

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Технология машиностроения»

В.И. Гузеев, Г.И. Буторин, В.Ю. Шамин

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
МЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Электронное учебное пособие



ISBN 978-5-696-04382-1

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

УДК 621.9(075.8)+621.81(075.8)  
Г937

*Одобрено учебно-методической комиссией  
механико-технологического факультета*

*Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Карасев А.П.,  
канд. техн. наук, Котомин М.Н.*

**Гузеев, В.И.**

Г937

Прогнозирование точности и качества при проектировании технологических процессов механической обработки [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие / В.И. Гузеев, Г.И. Буторин, В.Ю. Шамин. – Электрон. текст. дан. (1,94 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 1 электрон. опт. диск (DVD); 12 см – Системные требования: РС не ниже класса Pentium I; ОЗУ 512 Mb; ОС Windows 2000/XP/Vista/7; Adobe Acrobat Reader; DVD-ROM дисковод. – Загл. с экрана.

В учебном пособии рассматриваются вопросы экспериментального и аналитического прогнозирования точности и качества деталей машин. Учтены стандарты, вышедшие за последние годы.

Учебное пособие может быть использовано студентами всех форм обучения для направления 150900, 221400 и других направлений и специальностей машиностроительного профиля.

Учебное текстовое электронное издание

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	<u>ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА И ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ</u>	
1.1.	<u>Общие понятия о качестве изделий</u>	5
1.2.	<u>Точность механической обработки деталей на станках и методы ее достижения</u>	7
1.3.	<u>Погрешности обработки и основные источники их возникновения</u>	9
1.3.1.	<u>Приближенность реальной кинематической схемы обработки к идеальной кинематической схеме</u>	10
1.3.2.	<u>Приближенность реального профиля режущего инструмента к идеальному профилю</u>	12
1.3.3.	<u>Неточности станка, приспособления и их износ</u>	12
1.3.4.	<u>Неточность исполнительного размера и размерный износ режущего инструмента</u>	14
1.3.5.	<u>Деформации в технологической системе от действия силы резания и усилий закрепления</u>	17
1.3.6.	<u>Погрешности, вызываемые температурными деформациями технологической системы</u>	22
1.3.7.	<u>Погрешности, вызываемые деформацией деталей под действием внутренних напряжений</u>	25
1.3.8.	<u>Настройка станков на размер и погрешности, связанные с неточностью настройки</u>	27
1.3.9.	<u>Погрешности измерений</u>	28
1.3.10.	<u>Достижимая и экономическая точность обработки на станках</u>	29
1.4.	<u>Расчет погрешностей обработки</u>	
1.4.1.	<u>Методы прогнозирования точности</u>	30
1.4.2.	<u>Систематические и случайные погрешности</u>	30
1.5.	<u>Методы исследования точности обработки</u>	32
1.5.1.	<u>Метод кривых распределения</u>	32
1.5.2.	<u>Анализ точности обработки партии деталей с помощью кривых распределения</u>	33
1.5.3.	<u>Рассеяние размеров при действии доминирующих факторов</u>	44
1.5.4.	<u>Метод точечных диаграмм</u>	45
1.6.	<u>Точность обработки на настроенных станках</u>	46
2.	<u>КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</u>	
2.1.	<u>Понятие о качестве поверхности</u>	51
2.2.	<u>Критические оценки шероховатости поверхности</u>	51
2.3.	<u>Волнистость поверхности</u>	54
2.4.	<u>Макроотклонения</u>	54
2.5.	<u>Влияние методов и режимов обработки на шероховатость</u>	55
2.5.1.	<u>Материал заготовка</u>	55

2.5.2.	<a href="#">Метод обработки и режимы резания</a> .....	56
2.5.3.	<a href="#">Геометрия режущего инструмента</a> .....	57
2.5.4.	<a href="#">Жесткость технологической системы</a> .....	57
2.5.5.	<a href="#">Смазывающе-охлаждающая жидкость</a> .....	57
2.6.	<a href="#">Причины возникновения волнистости и погрешностей формы</a> .....	58
2.7.	<a href="#">Состояние поверхности слоя</a> .....	59
2.8.	<a href="#">Влияние процессов резания лезвийным инструментом на изменения поверхностного слоя сталей твердостью HRC&lt;40 единиц</a> .....	61
2.9.	<a href="#">Влияние процессов шлифования на изменение поверхностного слоя сталей HRC&gt;40 единиц</a> .....	63
2.10.	<a href="#">Методы исследования поверхностного слоя</a> .....	67
2.11.	<a href="#">Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей</a> .....	69
2.12.	<a href="#">Технологическое обеспечение требуемых эксплуатационных качеств деталей машин</a> .....	72
2.13.	<a href="#">Прогнозирование глубины изменения поверхностного слоя при проектировании технологических процессов</a> .....	73
	<a href="#">БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</a> .....	77

# 1. ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА И ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБАТЫВАЕМЫХ НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

## 1.1. Общие понятия о качестве изделий

Для того чтобы изделие экономично выполняло свое служебное назначение, оно должно обладать необходимым для этого качеством.

**Качество продукции** – совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

К основным показателям качества изделия можно отнести безотказность функционирования, долговечность, производительность, коэффициент полезного действия, точность сопряжений, уровень шума, безопасность, удобство и простоту обслуживания, степень механизации и автоматизации и т.д.

Количественное значение показателей качества может устанавливаться либо на стадии разработки проектного задания как уровень, к которому необходимо стремиться при проектировании изделия, либо в процессе проектирования рассчитывается как результат, полученный при разработке данной конструкции. Измеренное значение показателей качества устанавливается в результате проведения заводских испытаний изделия или контрольных промеров. При этом измеренное значение каждого показателя качества может иметь множество значений в некотором интервале при условии, если было изготовлено не одно изделие, а партия. Действительные показатели качества выявляются в результате наблюдения и изучения работы изделий в условиях эксплуатации. Действительные показатели качества тоже имеют некоторый интервал значений, однако, как показывает опыт, интервал этот больше по сравнению с интервалом измеренных значений. Чем меньше интервал значений показателей качества изделия, тем стабильнее его качество.

Качество изделия складывается из качества деталей, его составляющих и качества соединения этих деталей. Одним из наиболее важных показателей качества деталей считают точность их изготовления.

**Под точностью детали понимают степень ее приближения к геометрически правильному ее прототипу.** По-видимому, под геометрически правильным прототипом можно представить деталь, которая, работая в узле в сопряжении с деталями также геометрически правильно выполненными, обеспечивает максимальную долговечность изделия. Каждая деталь есть совокупность поверхностей. Понятие точности детали складывается из точности расстояний между поверхностями, точности относительного расположения поверхностей и точности самих поверхностей. Изготовить деталь, а тем более партию деталей, каждая из которых соответствовала бы геометрически правильному прототипу, невозможно. Поэтому на каждый показатель точности детали устанавливается некоторый интервал значений, который называют допуском, и величина которого обосновывается, исходя из служебного назначения детали.

[К оглавлению](#)

При простановке размеров на чертежах на каждый из них устанавливается допуск в направлении самого размера. При задании взаимного расположения поверхностей, примерами которого могут быть отклонения от параллельности, соосности, перпендикулярности, торцовое и радиальное биение и т.д., часто указывается участок поверхности детали, где устанавливается допустимое отклонение.

Например, биение торцовой поверхности относительно оси центров вала на радиусе 50 мм в пределах 0,1 мм.

