 г.; Линейные направляющие качения – 1971 г.
R. Schultchik	1977	Векторный анализ объемной точности	Тестовая деталь	Компьютерное программное управление (CNC)
Б.М. Базров	1978	Метод координатных систем с деформируемыми связями	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–
А.П. Кузнецов	1979, 1983	Структура, формирование, деформация и искажения геометрических образов	Параметры точности геометрических образов, формируемых станком	Программная коррекция
R. Donaldson	1980	Анализ составляющих погрешностей	Составляющие погрешностей станка	–/5
W. Кнарп	1983, 1998	Статистические методы, методы повышения геометрической точности		–
M. Weck	1984	Методология точности станков		–
Д.Н. Решетов, В.Т. Портман	1986	Вариационный метод расчета поведения станков	Характеристики точности цепи формообразования	–
P.H.J. Schelekens	1986	Моделирование точностного поведения станков	–	Измерительные преобразователи

Таблица 1.4 (продолжение)

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое. Достижимая точность обработки, мкм
M. Donmez	1986	Преобразование форм соединительных элементов	–	Миниатюризация компонентов и элементной базы, преобразователей энергии и информации
F. Theuws	1991	Однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	Компьютерное программное управление на базе персональных компьютеров (CNC/PC)
A. Slocum	1992	Однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–
J.A. Soons	1992	Термо-механический анализ квазистационарного состояния	–	–
V.S.B. Kiridena	1993	Кинематика твердого тела (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем	Метод Ball bar — оценка геометрических параметров отклонений в плоскости перемещений	Изменение формы преобразования электрической энергии в механическое перемещение рабочего органа
H. Soons	1993	Однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	Мехатронные модули движения
T. Moriwaki, N. Sugimura, Y. Miao	1993	Точность движений формообразования на основе однородных преобразований координатных систем	Характеристики точности цепи формообразования	–
J. Chen	1993, 1996	Кинематика твердого тела, нейронные сети	–	–
P.M. Ferreira	1994	Кинематика твердого тела (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–

Таблица 1.4 (продолжение)

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое. Достижимая точность обработки, мкм
H. Nakazawa	1994	Принципы прецизионного проектирования на основе независимых функций и состояний	Изменение выходных параметров точности станка	–
H.A.M. Spann	1995	Однородные преобразования координат. Программный метод компенсации	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	–
Min, S. Hohg, K. Ehmman	1995	Система поверхностных форм	Метод прогнозирования топографии инженерных поверхностей на основе моделей кинематики станков и геометрии режущего инструмента	–
H. Yang	1996	Нейронные сети	–	–
J. Ni	1997	Преобразование координатных систем, авторегрессионный анализ	Изменение вектора конечных звеньев размерной цепи станка	Профильные рельсовые направляющие Ball Cage — 1996 г.
I. Inasaki, K. Kishinami, S. Sakamoto, Y. Takeuchi, F. Tanaka	1997	Теория движений формообразования	Положение ТСП — точка центра инструмента	–
H. Yang, Lee	1998	Нейронные сети + система измерения и контроля	–	–
J. Wang	1998	Теория грей-систем	–	–
V. Portman I. Inasaki, M. Sakakura, M. Iwatate	1998	Образование форм систем станка	Характеристики точности цепи формообразования	–
A.C. Okafor, Y.M. Ertekin	2000	Кинематика твердого тела	–	–/1
Mize Zeigert	2000	Нейронные сети	–	–
R. Ramesh	2000, 2004	Нейронные и байесовские сети	–	–
C. Wang, O. Svoboda, P. Bach, G. Liotto	2004	Объемные ошибки нетвердого тела при диагональном методе их описания	Лазерный интерферометр. R-тест	–

Таблица 1.4 (окончание)

Автор	Годы публикаций	Методы исследования, анализа и оценки точности станка	Объект оценки. Показатели, параметры, характеристики оценки	Событие: техническое или технологическое. Достижимая точность обработки, мкм
S. Mekid, J. Jedrjiewski, T.K. Kiong, C. Wang	2009	Анализ составляющих точности. Объемные 3D-ошибки твердого и не твердого тела	Лазерный трекер. Шагово-диагональный метод	Интеграция информационных систем и систем управления
А.П. Кузнецов	2011	Структурная точность и точность геометрических образов, формируемых станком, метод оценки как функции поля состояний	Деформация геометрических образов, формируемых станком как функции поля состояний	—
S. Ibaraki, W. Knapp	2012	Обобщение методов оценки и контроля параметров точности 3- и 5-координатных станков	Методы контроля: лазерные; бол-бар; R-тест; тестовая деталь	—
G. Fu, J. Fu, Y. Xu, Z. Chen	2014	Экспоненциальная модель интеграции геометрических ошибок станка	Двойной ball bar	—
Jie Gu, J.S. Agariou, S. Kurgin	2016	Модель общих смещений из-за погрешностей частей деталей станка и обрабатываемой детали в системах координат КИМ	Деталь и погрешности установки на столе станка	—

До последнего времени подобные компоненты продолжают лидировать в процессе интеллектуализации и практически уже не лимитируют общий прогресс миниатюризации технических систем в целом. Для упомянутого прогресса наиболее важным стала микроминиатюризация сенсорных компонентов на базе 3D-микросистемных технологий, появление микро-электромеханических систем (МЭМС) и микро-опто-электро-механических систем (МОЭМС). Основными компонентами, сдерживающими дальнейшую миниатюризацию технических систем, являются исполнительные (силовые) компоненты. Они до настоящего времени базируются в основном на технических идеях двигателей XIX века. Их будущий прогресс связан с созданием микроминиатюрных исполнительных устройств. Мехатронный подход к проектированию технических систем на основе общесистемных критериев, соответствующих основным требованиям к системе, перспективен в первую очередь для технических систем, когда не предполагается расширение их функционального назначения и номенклатуры. Системно-мехатронный подход значительно сложнее модульно-мехатронного в силу большей слож-

сти объекта оптимизации. Даже оставаясь нереализуемым, он служит конечной целью или пределом, к которому следует стремиться. Сложность системно-мехатронного подхода логично объясняет тот факт, что мехатроника началась именно с создания однофункциональных компонентов. Следовательно, особенности мехатронного подхода позволяют получать синергетический эффект функционального интегрирования в виде улучшения технических и эксплуатационных параметров устройств, таких как надежность, эффективность, удельное энергопотребление и т. д., а также создавать уникальные компоненты и системы, по существу не реализуемые без подобных технологий разработки и изготовления. Так, на рис. 1.12 приведена принципиальная структура инновационного станка — станка будущего, структура, свойства и характеристики которого определяются системой элементов, реализующих иные физические принципы взаимодействия, построение которых основано на одной из трех структур: трансформируемой, реконфигурируемой или бионической. Очевидно, что процесс достижения этого будет поэтапным и требует соответствующих исследований и разработок на основе указанных физических принципов.

Подводимая к станку энергия, не затрачиваемая на осуществление процесса резания, преобразуется в тепловую и аккумулируется в узлах, деталях и механизмах станка, а частично рассеивается в окружающую среду. Это приводит к изменению начального теплосодержания всей конструкции металлорежущего станка, нагреву деталей и узлов и их температурным деформациям. Причем воздействие тепловой энергии на каждый отдельный элемент станка различно ввиду множества факторов, определяющих протекание тепловых и термоупругих процессов. Воздействие тепловой энергии на элементы станка зависит от вида и характера источника, условий теплообмена с окружающей средой, способа подвода теплоты, формы и размеров элемента, его материала, ориентации элемента в пространстве, вида связи и взаимодействия с контактирующими с ним элементами и ряда других факторов. Степень влияния каждого фактора различна, а необходимость его учета зависит от поставленной задачи, требуемой точности решения, методов решения и т. п.