Точность поверхности задается и определяется обычно как отклонение от идеальной поверхности в направлении по нормали к самой поверхности. Допустимые отклонения на точность изготовления поверхностей могут задаваться как допуск прямолинейности, допуск круглости, допуск плоскостности и т.д. Кроме того, они могут быть заданы как волнистость и шероховатость.

Между показателями качества существует связь. В технологической практике, в большинстве случаев, эти связи устанавливают на качественном уровне, поскольку каких-либо функциональных связей между количественным значением показателей качества не установлено. Так, отклонения формы поверхности могут оказывать влияние на точность размера и точность взаимного расположения поверхностей. Последние, в свою очередь, также могут оказывать влияние на точность формы поверхности.

Будучи соединенными, в узел или машину, детали формируют их качественные показатели:

- точность относительного движения исполнительных органов машины;
- точность расстояний между исполнительными поверхностями;
- точность относительного расположения исполнительных поверхностей;
- точность геометрических форм исполнительных поверхностей;
- шероховатость исполнительных поверхностей.

Кроме перечисленных показателей, в практике используется еще ряд показателей качества деталей. Например, физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей (микротвердость, знак и величина напряжений и т.д.), которое определяют износостойкость и долговечность машины; коэффициент полезного действия, который характеризует как совершенство конструкции машины, так и уровень технологии изготовления машины; стоимость эксплуатационных расходов, стоимость ремонтных расходов и др. В настоящее время на основные показатели качества изделия (машины) устанавливаются нормы с указанием величины их колебания в виде допуска или предельного значения.

Для изделий, выпускаемых в больших количествах, нормы качества могут быть указаны в специально разработанных отраслевых документах в виде технических условий на выпуск изделия или в виде государственных стандартов. Так, имеются стандарты на выпуск различных изделий электротехнической промышленности (электролампы, выключатели, счетчики и т.д.). В приборостроении это могут быть – диоды, сопротивления, конденсаторы и т.д.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

В инструментальной промышленности имеются стандарты на сверла, метчики, фрезы, абразивные круги и т.д. Разработаны стандарты и на некоторые ответственные детали машин – коленчатые валы и т. д.

Отклонение величины показателя качества от его расчетного значения называют погрешностью данного показателя.

Одной из задач технологии машиностроения является прогнозирование (расчетным способом) величины интервала значений показателей качества. Для этого используются два метода. Расчетно-аналитический, который применяется на стадии проектирования машины, и статистический, выполнить который можно после запуска изделия в производство, используя информацию, полученную в результате замеров при эксплуатации и испытании машины.

При разработке и внедрении в действующее производство любого технологического процесса необходимо предусмотреть большое количество различных факторов. Если рассмотреть операции механической обработки детали, то при ее осуществлении участвуют станок, приспособление, режущий и вспомогательный инструменты, заготовка детали, рабочий, наладчик, охлаждающая жидкость и так далее. Все эти факторы не остаются постоянными в течение обработки партии деталей, именно поэтому и образуется различие в показателях качества между деталями, обработанными в одинаковых исходных условиях.

## **1.2. Точность механической обработки деталей на станках и методы ее достижения**

Точность механической обработки деталей на станках – это степень соответствия реальной поверхности обработанной детали идеальной схеме обработки, положенной в основу данного метода. Точность обработки – понятие чисто технологическое, характеризующее каждый из методов обработки: фрезерование; точение; сверление и т.д.

Задача конструкторов и технологов состоит в том, чтобы обеспечить необходимую точность деталей при наименьшей себестоимости их изготовления или при условии выполнения заданной производительности (программу выпуска).

Точность обработки есть понятие комплексное. При изготовлении деталей на станках заданная точность может быть достигнута следующими двумя методами:

- а) методом индивидуального получения заданных размеров и формы обрабатываемых поверхностей (метод пробных проходов), т.е. обработкой на универсальных ненастроенных станках с ручным управлением;
- б) методом автоматического получения формы и размеров обрабатываемых поверхностей, т.е. на настроенных станках с автоматическим циклом обработки.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Первый метод применяется главным образом в единичном и мелкосерийном производстве и, как правило, связан с предварительной разметкой заготовки перед обработкой. Припуск под обработку (слой металла, подлежащий удалению) в большинстве случаев снимают за несколько технологических переходов или рабочих ходов инструмента. После каждого рабочего хода деталь измеряют и постепенно, с каждым новым ходом, приближаются к заданному размеру. Обычно первые ходы выполняют не на всю длину обрабатываемой поверхности и лишь после "приближенного" нужного размера производят обработку всей поверхности. Этот метод крайне непроизводителен, а точность обработки почти целиком зависит от квалификации рабочего.

При обработке деталей по второму методу – полностью исключается разметка заготовок и выверка их положения при установке на станок. Сущность метода автоматического получения размеров легко проиллюстрировать на примере, изображенном на рис. 1.1.

На столе станка помещается специальное приспособление, обеспечивающее нужную установку детали относительно режущего инструмента (в данном случае фрезы). Само приспособление при этом устанавливается относительно шпинделя станка таким образом, чтобы выдерживались размеры «h» и «d». Ширина паза «b» в данном случае определяется размером «d» фрезы, а размер «C» обеспечивается на станке за счет ограничения величины хода стола. Для этой цели используют специальные путевые датчики (упоры), которые позволяют выдерживать данный размер с заданной точностью. Все эти перечисленные предварительные работы, а также установка режимов резания на станке выполняются квалифицированными рабочими-наладчиками. На долю рабочего-станочника остается выполнение, как правило, следующих приемов: установка; закрепление; снятие и смена обрабатываемых деталей; пуск и остановка станка; контроль работы станка; контроль качества изготавливаемых деталей.

Точность изготовления деталей при использовании метода автоматического получения размеров не зависит от квалификации рабочего-станочника, производительность процесса обработки, как правило, высокая, полученные детали взаимозаменяемы.

Таким образом, метод автоматического получения размеров обрабатываемых поверхностей характеризуется, прежде всего, тем, что работа производится на предварительно настроенных станках с применением специальных приспособлений и более сложной наладки самого станка.

Точность обработки имеет свое численное выражение через погрешность обработки, которая и характеризует степень несоответствия реальной детали идеальной схеме, положенной в основу метода обработки. Для правильного построения техпроцесса обработки, который бы обеспечивал получение деталей с заданной степенью точности (допустимой величиной погрешности во всей партии) необходимо знать источники возникновения погрешностей, а также знать способы уменьшения или исключения этих погрешностей.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

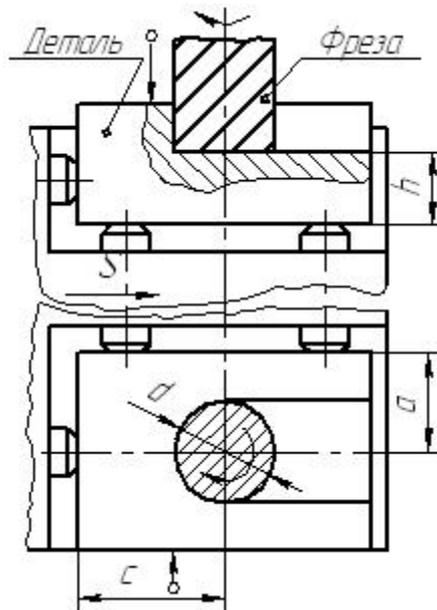


Рис. 1.1. Схема установки детали в приспособлении при обработке паза на настроенном станке

### 1.3. Погрешности обработки и основные источники их возникновения

Погрешности размеров могут возникать как при обработке, так и при контроле деталей. Поэтому погрешности размеров можно условно разделить на погрешности обработки и погрешности измерения. Те и другие погрешности имеют в основном одинаковый характер и подчиняются одним и тем же закономерностям.

Основными источниками возникновения погрешностей при обработке деталей на станках являются:

1. Приближенность реальной кинематической схемы обработки и идеальной;
2. Приближенность реального профиля режущего инструмента к идеальному профилю;
3. Неточности станка, приспособления и их износ в процессе эксплуатации;
4. Неточности исполнительного размера и размерный износ режущего инструмента;
5. Деформация в технологической системе от действия сил резания и усилий закрепления;
6. Температурные деформации станка, инструмента и обрабатываемой детали;
7. Деформации деталей от действия внутренних напряжений;
8. Неточность настройки станка на размер;
9. Неточность измерения;
10. Погрешность установки, определяемая погрешностями базирования и закрепления.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Степень влияния указанных факторов различна в зависимости от характера выполняемой обработки, типа производства, применяемого оборудования и пр. Ниже более подробно рассмотрено влияние основных факторов на точность обработки.

### **1.3.1. Приближенность реальной кинематической схемы обработки к идеальной кинематической схеме**

При изготовлении деталей на станках возможно применение кинематических схем обработки, обеспечивающих приближенный профиль формируемой поверхности. Такие схемы довольно часто используются при получении поверхностей, имеющих сложный профиль. Примером может служить метод обкатывания, широко применяемый при нарезании зубьев цилиндрических и конических зубчатых колес. Схема формирования эвольвентного профиля зубьев колеса с прямолинейными режущими кромками зубьев фрезы по методу обкатывания показана на рис. 1.2.

Действительный профиль, полученный этим методом, представляет собой ломаную линию, огибающую теоретическую эвольвенту.

Чем больше число канавок на червячной фрезе, образующих режущие зубья, тем большее число зубьев (режущих кромок) образуют профиль обрабатываемой поверхности и тем точнее будет соответствие реального профиля эвольвенте. Но число зубьев фрезы ограничено ее диаметром и поэтому нарезание зубчатых колес червячной фрезой дает, как правило, худший профиль, чем зубодолбление, так как при использовании этого способа зубодолбления число резцов, формирующих профиль зуба, равно числу двойных ходов инструмента (долбяка). А число ходов инструмента на долбежных станках может быть настроено в широких пределах.

Другой пример. При нарезании наружной резьбы гребенчатой фрезой ось инструмента располагается параллельно оси обрабатываемой заготовки, а не под углом, соответствующим подъему винтовой линии резьбы. Поэтому, нарезанный профиль будет иметь искажение, которое тем больше, чем больше угол подъема резьбы.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

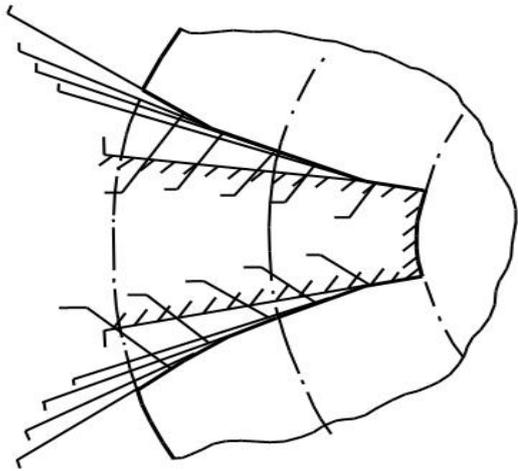


Рис. 1.2. Схема формирования профиля зубьев (эвольвенты) по методу обкатывания

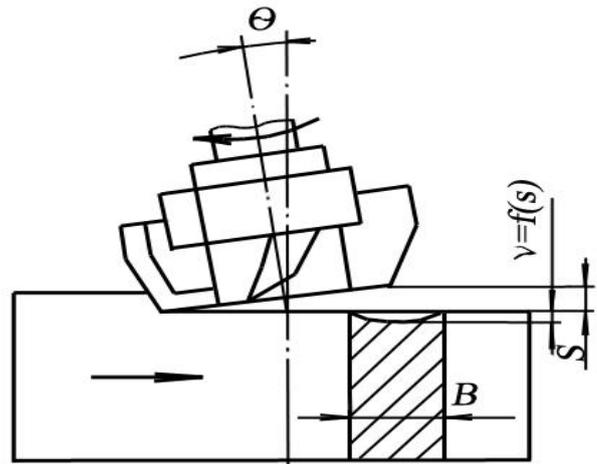


Рис. 1.3. Схема фрезерования плоскости торцевой фрезой

Часто для обеспечения благоприятных условий резания или повышения класса шероховатости обрабатываемой поверхности в кинематическую схему станка вносят преднамеренные искажения. Например, при фрезеровании плоскостей торцевой фрезой ось инструмента иногда преднамеренно наклоняют по отношению к обрабатываемой поверхности на некоторый угол (см. рис. 1.3).

Это прием необходимо проделать для того, чтобы зубья фрезы после поворота на  $180^\circ$  вокруг оси вращения не захватывали бы уже обработанную поверхность и не оставляли на ней рисунок, ухудшая чистоту обработки. Однако наклон оси вращения инструмента к плоскости обработки приводит к получению некоторой погрешности (вогнутости) обработанной поверхности. Обычно угол наклона  $\Theta$  принимают таким, чтобы зазор  $S$  (на противоположной стороне по отношению к режущей части зубьев фрезы) не превышал  $0,1$  мм. В этом случае при ширине фрезерования

$$B \leq 0.6 \leq D_{фр},$$

где  $D_{фр}$  – диаметр фрезы, при которой вогнутость по величине будет незначительной.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 1.3.2. Приближенность реального профиля режущего инструмента к идеальному профилю

Погрешность обработки на станках возможна и из-за приближенности профиля режущего инструмента. Так, например, при нарезании зубчатых колес методом копирования профиль инструмента должен соответствовать профилю впадин между зубьями. Но в таком случае, для каждого числа зубьев обрабатываемого колеса одного и того же модуля потребовалась бы особая фреза.

В индивидуальном и мелкосерийном производствах, а также при ремонтных работах обработку зубчатых колес производят, как правило, модульными дисковыми фрезами. Такие фрезы изготавливают с приближенными профилями зубьев. Причем, каждый типоразмер фрезы рассчитан на несколько смежных чисел зубьев, нарезаемых колес, в определенном интервале. Обычно для каждого модуля изготавливают наборы дисковых фрез, которые охватывают все числа зубьев и диаметров нарезаемых колес.

По стандарту имеется три набора из 8, 13 и 26 дисковых фрез, которыми с небольшой погрешностью, укладываемой в пределы допуска, можно нарезать зубчатые колеса с разным числом зубьев. Чем больше модуль колеса, тем сильнее будут сказываться неточности. Поэтому для более точных работ применяют набор из 15 дисковых фрез, а для самых точных – из 26 фрез. Таким образом, при этом методе нарезания получается лишь приближенный профиль зубьев на нарезаемом колесе.

### 1.3.3. Неточности станка, приспособления и их износ

Детали станков и приспособлений изготавливаются с определенными погрешностями. Поэтому после сборки технологическое оборудование имеет определенные неточности в относительном расположении отдельных рабочих поверхностей. Эти неточности, в свою очередь, являются непосредственными источниками появления погрешностей обработки. Например, прямолинейности направляющих токарного станка приводит к искажению формы обработанного вала в продольном сечении. Биение посадочного отверстия в шпинделе, в которое вставляется передний центр, приводит к искажению формы детали в поперечном сечении. Кинематическая погрешность делительной пары шестерен зубофрезерного станка целиком переносится на нарезаемое колесо.