Последовательность формирования показателей теплового поведения как узлов и деталей металлорежущих станков, так и станка в целом может быть рассмотрена по нижеследующей логической схеме и в последовательности: **источник воздействия** (*постоянный, периодический*) — **тепловой** (*внутренний, внешний*) — **систематический** — **детали и узлы** (*подвижные, неподвижные*) — **параметры, свойства, характеристики** (*геометрия, форма, теплофизические*) — **функциональные связи и отношения** (*положения, движения, состояния, термоупругие*) — **погрешности станка** — **температурные**.

Это, как видно из простого логического анализа взаимосвязи перечисленных и определяющих тепловую структуру станка элементов в рассмотренной последовательности, и обуславливает многообразие теплового поведения деталей и узлов металлорежущего станка и, соответственно, существенных особенностей механизма формирования его температурных погрешностей.

**Формирование теплостойкости станка** можно рассматривать как процесс преобразования структурой станка, поступающей к нему энергии. На рис. 1.13 приведена обобщенная схема формирования и анализа теплостойкости станка, на которой в последовательности их рассмотрения приведены этапы преобра-

зования энергии вплоть до оценки и определения параметров и характеристик теплостойкости станка. Аналогичный методический и концептуальный подход и соответствующая им схема формирования теплостойкости используются также и при рассмотрении тепловых процессов узлов, деталей и элементов станка.

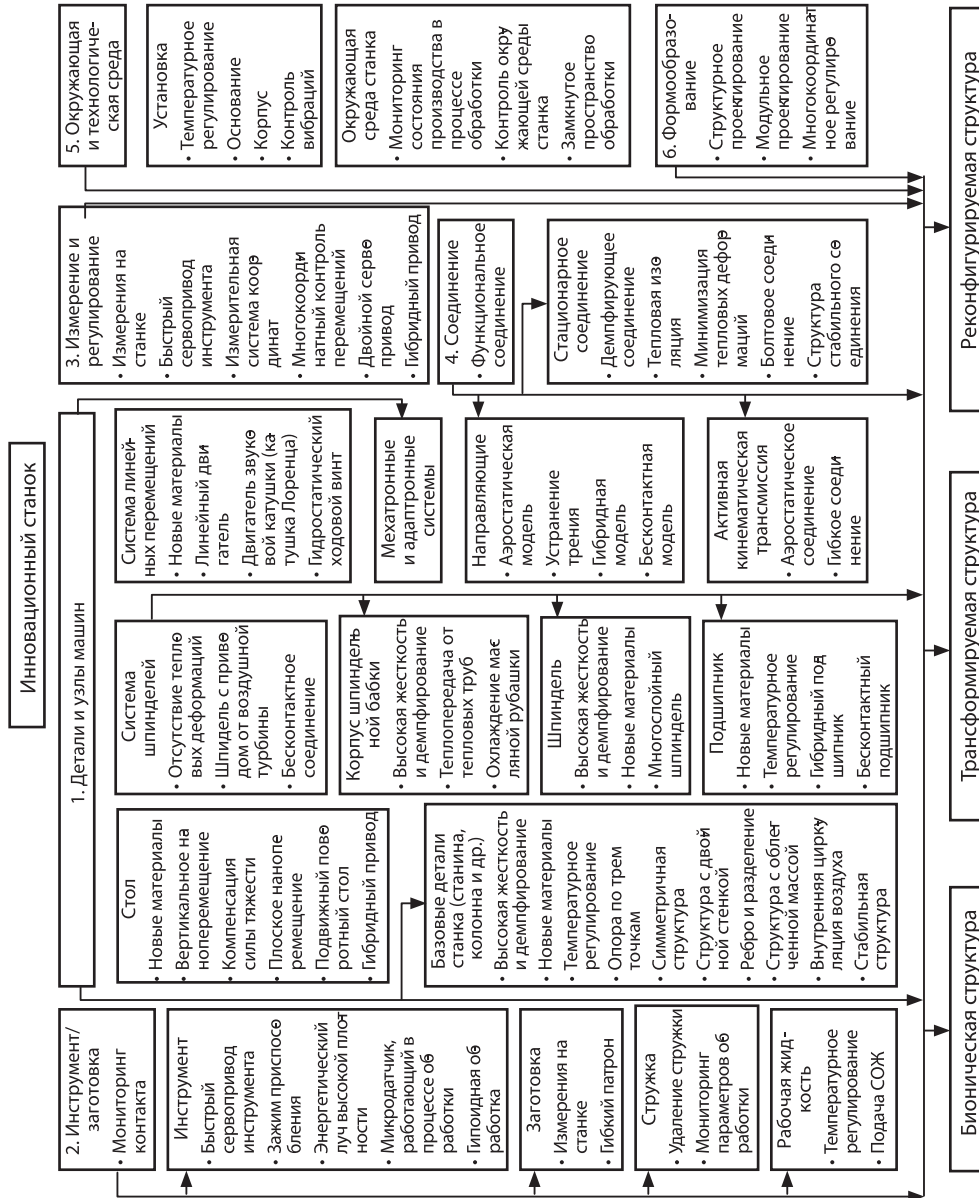


Рис. 1.12. Принципиальная структура-схема инновационного станка

Следовательно, при рассмотрении тепловых процессов, протекающих в металлорежущих станках, могут быть выделены следующие обобщенные принципиально различные классы задач:

- структурный теплофизический анализ, когда рассматриваются лишь принципиальные и наиболее существенные взаимосвязи компоновочных и конструктивных структур деталей и узлов станков и их наиболее общих тепловых и термоупругих характеристик;

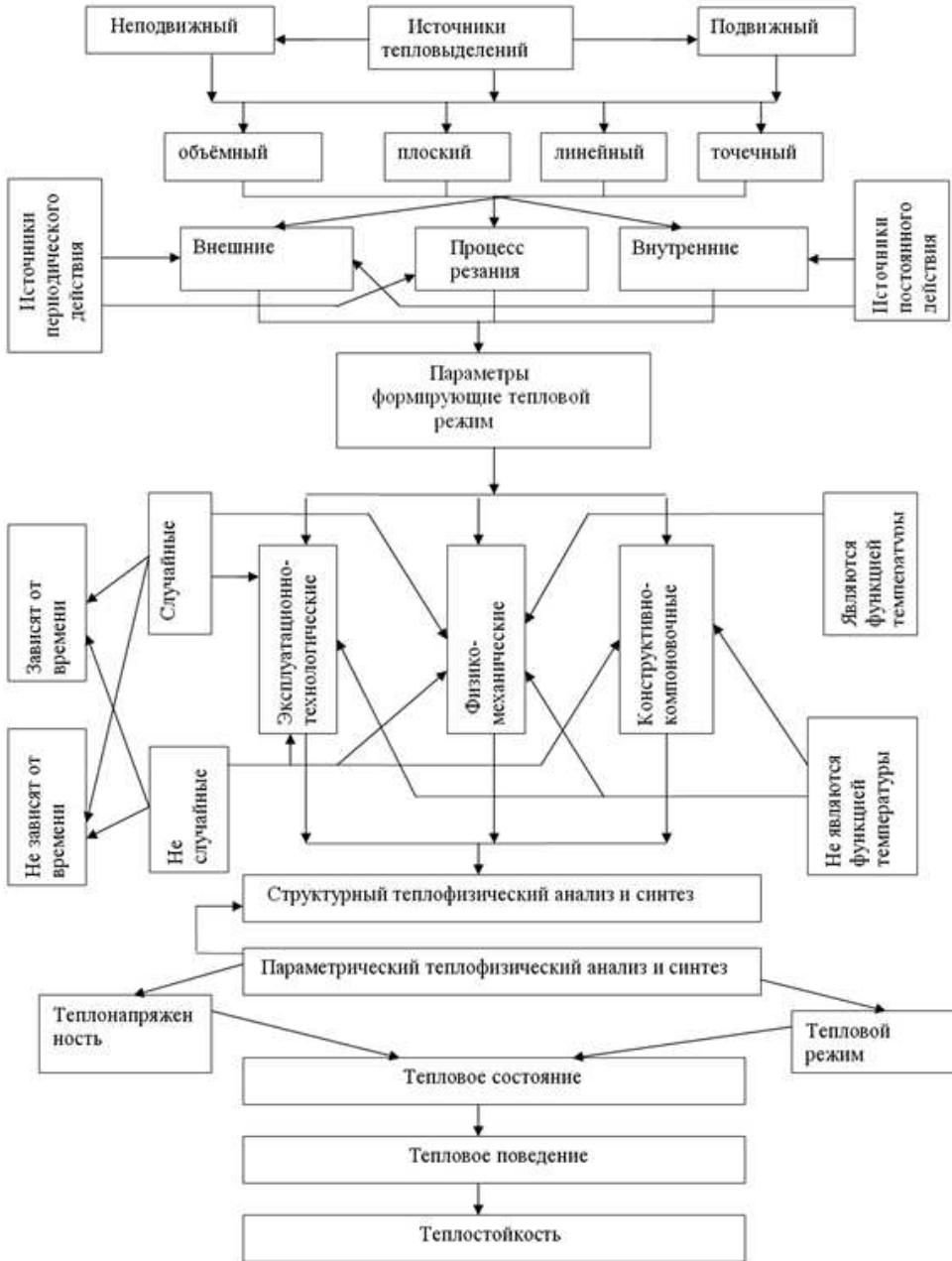


Рис. 1.13. Обобщенная схема формирования и анализа теплостойкости станка



- *структурный теплофизический синтез*, когда формируется принципиальная конструктивно-компоновочная структура станка из совокупности типовых и относительно однородных теплонагруженных деталей и узлов станка по заданным функционально обусловленным правилам их совместимости;
- *параметрический теплофизический анализ*, когда рассматривается влияние параметров и характеристик (теплофизических, термомеханических, эксплуатационно — технологических, конструктивно — компоновочных) на уровень нагрева и деформаций элементов теплофизической структуры станка, его деталей и узлов;
- *параметрический теплофизический синтез*, когда формируется и обеспечивается заданный уровень теплостойкости станка.

При решении указанных задач предполагается, что исходные данные (теплофизические, термомеханические, геометрические) являются известными величинами, значения которых получены из соответствующей нормативно-технической, справочной или иной документации, а также являются результатом обобщения экспериментальных данных. В некоторых случаях могут быть использованы оценочные значения, которые адекватно отражают характер протекающих тепловых процессов при вариантном теплофизическом анализе или синтезе металлорежущего станка.

Рассмотрение практически любой задачи по определению теплостойкости станка, проведение его структурного и параметрического теплофизического анализа (синтеза) требуют ясного представления об источниках тепловыделений, воздействующих на металлорежущий станок, их виде, характере действия и величине.

## 1.2. Характеристика источников тепловыделений в металлорежущих станках

*Источники тепловыделений* в зависимости от скорости их перемещения разделяются на неподвижные и подвижные. Критерием отнесения источника тепловыделения к подвижному или неподвижному при теплофизическом анализе может служить безразмерный критерий Пекле:

$$Pe = \frac{vl}{a}, \quad (1.1)$$

где  $v$  — скорость движения источника;  $l$  — характерный размер источника;  $a$  — коэффициент температуропроводности.

Если  $Pe = 0$ , то источник считается неподвижным, при  $0 < Pe < 10$  источник относится к подвижным, а при  $Pe > 10$  источник является быстродвижущимся, т.е. теплота не распространяется впереди источника по направлению его движения, а только под ним и позади него. Например, если источником теплообразования является перемещающаяся по направляющим шпиндельная бабка, то по величине критерия  $Pe$  этот источник при расчетах может быть отнесен к любому из перечисленных видов, хотя в большинстве случаев его можно считать и неподвижным. Это определяется постановкой задачи и возможностью ее решения в этом случае, а также зависит от требуемой точности решения. При рассмотрении нагрева ходового винта, когда источником теплообразования является пара

винт – гайка, исходя из значения величины критерия  $Re$ , этот источник может быть отнесен к подвижному или быстродвижущемуся.

При теплофизическом анализе станка реальные источники заменяются идеализированными, форма которых в той или иной степени приближается к фактической. Источники могут иметь форму пространственных тел с разными законами распределения теплоты. В зависимости от соотношения размеров источники делятся на точечные, линейные, плоские и объемные.

Точечный источник характеризуется весьма малыми размерами по отношению к рассматриваемой области тела, в котором происходят тепловые процессы. Например, тепловыделения в подшипнике могут рассматриваться как точечный источник при изучении температурного поля шпиндельной бабки станины, колонны или станка в целом.

Линейный источник характеризуется значительными размерами в одном из направлений по отношению к другим, поэтому величиной последних можно пренебречь, полагая их равными нулю.

Плоский источник характеризуется значительными размерами в двух направлениях координат по отношению к третьему, величиной которого можно пренебречь, полагая его равным нулю.

Объемный источник характеризуется соизмеримыми величинами в трех направлениях осей координат, т. е. источник теплоты распределен в некотором объеме.

Кроме этого, любой из упомянутых источников может быть ограниченным или неограниченным, за исключением точечного источника. Ограниченным и неограниченным источник может рассматриваться по одной, двум или трем координатным направлениям. Помимо этого, источники отличаются законом распределения по занимаемому ими участку поверхности, а также формой поверхности, на которой они могут быть расположены: цилиндрической, конической, плоской и т. п.

В зависимости от месторасположения по отношению к металлорежущему станку источники теплообразования делятся на внутренние и внешние. **Внутренние источники** — результат преобразования потерь энергии в тепловую в элементах, узлах, механизмах и деталях станка (электрические, гидравлические и механические потери на трение. Например, в таких элементах станка, как электродвигатели, зубчатые передачи, подшипники, муфты, ременные передачи, гидравлические цилиндры, дроссели и т. п.).

Тепло, порождаемое внутренними источниками, повышает температуру станка. В его структуре возникает переменное во времени и пространстве температурное поле, которое изменяется до тех пор, пока не будет достигнуто установившееся тепловое состояние, зависящее от количества образуемого тепла, теплоемкости станка, условий его распространения и теплообмена. При достижении установившегося состояния температурное поле становится постоянным во времени, но переменным в пространстве.

**Внешние источники** обусловлены передачей энергии от окружающих станок объектов и окружающего его среды. Причем эта передача энергии осуществляется посредством теплового излучения или теплопереноса. К внешним источникам относятся: колебания температуры фундамента и окружающей среды, воздушные потоки, системы нагрева и охлаждения, расположенные вблизи станка, солнечные лучи, непосредственно падающие на станок, смазочно-охлаждающая

жидкость и т. п. Отрицательное влияние на точность станка оказывают даже такие факторы, как скорость изменения температуры в помещении, степень равномерности распределения температуры воздуха как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

В течение рабочего дня стандартное промышленное здание подвергается циклическим температурным колебаниям. Если смотреть более широко, здание подвергается годовым колебаниям средних температурных изменений. Помимо этого, в течение рабочей смены происходит несколько изменений эксплуатационных характеристик станка. Все эти факторы приводят к возникновению изменяющихся во времени тепловых режимов конструкций станков. В конечном счете динамические колебания температуры приводят к возникновению зависящих от времени тепловых погрешностей, которые с трудом поддаются описанию.