Точность нового станочного оборудования и методы ее проверки регламентируются соответствующими стандартами. Так, радиальное биение шпинделей в ненагруженном состоянии для фрезерных и токарных станков допускается не более 0,01...0,015 мм.

Погрешность прямолинейности и параллельности направляющих станин не должна быть более 0,02 мм на длине 1000 мм и 0,05...0,08 – на всей длине.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Погрешности обработки могут быть следствием неправильного монтажа оборудования, в результате чего возникает «извернутость» направляющих станины, что приводит к смещению суппорта и соответствующему смещению резца в горизонтальном направлении (рис. 1.4). В этом случае появляются погрешности формы деталей в продольном сечении.

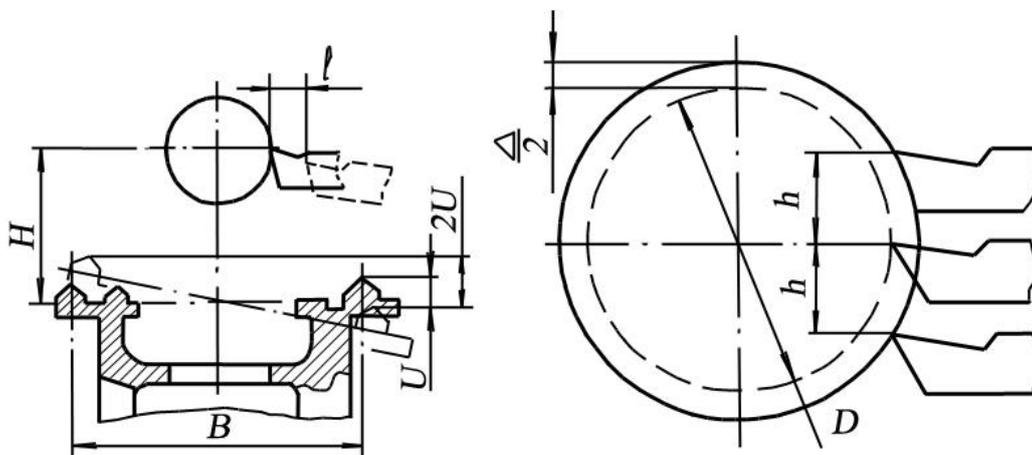


Рис. 1.4. «Извернутость» направляющих станины станка и ее влияние на погрешность формы детали

Обозначив величину «извернутости» станины через « $U$ », а вызванное им смещение резца через  $L$ , получим:

$$l = U \frac{H}{b},$$

где  $H$  – высота центров;

$b$  – расстояние между осями направляющими станины.

Наряду с этим «извернутость» направляющих вызывает погрешность формы обрабатываемой детали на длине, соответствующей длине «извернутости» станины.

При смещении резца на величину  $h$  вверх или вниз относительно оси центров станка диаметр  $D$  заготовки увеличивается на величину:

$$\Delta = \frac{2h^2}{D}$$

Например, при смещении резца на 0,3 мм и при диаметре обрабатываемой детали 30 мм погрешность от смещения резца (по диаметру) составляет:

$$\Delta = \frac{2 \cdot 0.3^2}{30} = 0.006$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Такое же смещение в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, приводит к погрешности, величина которой равна 0,6 мм, т.е. в 100 раз больше.

Прогибы станин продольно-строгальных и продольно-фрезерных станков (вследствие оседания фундамента) также ведут к появлению погрешностей обработки.

Большое влияние на точность обработки оказывает износ станков. Направляющие, например, токарных станков изнашиваются крайне неравномерно и поэтому теряют свою прямолинейность. При износе появляются зазоры в ответственных сопряжениях, биение шпинделей, посадочных мест и т.п. Вследствие этого станок теряет свою первоначальную точность.

Все сказанное целиком относится и к станочным приспособлениям. Как и станок, приспособление в значительной степени влияет на точность обработки. Поэтому, точность изготовления приспособления определяется точностью обрабатываемой детали. Например, при изготовлении детали по 6...8 квалитетам допуски на размеры приспособления должны назначаться в пределах 0,5...0,3 допуски на соответствующие размеры детали. При получении размеров детали с точностью ниже 8-го квалитета допуски на размеры отдельных элементов приспособления устанавливаются от 0,2 до 0,1 допуски на эти размеры детали.

Помимо погрешностей изготовления приспособления, точность обработки снижается погрешностью, вызванной износом отдельных деталей приспособления. Например, опорных установочных элементов, направляющих втулок и др.

В производственных условиях станки, приспособления и их наладка периодически проверяется на технологическую точность. После планово-предупредительного и капитального ремонтов станки (на заводах, где они эксплуатируются) обязательно принимаются отделом технического контроля с проверкой точности согласно паспортным нормам.

#### **1.3.4. Неточность исполнительного размера и размерный износ режущего инструмента**

Неточность изготовления инструмента вызывает в процессе механической обработки погрешности в двух случаях:

1. при обработке мерными инструментами (сверлами, зенкерами, развертками, метчиками, плашками, протяжками, пальцевыми фрезами и др.), возникающие погрешности обработка влияют как на неточности непосредственно самой рабочей части (ее формирующего размера), так и на неточность изготовления других элементов. Например, биение посадочных поверхностей (хвостовиков) таких инструментов;
2. при обработке фасонным инструментом (фасонными резцами, фрезами, шлифовальными кругами), когда профиль инструмента непосредственно переносится на форму обрабатываемой поверхности.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Износ режущего инструмента оказывает значительное влияние на точность обработки как в случае применения мерных, так и обычных (немерных) инструментов (расточных, проходных и других резцов, торцовых и др. фрез) при работе на предварительно настроенных станках. При обработке охватываемых поверхностей износ инструмента приводит к увеличению размеров, а при обработке охватываемых – к уменьшению.

Как известно, режущий инструмент изнашивается по передней и задней поверхностям. Наибольшее влияние на размер обработанной детали имеет износ по задней поверхности  $h$  (см. рис. 1.5). При этом режущая кромка как бы отдалится от обрабатываемой поверхности на величину  $U$ .

При обработке длинных валов размерный износ сказывается на форме детали, вызывая погрешность в виде конусности, а при обработке небольших деталей он вызывает изменение размеров последовательно обрабатываемых деталей партии.