*Окружающая среда производственного помещения.* Промышленное здание обычно подвергается изменениям температуры, влажности и атмосферного давления, вызываемым изменениями климатических условий. Состояние воздуха в помещении обычно является или слоистым, или конвективным. Помимо этого, дополнительное тепловыделение вызывается солнечным излучением и воздействием осветительного оборудования. Комбинация этих факторов приводит к возникновению сложного теплового режима и температурным деформационным характеристикам.

*Производственный персонал.* Прямой контакт между людьми и станком приводит к изменению тепловых характеристик станка. Более того, при работе с высокоточным оборудованием и при проведении операций измерения тепловое излучение от персонала становится существенным фактором ухудшения качества работы.

*Тепловая память от предшествующей окружающей среды.* Изменение теплового режима станка происходит за определенный период времени. Очень часто заготовки последовательно обрабатываются в нескольких цехах с различными тепловыми режимами (в соответствии с технологическими требованиями). Из-за этого в заготовке может образовываться повышенное тепловыделение. Данная тепловая память может быть удалена при помощи вентилирующих установок, масляных ванн и т. п.

В качестве иллюстрации влияния изменения температуры окружающего воздуха на тепловой режим станка на рис. 1.14 приведены экспериментальные исследования теплового режима фрезерного станка в части влияния температуры окружающей среды  $T_b$  на тепловые деформации колонны, шпинделя и их температур соответственно. Причем показано влияние не только роста температуры воздуха, но и ее резкое изменение. В работе [37] показано, что при колебании температуры окружающей среды по синусоидальному закону избыточная температура  $T_d$  детали металлорежущего станка с равномерным распределением массы изменяется также по синусоидальному закону, но с уменьшенной амплитудой в  $\cos \beta$  раз и со сдвигом фаз  $\beta$ :

$$T_d = T_a \cos \beta \cos(\omega\tau - \beta), \quad (1.2)$$

где  $\tau$  — время в часах;  $\omega = 2\pi/t$ ,  $t$  — период колебания температуры в часах,  $\beta = \arctg(\omega/m)$ ;  $m = \alpha F(1 + \psi)/cG$ ,  $\psi$  — учитывает долю тепла, передаваемую в сопряженные детали,  $c$  — удельная теплоемкость,  $G$  — вес детали.

В работе [87] приведены исследования (рис. 1.15) изменения температуры окружающего воздуха, температурных деформаций, в частности смещений оси шпинделя (рис. 1.15, а) в направлениях  $OY$ ,  $OZ$ , и распределение температур (рис. 1.15, б) деталей станка при наблюдении за указанными параметрами в течение трех суток. Отмечается, что время запаздывания изменения температурных деформаций по отношению к изменению температуры окружающего воздуха, например, в направлении  $OZ$  составляет около 5 часов, а в направлении  $OY$  — в пределах 4 часов. При этом градиент температур в конструкции станка составляет немногим более  $1^\circ\text{C}$ .

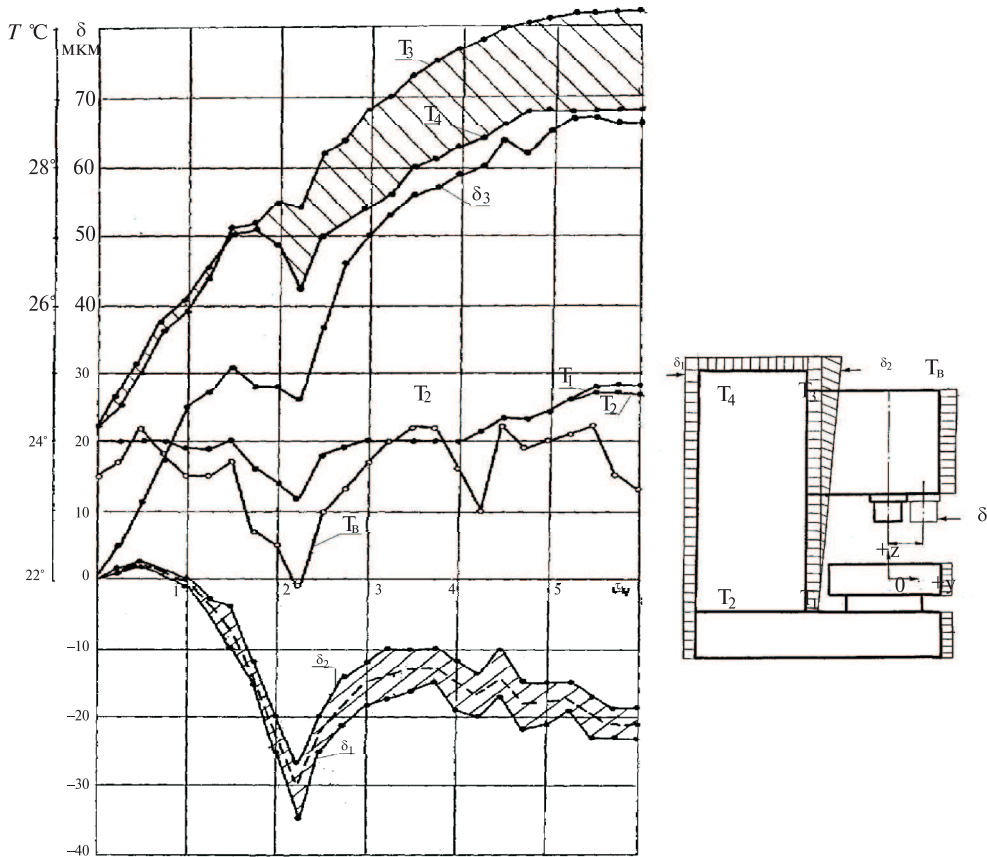


Рис. 1.14. Влияние изменения температуры воздуха на тепловой режим фрезерного станка

Для качественной оценки и выбора степени влияния различных *внутренних источников* тепловыделений проводились работы по определению как значений величин тепловых потерь, так и их соотношений для различных металлорежущих станков. Например, в работе [127] для токарного станка модели SN380 (рис. 1.16) дается взаимное соотношение тепловых потерь в теплонагруженных деталях, узлах и механизмах, что позволило проводить моделирование методом конечных элементов тепловых деформаций и температур новых проектируемых токарных станков, обеспечивая тем самым эквивалентность соотношений тепловых потерь по величине, их взаимному положению и соотношению между ними.

В работе [125] приведены виды потерь (рис. 1.17, а) подводимой к станку мощности, их абсолютная величина и долевые соотношения при резании (для конкретной реализации процесса резания с заданными скоростью резания, глубиной и подачей). Указывается, что только 67,4% подводимой мощности расходуется на процесс резания, из которой 56,8% энергии аккумулируется в стружке и затрачивается на процесс резания. Следовательно, потери в станке составляют более 30% подводимой энергии.

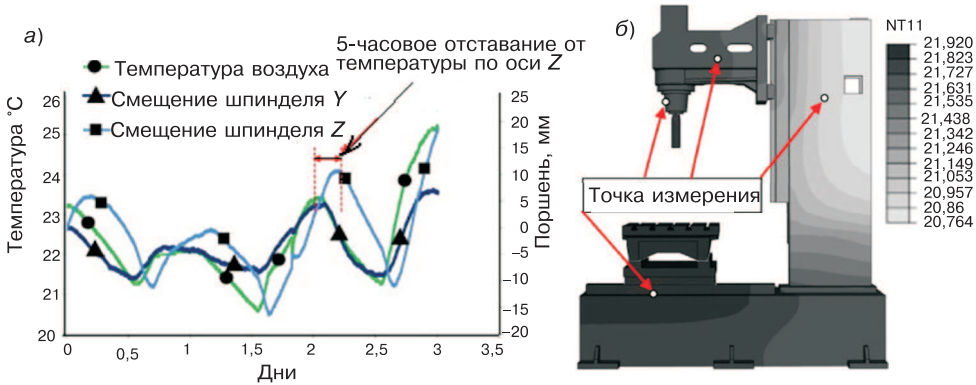


Рис. 1.15. Взаимосвязь изменения температуры воздуха и деформаций станка [87]

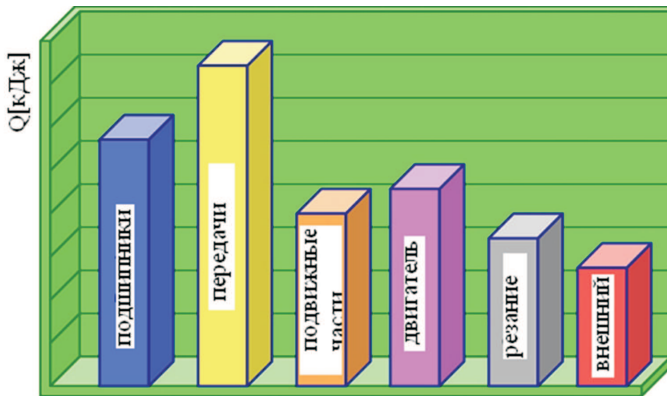


Рис. 1.16. Соотношение тепловыделений токарного станка [127]

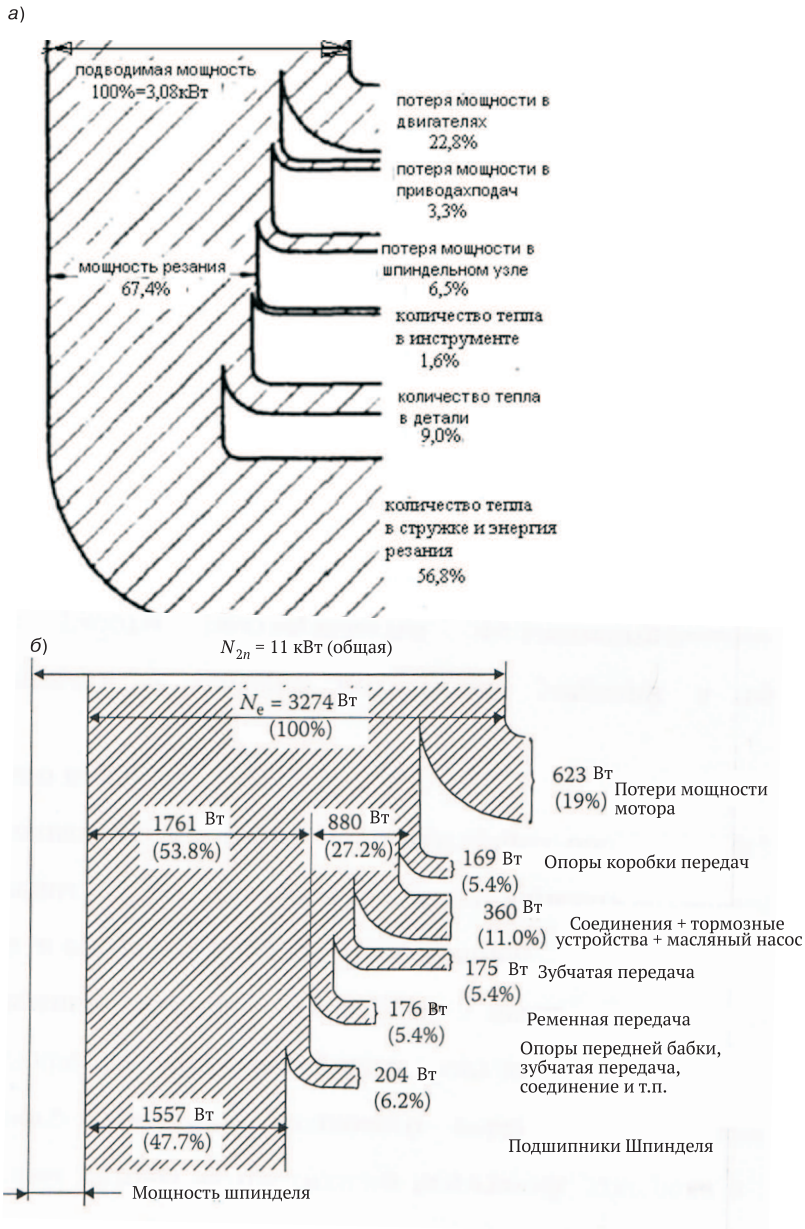


Рис. 1.17. Потери подводимой мощности при резании — а) [125]; потери в приводе станка — б) [120]

Более детальное исследование потерь [120] подводимой к станку энергии в подвижных и вращающихся деталях и узлах металлорежущего станка (рис. 1.17, б) при его работе на холостом ходу и при частоте вращения шпинделя равной  $1800 \text{ мин}^{-1}$ . Отмечается, что более 30% подводимой энергии превращается в тепловую в подвижных и вращающихся деталях и узлах привода вращения шпинделя (без учета потерь в механизмах приводов линейных перемещений), из которых в шпинделе преобразуется в тепловую энергию до 50% всех потерь привода вращения, что очевидно составляет порядка 15% подводимой к станку мощности.

Таким образом, разными исследователями и в разное время испытаний получены практически сопоставимые результаты потерь энергии в деталях, узлах и механизмах металлорежущих станков.

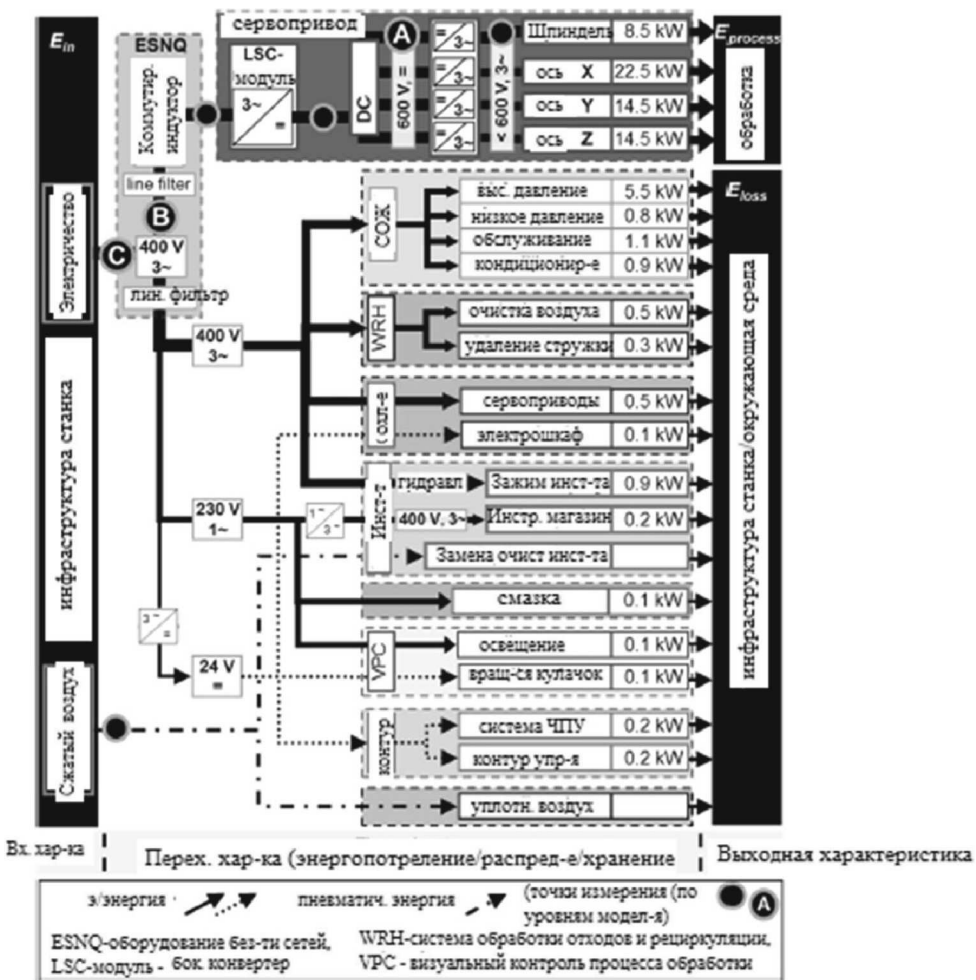


Рис. 1.18. Энергопреобразования фрезерного станка с ЧПУ [142]

В процессе структурного анализа осуществляется создание и систематизация энергопреобразующей систем станка (см. рис. 1.18) и производится численный

анализ ее энергетических составляющих. Сначала в соответствии с принципом экопроектирования (см. стандарт ISO 14955-1) дается функциональное описание станка (без учета процессов обработки).