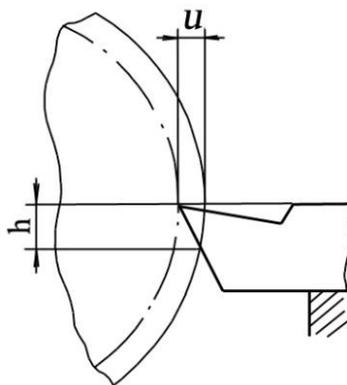


Рис. 1.5. Влияние износа резца на размер детали

Общая закономерность износа представлена кривой на рис. 1.6. При трении скольжения в начальный период работы инструмента I износ происходит наиболее интенсивно (начальный износ). В этот период происходит приработка инструмента, при которой отдельные гребешки режущей кромки инструмента выкрашиваются и шероховатость поверхностей сглаживается. Величина начального износа  $U_H$  и путь приработки  $l_H$  зависят от материалов детали и инструмента, качества заточки режущих кромок инструмента и их доводки и от режимов резания. Продолжительность начального износа измеряется всего лишь несколькими минутами, а путь резания не превышает 500...1500 м.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

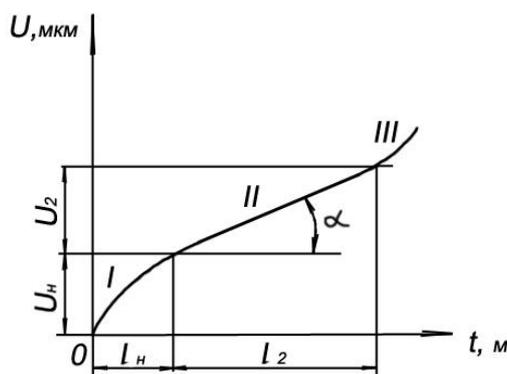


Рис. 1.6. Зависимость износа инструмента от пути резания

Второй период, соответствующий участку II кривой износа, характеризуется нормальным износом инструмента, прямо пропорциональным пути резания. Участок II почти прямолинеен и проходит под небольшим углом  $\alpha$  к оси абсцисс. Интенсивность этого периода износа принято выражать величиной относительного (удельного) износа  $U_0$ ,

$$U_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1000U_2}{l_2},$$

где  $U_2$  – размерный износ, полученный за время второго периода работы инструмента, мкм;

$l_2$  – путь резания за тот же период работы, м.

Длина пути резания на участке II равна  $l_2$ . При обработке стали резцами из Т15К6 он может достигать до 40000 м.

Третий период (участок III) – период критического износа, сопровождающийся выкрашиванием режущей кромки инструмента и даже его поломками. Этот вид износа недопустим для нормальной эксплуатации инструмента. Расчет величин износа инструмента, влияние его на точность обработки проводят применительно к участку II кривой износа (см. рис. 1.6).

Тогда

$$U = \frac{U_0 \cdot l}{1000},$$

где  $U$  – размерный износ инструмента, мкм;

$l$  – длина пути резания, м.

Следует также отметить, что износ инструмента сопровождается значительным увеличением радиальной составляющей усилия резания, что приводит к дополнительным погрешностям.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 1.3.5. Деформации в технологической системе от действия силы резания и усилий закрепления

Под влиянием силы резания, приложенной к звеньям упругой системы станок-приспособление-инструмент-деталь, возникает деформация этой технологической системы. Способность названной системы противостоять действию силы, вызывающей деформации этой системы, характеризует ее жесткость.

На точность обработки влияют преимущественно те деформации системы, которые изменяют расстояние между режущей кромкой инструмента и обрабатываемой поверхностью, т.е. деформации, направленные нормально к обрабатываемой поверхности.

Жесткостью технологической системы называют отношение составляющей силы резания, направленной по нормали к обрабатываемой поверхности, к смещению режущей кромки инструмента относительно этой же поверхности заготовки и в том же направлении. Отсюда жесткость системы:

$$j = \frac{P_y}{y}, \text{ кгс/мм},$$

где  $P_y$  – сила резания, направленная по нормали, кгс;

$y$  – величина смещения режущей кромки инструмента, мм.

Следует иметь в виду, что тангенциальная составляющая сила резания  $P_z$ , а в ряде случаев и  $P_x$  (осевая составляющая) влияют на жесткость упругой системы станка (рис. 1.7). Так, например, жесткость суппорта токарно-винторезного станка при одновременном действии  $P_y$  и  $P_x$ , оказывается более высокой, чем при действии только силы  $P_y$ . Под воздействием составляющих силы резания жесткость передней и задней бабки станка уменьшает. Таким образом, указанное выше выражение для определения жесткости системы может быть использовано только для приближенного расчета.

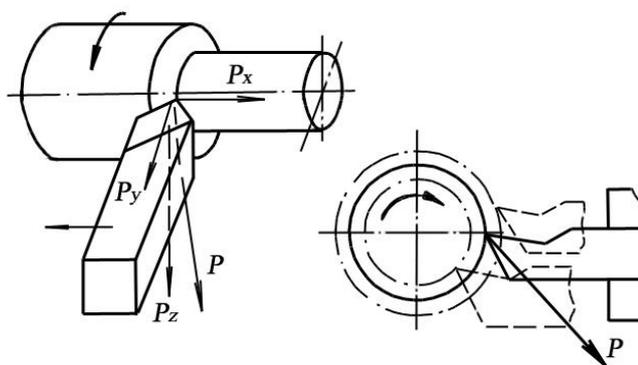


Рис. 1.7. Схема разложения усилия резания  $P$  на составляющие и изменение размера обрабатываемой поверхности при смещении инструмента

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Понятие жесткости распространяется и на отдельные звенья системы. Так, под жесткостью стенка понимают способность узлов станка противостоять действию сил, вызывающих деформацию, причем в этом случае заготовку и инструмент принимают как абсолютно жесткими объектами. Под жесткостью инструмента или приспособления понимают способность того или другого противостоять действию сил, вызывающих деформацию, при абсолютно жестком станке и заготовке.

Аналитическое определение упругих перемещений системы чрезвычайно затруднено ввиду того, что сама технологическая система является нелинейной и, поэтому, нельзя простым алгебраическим сложением найти результат действия всех трех составляющих силы резания.

Наиболее точное представление о действительной жесткости станка (отдельных его элементов) и величине упругих перемещений дают экспериментальные методы их определения: статический и производственный (динамический).

Статический метод заключается в постепенном наращивании нагрузки на узлы станка силами, соответствующими тем, которые будут в процессе работы станка, с производством замеров деформации узла в направлении действия этих сил. Однако статическая жесткость, определенная на неработающем станке, не учитывает влияния толчков, вибраций, которые увеличивают деформацию технологической системы. Поэтому она оказывается в 1,2...1,4 раза выше динамической жесткости.

При определении, динамической жесткости на испытываемом станке производится обработка ступенчатой заготовки за один технологический переход (см. рис. 1.8).

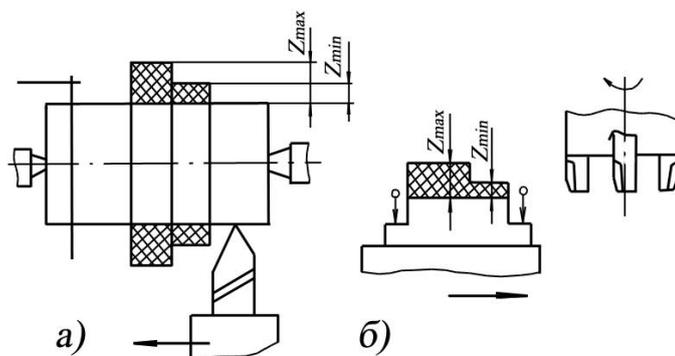


Рис. 1.8. Определение жесткости станков производственным (динамическим методом): а – токарного станка; б – фрезерного станка

Заготовка должна иметь высокую жесткость (в 5...6 раз большую жесткости станка или его узлов) с тем, чтобы можно было пренебречь влиянием ее деформации на точность обработки. Приращение припуска  $\Delta Z = Z_{max} - Z_{min}$  принимается исходя из ожидаемой величины колебания припуска при обработке партии подобных заготовок. После обработки заготовок замеряется приращение размера обработанной поверхности и тем самым определяется возможная величина рассеяния размеров в партии деталей.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Ценность этого метода заключается в том, что условия работы нагруженных узлов станка (величина и направление результирующего вектора  $P$  силы резания и точка ее приложения) полностью соответствуют реальным условиям обработки. Отсюда точность результатов исследования вполне удовлетворительна. Вследствие непостоянства жесткости технологической системы по длине обработки возникает погрешность формы обрабатываемой поверхности.