Это позволяет разделить энергопреобразование как по функциям, так и по энергопреобразующим узлам и механизмам станка. Далее составляется система энергопреобразований в станке, например, как это приведено на рис. 1.14 для фрезерного станка с ЧПУ [142]. На рис. 1.19 приведена структура энергопотребления [142] различных функциональных узлов фрезерного станка с ЧПУ. Так, энергия процесса резания (пластического деформирования) составляет в данном случае только 14% от подводимой к станку энергии, а узел сервопривода (часть энергии формообразования) потребляет 40%.

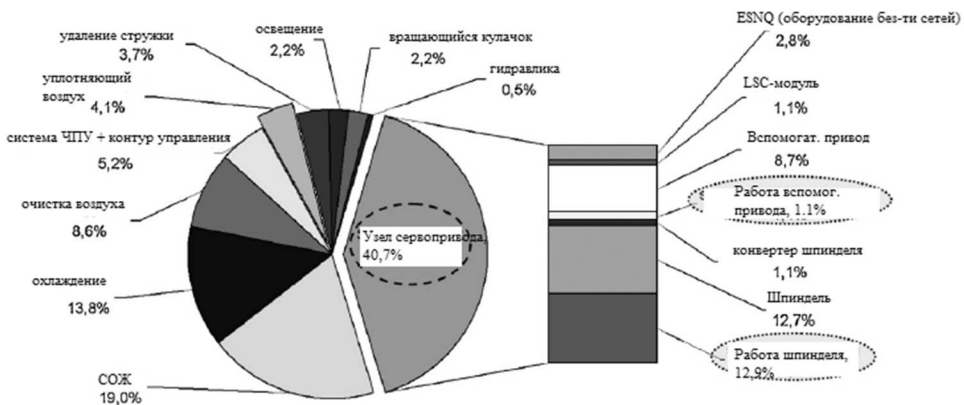


Рис. 1.19. Структура энергопотребления различных функциональных узлов фрезерного станка с ЧПУ [142]

Таблица 1.5. Удельная энергоемкость видов обработки [129]

Вид обработки	Физический процесс	Удельная энергоемкость $\text{кВт}/(\text{см}^3/\text{с})=\text{кДж}/\text{см}^3$
Точение	Пластическая деформация	1–10
Фрезерование	Пластическая деформация	1–10
Абразивная резка	Плавление	10–30
Черновое шлифование	Плавление	20–60
Чистовое шлифование	Плавление	60–200
Электроэрозионная	Испарение	100–1000
Электрохимическая	Ионизация	500–2000
Лучевая	Ионизация	100–3000

Кроме перечисленных внешних и внутренних источников тепловыделений существует еще один вид источника — сам *процесс резания*, при котором механическая энергия также преобразуется в тепловую и которая передается обрабатываемой заготовке, инструменту и стружке, а также частично уносится с охлаждающей жидкостью. В табл. 1.5 приведены данные удельной энергоемкости различных видов обработки [129] на металлорежущих станках, которые и определяют параметры энергии резания для различной производительности —



скорости съема материала. Образующееся тепло может сообщаться элементам станка, находящимся с ними в непосредственном контакте, что дестабилизирует тепловой режим станка.

Одним из показателей эффективного осуществления процесса обработки является удельная работа резания, т. е. отношение работы резания к объему срезаемого металла. Удельная работа резания зависит (табл. 1.6), как показано в [53], от режимов резания, скорости резания, площади сечения срезаемого материала, геометрии инструмента и поэтому изменяется в широких пределах для каждого способа обработки и внутри одноименного способа.

**Таблица 1.6.** Технические показатели способов обработки

Способ обработки	Площадь сечения срезаемого слоя, мм <sup>2</sup>	Удельная работа резания, кДж/см <sup>3</sup> = кВт/(см <sup>3</sup> /с)	Скорость резания, м/с	Производительность, см <sup>3</sup> /с
Точение	1,0	0,5–0,7	1,5–7,5	0,05–50
Протягивание	0,5	2,5–3,7	0,01–1,0	0,004–0,1
Фрезерование	0,3	5,0–7,5	2–6	0,002–1,0
Развертывание	0,1	12–30	0,15–1,6	0,005–0,5
Шлифование	0,5 · 10 <sup>-4</sup>	55–70	25–50	0,005–0,02

В работе [118] отмечается следующее соотношение распределения энергии при резании:

- 7% м — тепло, поступающее в деталь;
- 18% — тепло, поступающее в инструмент;
- 75% — тепло, уносимое стружкой и охлаждающей жидкостью.

Для станков типа HSM (High Speed Mashine), предназначенных для высокоскоростной обработки, когда до 80% выделяемой при резании энергии обусловлено механической деформацией стружки, соотношение распределения энергии при резании имеет следующий вид:

- 3%–5% м — тепло, поступающее в деталь;
- 17%–20% — тепло, поступающее в инструмент;
- 75%–80% — тепло, уносимое стружкой и охлаждающей жидкостью.

Следовательно, потери энергии при резании в основном выводятся из процесса теплообмена с узлами и деталями металлорежущего станка. Однако в некоторых случаях, когда требования к точности обработки достаточно высокие, тепло из зоны резания, передаваемое излучением, передаваемое стружкой, которая не может быть удалена мгновенно, приводит к нагреву деталей станка, находящихся в непосредственной близости. Это приводит к нагреву, уровень которого может быть значим для появления температурных деформаций, обусловленных этим фактором.

**По времени действия** в период работы станка источники тепловыделений можно разделить на источники постоянного и периодического действия. Сам процесс резания и некоторые внешние источники (например, солнечный луч, падающий на станок) являются источниками периодического действия. Температура окружающей среды (как характеристика теплового уровня окружающей

среды), если не принимать специальных мер, может быть источником постоянного действия. При включении станка в период его непрерывной работы такие его элементы, как электродвигатели, зубчатые и ременные передачи, подшипники вращающихся и движущихся деталей и др., являются источниками постоянного действия. При отключении станка источники постоянного действия прекращают выделять тепло, а источники периодического действия продолжают воздействовать на всю структуру станка.

В теплофизических расчетах время функционирования источника описывают безразмерным критерием Фурье  $Fo = a \cdot t/L^2$ . По времени функционирования источники можно разделить на:

- 1) мгновенные ( $Fo \rightarrow 0$ );
- 2) действующие в течение конечного промежутка времени;
- 3) действующие периодически;
- 4) действующие столь длительное время, что процесс теплообмена можно считать стационарным. Предельные значения критерия  $Fo$ , соответствующие переходу от нестационарного к стационарному теплообмену, зависят от конкретной теплофизической обстановки в зоне обработки. Мгновенных источников на практике не существует, но в некоторых технологических процессах тепловыделение происходит столь кратковременно, что длительностью этого импульса можно пренебречь. Мгновенный источник используется как некоторая абстракция, позволяющая конструировать математические выражения для описания в сложных случаях.

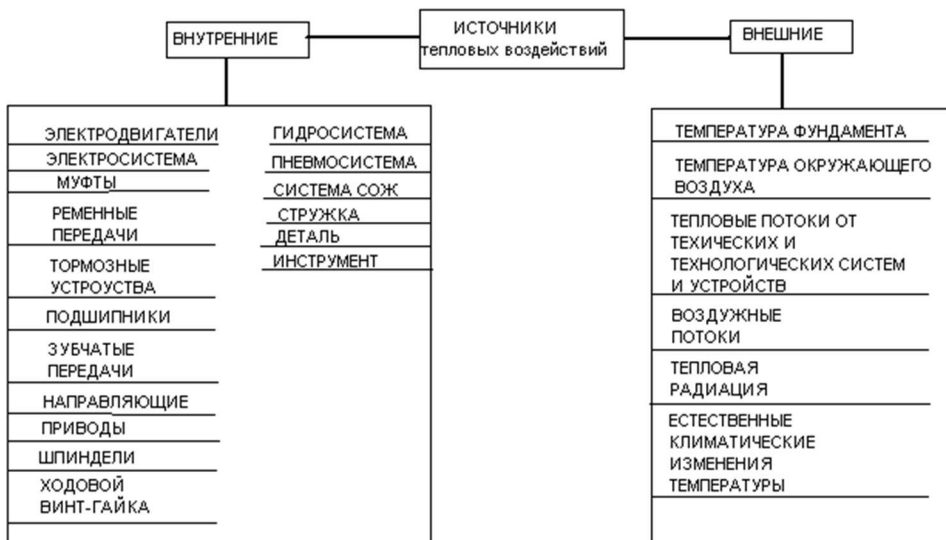


Рис. 1.20. Виды источников тепловыделений в металлорежущих станках

Все описанные источники (рис. 1.20) могут иметь случайную или неслучайную природу, в смысле их количественной оценки, а некоторые внешние источники проявляют только случайные воздействия.

Воздействие совокупности источников тепловыделений вызывает и обуславливает тепловую неустойчивость всей теплофизической структуры станка. Величина теплостойкости станка зависит и определяется параметрами, формирующими тепловой режим станка и обуславливается свойствами его термоупругой структуры. К таким параметрам относятся: конструктивно-компоновочные, физико-механические, теплофизические, эксплуатационно-технологические.

### 1.3. Конструктивные и компоновочные решения станков и их тепловой режим

*Конструктивно-компоновочные параметры* характеризуют размещение и взаимную ориентацию источников тепловыделений, узлов, деталей и элементов станка, их форму и геометрические размеры, массу, способы сопряжения, кинематические, геометрические и жесткостные свойства и т. п.

В табл. 1.7 приведены виды источников тепловыделений, их теплонапряженные узлы и детали, особенности и соотношение их компоновочного взаимного относительного расположения, что формирует и определяет тепловой режим металлорежущего станка.

**Таблица 1.7.** Виды доминирующих тепловых источников и их взаимное размещение в металлорежущих станках

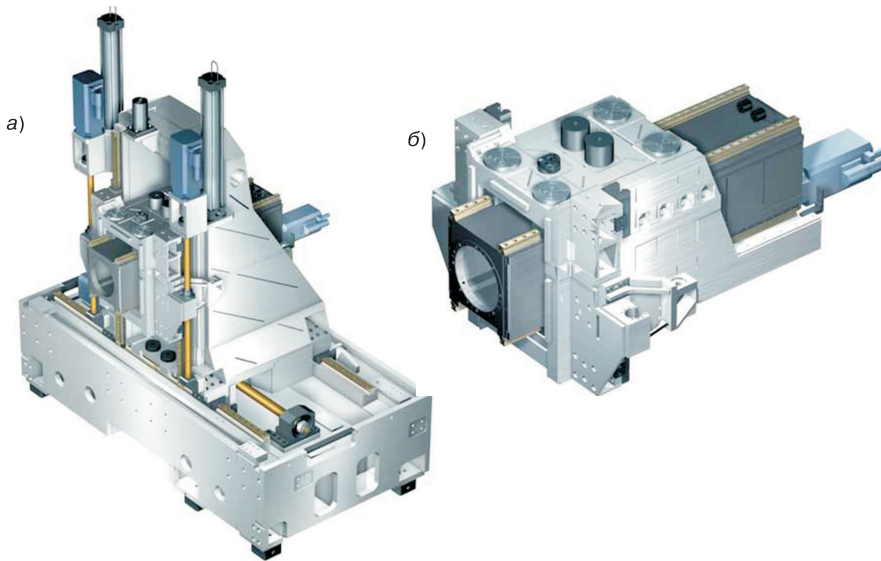
Базовая деталь		Шпиндель и его опоры				Шпиндельная бабка						Коробка скоростей			Ходовой винт и его опоры	
		П		Н		Вне Сбоку		Вне Сверху		Внутри		Вне	Внутри	Сверху		
		Г	В	Г	В	П	Н	П	Н	П	Н					
Станина	Н															1
Колонна	П															
	Н		1			1								1		1
Портал	П															
	Н															

*Примечание:* В — вертикальный, Г — горизонтальный, Н — неподвижный, П — подвижный.

Точечные источники, источники, которые расположены и распределены по замкнутому объему узла, например в корпусе коробки скоростей, корпусе шпиндельной бабки и т. п. объединены [122, 15, 52] как совокупность действующих источников в виде «эквивалентного» источника, который формирует тепловой режим станка, являясь совокупным тепловым фактором для базовых деталей станка. При этом каждый источник в отдельности не является доминирующей величиной. К таким источникам относятся зубчатые передачи, муфты, подшипники промежуточных валов и т. п. В то время, как подшипники шпинделя, шарикового винта и его опоры являются самостоятельными и существенными факторами теплового воздействия.

В табл. 1.7 в рассмотрение приняты только те источники, которые по вышеприведенным данным и их соотношениям составляют доминирующую часть всех видов тепловыделений.

В качестве примера подвижного шпинделя и шпиндельной бабки на рис. 1.21, *а* приведена компоновка станка модели серии PS 630 компании Krause & Mauzer с подвижной колонной, а конструктивные особенности компоновки и расположения подвижного шпинделя этого же станка приведены на рис. 1.21, *б*, к тому же в этом случае и шпиндельная бабка расположена внутри колонны.



**Рис. 1.21.** Расположение тепловых источников в станках модели PS 630 с вертикальной колонной компании Krause & Mauzer и компоновки многофункциональных станков компании Mori Seiki

На рис. 1.21, *в* приведен пример [51] энергонасыщенного станка с подвижной шпиндельной бабкой компании Mori Seiki, а на рис. 1.21, *г* — компоновки станков этой же компании, где источники тепловыделений наибольшей интенсивности также сосредоточены в шпиндельной бабке. Эти компоновки станков иногда называют системой «box in box». Это, с одной стороны обеспечивает минимизацию расположения в объеме станка доминирующих источников, а с другой стороны такая концентрация теплонапряженных узлов создает мощный сосредоточенный источник тепловыделений. Оценка целесообразности такого решения с точки зрения теплового режима требует соответствующего моделирования и оценки.

Для более полного описания теплового облика металлорежущих станков важным аспектом является компоновочное решение шпиндельного узла с устройством изменения скорости вращения шпинделя (коробкой скоростей станка), так как эти узлы являются наибольшими источниками тепловыделений.

В работе [142] для современных металлорежущих станков приведены схемы компоновочных решений и построения шпиндельного узла в сочетании с коробкой скоростей и некоторые их качественные параметры и характеристики.