Например, при точении нежесткого вала в центрах токарного станка погрешности формы будут зависеть:

- а) от степени различия в жесткости передней и задней бабок станка;
- б) от величины прогиба самого вала под действием силы резания  $P_y$ .

Схема упругих деформаций технологической системы и ее влияние на форму обработанной поверхности вала показаны на рис. 1.9.

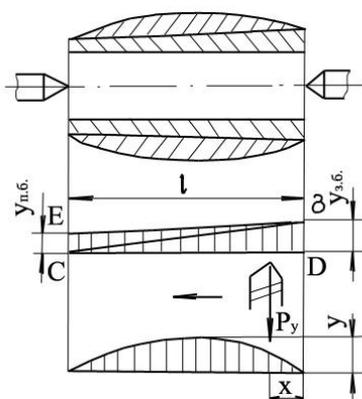


Рис 1.9. Схема влияния упругих деформаций технологической системы на погрешность формы детали (вала)

Величина прогиба вала в радиальном направлении  $y$  может быть определена по известной формуле сопротивления материалов (моментами закрепления заготовки в центрах пренебрегаем):

$$y = \frac{P_y}{3EI} = \frac{(l-x)^2 \cdot x^2}{l},$$

где  $E$  – модель упругости при растяжении (сжатии);

$I$  – момент инерции;

$l$  – длина обрабатываемой заготовки.

Максимальный прогиб (погрешность) будет в середине вала

$$y_{\max} = \frac{P_y \cdot l^3}{48EI}$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Радиальная составляющая силы резания  $P_y$  при перемещении резца в направлении от задней бабки к передней возникает упругий отжим  $U_{з.Б}$ , которые изменяются по закону прямой ВС, а отжим передней бабки  $U_{П.Б}$  – по закону прямой ED.

Таким образом, все перечисленные отжимы элементов технологической системы вызывают увеличение диаметра вала по сравнению с настроенным размером.

Нетрудно определить, что при обработке жесткого наала в нежестких опорах (центрах) поверхность детали будет седлообразной.

При обработке вала, закрепленного одним концом в патроне, а другой конец которого свободен (рис. 1.10), величина прогиба определяется по формуле:

$$y = \frac{P_y \cdot x^3}{3EI}$$

Максимальный прогиб

$$y_{\max} = \frac{P_y \cdot l^3}{3EI}$$

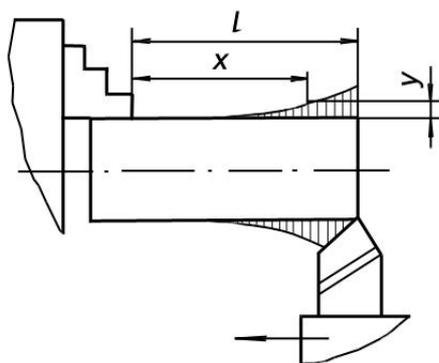


Рис. 1.10. Схема упругой деформации при обработке, закрепленного с одного конца вала

При закреплении вала на токарном станке в патроне и заднем вращающемся центре возможные эпюры погрешностей обрабатываемой поверхности (с учетом влияния упругого отжима передней и задней бабок) будут иметь вид, представленный на рис. 1.11, где  $d$  – диаметр обтачиваемого вала

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

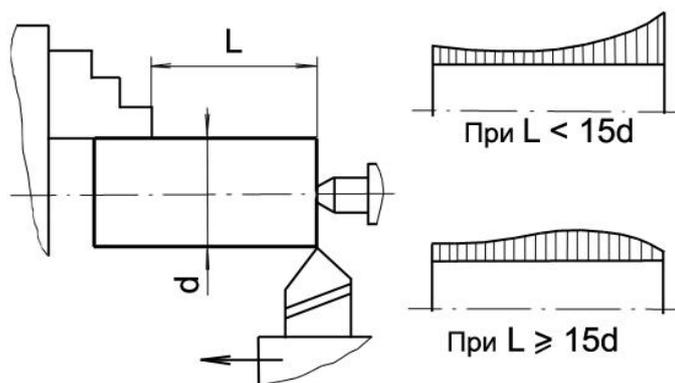


Рис. 1.11. Возможные эпюры погрешностей при обработке вала, закрепленного в патроне и вращающемся центре

Причиной появления погрешностей формы и размеров обрабатываемой поверхности может являться упругая деформация заготовки под действием сил закрепления. Примером может служить операция расточки отверстия тонкостенной втулки, закрепленной в трехкулачковом патроне. Деформация заготовки в данном случае и возникающая при этом погрешность формы растачиваемого отверстия показаны на позициях рис. 1.12, где поз. а – заготовка до закрепления в патроне; б – заготовка, установленная в патроне; в – произведена расточка отверстия; г – деталь после снятия со станка.

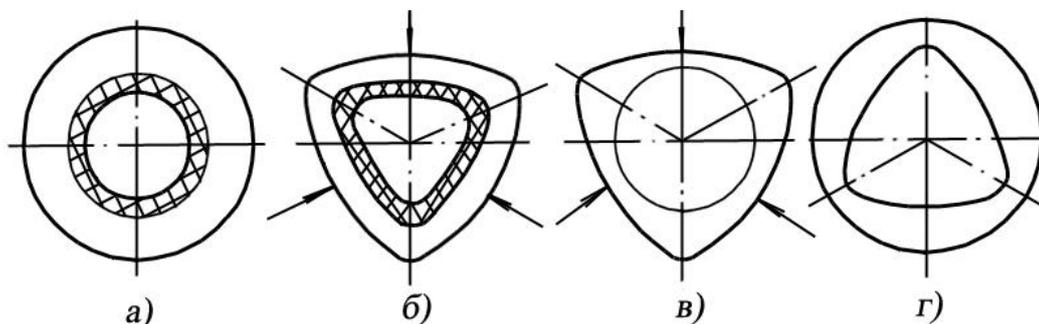


Рис. 1.12. Деформация заготовки при закреплении в трехкулачковом патроне и возникающая при этом погрешность формы растачиваемого отверстия

Неравномерности упругих отжимов при закреплении могут явиться причиной погрешностей взаимного расположения поверхностей готовой детали.

Погрешности формы детали при обработке ее с большой скоростью вращения могут возникать также из-за статической и динамической неуравновешенности. В первом случае возникает центробежная сила, действие которой приведет к появлению погрешности формы поверхности в поперечном сечении.

При динамической неуравновешенности обрабатываемой заготовки (например, коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания) центробежные силы, действующие при этом, дают момент, перекашивающий ось детали. Вследствие этого появляется погрешность формы как в осевом, так и в поперечном сечении.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 1.3.6. Погрешности, вызываемые температурными деформациями технологической системы

Температурные деформации системы СПИД оказывают существенное влияние на точность чистовых операций. Вызванные ими погрешности могут достигать величин, выходящих за пределы 6...9 квалитетов.

В процессе механической обработки технологическая система нагревается, а при перерывах она охлаждается. Источниками тепла являются: тепло, образующееся в зоне резания и в местах трения подвижных частей; тепло от электродвигателей, гидронасосов и некоторых внешних источников.

Рассмотрим тепловые деформации отдельных элементов технологической системы к их влиянию на точность обработки.