В качестве частного случая и на основании данных табл. 1.7 (в таблице цифрами 1 отмечены источники тепловыделений, принятые к рассмотрению) приведем пример построения и классификации (рис. 1.22) металлорежущих станков с вертикальной колонной [122, 15] по расположению доминирующих источников

тепловыделений. Это, как указано на рис. 1.22, приводит к разным видам доминирующих смещений оси шпинделя, обусловленных тепловыми деформациями станка.

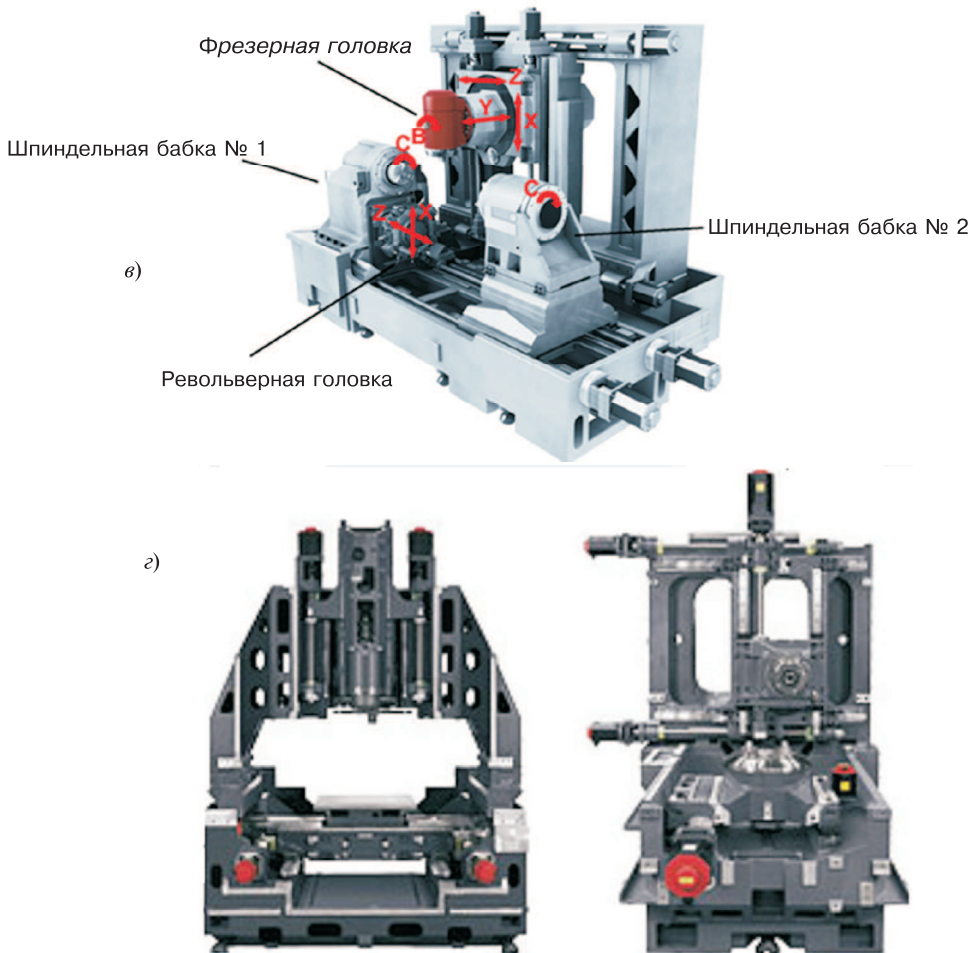


Рис. 1.21 (окончание).

Таким образом, структурно-схематический подход, представленный в виде таблицы вариантов решений (табл. 1.7) взаимного относительного расположения доминирующих теплонапряженных и тепловыделяющих узлов и деталей станка, позволяет формировать множество тепловых моделей для анализа теплового режима металлорежущих станков, проводить их классификацию и т. п.

Следует также заметить, что на современных металлорежущих станках, в частности на обрабатывающих центрах и многофункциональных станках, выполняются самые разнообразные виды обработки металлов резанием (например, точение и фрезерование) и наблюдается тенденция к увеличению их энергоемкости, максимально возможной концентрации технологических операций и процессов (многофункциональные станки) при достижении максимально возможной скорости и точности обработки.

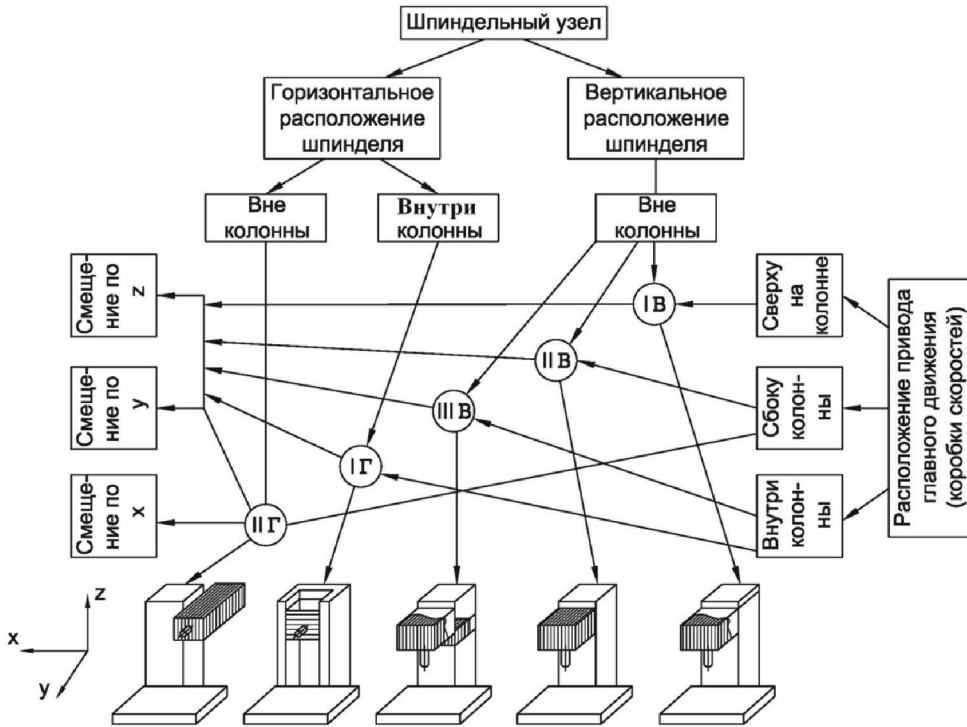


Рис. 1.22. Классификация станков с вертикальной колонной по видам расположения тепловых источников

В качестве примера энергонасыщенных станков на рис. 1.23–1.25 приведены компоновочные решения токарно-фрезерных центров серии GMS компании Goodway Machine Corp., Multus компании OKUMA и серии NTX компании DMG/Mori Seiki соответственно.

На рис. 1.26 показан пример компоновочного решения пятикоординатного станка, в котором разделены функции перемещений инструмента и детали, закрепленной во вращающемся  $\Gamma(L)$ -образном столе в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Наибольшее распространение компоновок 5-координатных станков получили компоновки, в которых вращающиеся столы расположены как единый комплекс на столе фрезерного станка традиционной компоновки (рис. 1.27).

Создание многофункциональных многокоординатных металлорежущих станков приводит и обуславливает необходимость применения дополнительных узлов и механизмов, таких как, например вращающиеся столы (часто применяемые в пятикоординатных станках). Это, в свою очередь, увеличивает количество источников тепловыделений и как создает дополнительные источники нагрева, так и приводит к новым источникам тепловых деформаций, которые изменяют привычную теплофизическую структуру металлорежущего станка [124], тем самым усложняя взаимодействие теплоактивных структурных составляющих станка и обуславливает большее разнообразие изменения во времени теплового поведения [119, 14, 15] узлов и деталей, формирующих точность взаимного относительного