При работе станка (особенно в период первых 3–5 часов после пуска) отдельные узлы нагреваются крайне неравномерно. Так, например, в токарном станке коробка скоростей в разных частях температурные колебания составляют от 10 °С до 50 °С. Наибольшая температура отмечается в местах расположения подшипников шпинделя. Из-за неравномерного нагрева стенок корпуса передней бабки ось шпинделя постепенно смещается как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. Происходит смещение рабочих поверхностей станка, изменяется высота центров и т.п. Это смещение достигает нескольких сотых долей миллиметра, в результате чего детали, обработанные в начале и в конце смены, при прочих равных условиях, будут отличаться по своим размерам.

Температурные деформации элементов станка можно уменьшить за счет следующих мероприятий:

- 1) выноса гидропривода за пределы станка, что одновременно способствует уменьшению вибраций;
- 2) установки специальных регуляторов температуры масла в гидроприводе. Такие устройства представляют собой электроподогреватели, вмонтированные в картер гидропривода. При включении станка в течение первых 5 минут электроподогреватель подогревает масло до рабочей температуры и отключаются. Такие же устройства устанавливаются и в системе подачи смазывающе-охлаждающих жидкостей. Таким образом, настройку станка можно выполнять при рабочей температуре;
- 3) применения теплоизоляции гидроцилиндра и гидропанелей от станины;
- 4) правильного выбора объема резервуара для масла (при малом баке масло недостаточно остывает);
- 5) более совершенной смазки подшипников шпинделей, улучшающей отвод тепла, образующегося при работе.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

На ответственных операциях, прежде чем приступить к выполнению работы, станки предварительно прогревают. Например, нарезание крупных зубчатых колес производят, как правило, без остановки станка даже тогда, когда работа длится несколько смен. Отрицательное влияние на точность обработки прецизионных станков оказывает колебание температуры окружающего воздуха. Поэтому такие станки как координатно-расточные, резьбошлифовальные, зубошлифовальные и другие устанавливают в отдельных помещениях, где поддерживается постоянная температура (термостатические участки и цехи). Прецизионные станки перед работой также прогревают.

Погрешность обработки вызывается и температурными деформациями режущего инструмента. Так, удлинение проходных и расточных резцов при работе за счет увеличения температуры достигает 0,05 мм, что приводит к уменьшению или увеличению диаметра обрабатываемой поверхности до 0,1 мм.

Температурные изменения рабочего размера мерных инструментов (сверл, метчиков, разверток и т.д.) полностью переносятся на размер обрабатываемой поверхности.

Величина удлинения резца при установившемся тепловом состоянии может быть подсчитана по следующей формуле:

$$\Delta L = C \frac{L_P}{F} \sigma_B (t \cdot S)^{0.75} \cdot \sqrt{V},$$

где  $C$  – постоянная (при  $t \leq 1.5$  мм,  $S \leq 0.2$  мм/об,  $V = 100 \dots 200$  м/мин,  $C = 4,5$ );  $L_P$  – вылет резца, мм;  $F$  – площадь поперечного сечения резца, мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B$  – предел прочности обрабатываемого материала, кг/мм<sup>2</sup>;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, м/мин.

Из формулы видно, что уменьшение вылета резца или увеличение площади его поперечного сечения (параметры, которые сравнительно легко изменить) позволяют уменьшить температурное удлинение резца, следовательно, и погрешность обработки.

Обработка с применением охлаждения резко сокращает температурные деформации инструмента.

Температурные деформации самой детали в процессе обработки оказывают влияние на точность изготовления на окончательных операциях. Это влияние особо заметно при изготовлении таких деталей, как тонкостенные втулки, гильзы и т. п. Так, например, при шлифовании наружной поверхности тонкостенной гильзы в связи с нагревом происходит «выпучивание» этой поверхности. После охлаждения деталь имеет погрешность формы – седлообразность. Деформация такой детали при обработке и появление погрешности формы показаны на рис. 1.13.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

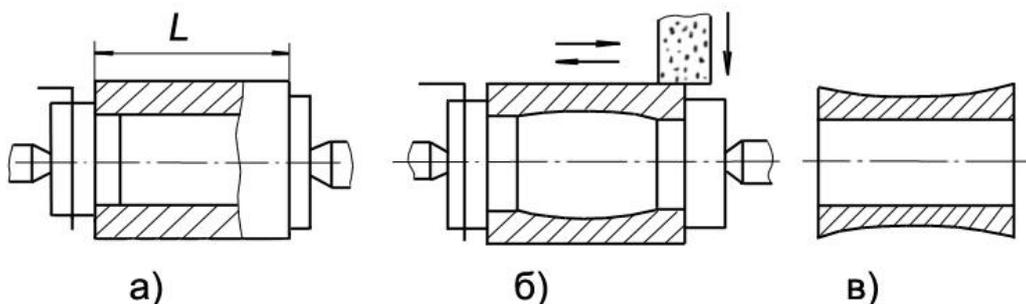


Рис. 1.13. Деформация тонкостенной гильзы и появление погрешности формы детали на операции шлифования: а – заготовка перед обработкой; б – выпучивание в процессе шлифования из-за нагрева; в – погрешность формы детали после снятия со станка

Линейное удлинение детали можно определить по формуле

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta t ,$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали;

$L$  – длина детали, мм;  $\Delta t$  – разность температур детали при обработке (от начальной температуры), град.

Величина  $\Delta t$  при обработке резанием может быть определена расчетным путем по формуле:

$$\Delta t = \frac{Q}{C \cdot \nu \cdot W} ,$$

где  $Q$  – количество тепла, возникающего при резании, кал;

$\nu$  – плотность материала детали, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – удельная теплоемкость, кал/кг град;

$W$  – объем заготовки, м<sup>3</sup>.

Так, количество тепла, выделяемого в единицу времени при обработке шлифованием (по Н.И. Резникову), может быть определено по формуле:

$$Q = 0.039 P_z \cdot V , \text{ кал/с} ,$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, кг;

$V$  – скорость резания, м/с.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Зная время обработки, можно определить деформацию и, следовательно, возможную погрешность детали. Линейное удлинение детали при этом может быть определено по формуле:

$$\Delta L = \frac{0.039 \cdot \alpha \cdot L \cdot P_z \cdot V \cdot t_0}{C \cdot v \cdot W},$$

где  $t_0$  – время обработки, с.

Температурная деформация детали при обработке может быть уменьшена за счет следующих мероприятий:

- 1) применения СОЖ (смазывающе-охлаждающей жидкости), обдувки воздухом;
- 2) увеличения скорости резания, что позволяет большую часть выделяемого тепла отвести в стружку;
- 3) закрепления деталей с возможностью компенсации их линейного расширения.

Чтобы исключить влияния из-за различия в температуре деталей, поступающих на чистовую обработку после черновой, необходимо обеспечить или их ритмичное поступление, или же ввести определенную выдержку с целью полного охлаждения (иногда опускают в 001 для ускорения охлаждения).

### **1.3.7. Погрешности, вызываемые деформацией деталей под действием внутренних напряжений**

Внутренними (остаточными) называются такие напряжения, которые имеются в материале заготовки или готовой детали при отсутствии внешних нагрузок.

Внутренние напряжения в отливках образуются в следующих случаях:

- а) неравномерности остывания отдельных ее частей;
- б) сопротивления материала форм и стержней свободному протеканию процесса усадки отливки;
- в) неравномерности фазовых или структурных превращений металла по сечению отливки.

На величину внутренних напряжений значительное влияние оказывает конфигурация детали. Максимальные напряжения возникают при резких переходах одного сечения в другое, а также при неравномерном распределении масс металла.

Такие напряжения возникают в отливках, поковках, при термической обработке, сварке, холодной прокатке, правке, золочении, дробеструйной обработке (и других методах упрочняющей технологии), при обработке металлов резанием и при электролитических покрытиях деталей.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Внутренние напряжения взаимно уравниваются и внешне не проявляются до тех пор, пока их равновесие не будет по каким-либо причинам нарушено. Такими причинами могут быть тепловые изменения, удаление припуска с заготовки, вибрации, удары и т.д. В этом случае напряжения перераспределяются, что вызывает остаточные деформации заготовок. Интенсивность перераспределения внутренних напряжений значительно увеличивается после снятия поверхностных слоев металла при механической обработке. Учитывая сказанное, после черновой обработки (обдирки) заготовку следует освободить от зажимов, крепящих ее к столу станка, чтобы дать ей возможность свободно деформироваться под влиянием перераспределения напряжений. После этого можно производить чистовую обработку.

Для снятия внутренних напряжений в отливках может применяться естественное или искусственное старение.

При естественном старении отливки вылеживаются от 15...20 дней до полугода, а иногда (например, станины крупных станков и т.п.) и больше. Выдерживание производят после предварительной обработки отливок. Снятию внутренних напряжений при этом способствует периодическое изменение температуры отливки.

Напряжения с течением времени снимаются неравномерно. Наиболее интенсивно процесс идет вначале, а потом он постепенно замедляется.

Естественное старение требует много времени, поэтому выгоднее проводить искусственное старение при помощи термической обработки. Правда, для крупных отливок этот метод не всегда приемлем из-за отсутствия печей больших габаритов.

Типичным режимам термической обработки с целью искусственного старения отливок является их медленный нагрев до 500...600°С с выдержкой их при температуре в течение 2...6 часов и последующим медленным охлаждением вместе с печью до 150...200 °С. Скорость нагрева 150...200°/ч, а скорость охлаждения – 20°/ч. После 200° остывание отливок можно производить на воздухе.

Известны способы искусственного старения с помощью механического воздействия. Так, например, мелкие и средние детали помещают во вращающийся барабан. Массовое соударение деталей между собой снижают внутренние напряжения.

Иногда крупные детали в подвешенном состоянии подвергают вибрационным нагрузкам пневматическим молотом. Такие механические соударения особенно эффективны в местах резких переходов сечений и на границах толстых и тонких частей заготовки.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Внутренние напряжения возникают в деталях, как уже было сказано, и в результате термической обработки. Известны случаи, когда крупные и сложные детали в результате действия внутренних напряжений, полученных в процессе термообработки, разрушались хранении в спокойном состоянии. Основными мероприятиями, позволяющими уменьшить внутренние напряжения после термической обработки деталей, являются:

- 1) правильное конструктивное оформление деталей с плавными переходами от одних объемов металла к другим;
- 2) строгое соблюдение технологического процесса термической обработки;
- 3) введение дополнительной операции термообработки – отпуска, который выполняется после закатки,

В сварных деталях после сварки всегда имеются остаточные деформации и внутренние напряжения. Остаточные деформации усложняют установку деталей, базирование на операциях механической обработки и приводят к появлению дополнительных погрешностей. Для уменьшения остаточных деформаций необходимо применять ряд технологических мероприятий: соблюдать последовательность наложения Сварных швов, выдерживать заданные режимы сварки, проводить термическую правку детали путем наложения специальных «фланцевых» накладных швов и т.д.

Сварку деталей, как правило, выполняют в специальных приспособлениях – кондукторах.

Для снятия внутренних напряжений после сварки выполняют термическую обработку – отжиг, который заключается в нагреве детали до температуры 300...650 °С (для конструкционных сталей) с последующим охлаждением вместе с печью.

### **1.3.8. Настройка станков на размер и погрешности, связанные с неточностью настройки**

Установка инструмента на размер может быть выполнена по лимбу или шкале, по эталону, по габариту, по обработанной ранее детали. В зависимости от принятого способа настройки инструмента на размер могут быть получены различные по величине погрешности обработки, которые определяется соответственно погрешностями лимба, эталона, габарита или колебанием размеров деталей, по которым производится настройка.

Неточность настройки станка оказывает влияние на точность изготавливаемой детали при использовании метода автоматического получения размеров, т.е. при работе на предварительно настроенных станках. В этом случае погрешность настройки станка будет переноситься на всю партию изготовленных деталей.

Погрешность настройки станка включает в себя погрешности установки режущего инструмента, приспособления, копиров, упоров, конечных выключателей и т.п. элементов наладки.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

В практике настройки многолезцовых станков, гидроконтролируемых полуавтоматов и других станков установка всех резцов для обработки диаметральных и осевых размеров производится обычно по изготовленной (продукционной) детали, закрепленной в станке. При использовании эталонов, плоскопараллельных концевых мер и других специальных настроечных элементов точность наладки повышается. Точность наладки может быть значительно повышена применением специальных бесконтактных устройств. Например, оптическое (бесконтактное) устройство для настройки алмазно-расточного станка обеспечивает установку алмазного резца на заданный размер с точностью до 1,5 мкм. В случае использования мерного инструмента погрешности обработки определяются, как указывалось ранее, погрешностями формирующего размера самого инструмента. Кроме того, на точность обработки будет оказывать большое влияние погрешность наладки приспособления (например, положение кондукторных втулок относительно осей шпинделей при сверлении отверстий). С целью уменьшения погрешностей обработки, связанных с неточностью настройки станка, его наладка проходит периодический контроль.

В последнее время как в отечественной, так и в зарубежной практике широко применяется метод бесподналадочной настройки станков. Сущность его состоит в том, что при смене режущих инструментов на станке расположение формообразующих режущих кромок инструмента относительно отработанной поверхности достигается путем установки его вне станка по заранее настроенным базам приспособлений и инструментов без дополнительной их регулировки на станке.

Требуемое положение режущей кромки инструмента относительно установочных базовых поверхностей резца достигается точным изготовлением инструментов (мерных) или посредством регулируемых компенсаторов на инструментах, налаживаемых на размер вне станка.

Выверка установочных баз на державках и приспособлениях производится при первичной наладке станка по эталонным резцам. На державках предусматриваются регулируемые базы, компенсирующие неточность станка.

Настройка станка без подналадки повышает точность обработки, снижает потери времени на смену инструмента, упрощает техническое обслуживание станка и повышает культуру производства. Для станков с ЧПУ изготавливаются специальные приборы для размерной настройки инструментов вне станка.

### 1.3.9. Погрешности измерений

Измерительные инструменты и приборы изготавливаются с определенной степенью точности (классами точности приборов). Кроме того, в процессе эксплуатации инструменты и приборы изнашиваются, изменяют свои рабочие размеры при колебаниях температуры окружающей среды, а также при нагревании от контролируемых поверхностей. Все указанные причины приводят к погрешностям измерения.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

В большинстве случаев точность измерений зависит от субъективности оценки человеком показаний приборов и инструментов. Естественно, что погрешности измерений, произведенных при наладке станка, оказывают свое влияние на точность обработки. Поэтому допуск контрольного инструмента (скоб, пробок) несколько меньше допуска инструмента рабочего.

### 1.3.10. Достижимая и экономическая точность обработки на станках

При обработке деталей на станках, находящихся в хорошем состоянии, высококвалифицированные наладчики и рабочие могут обеспечить достижение весьма высокой точности. Однако это связано с большими затратами времени. В условиях серийного и массового производства повышение точности обработки связано с необходимостью повышения точности изготовления приспособлений, усложнения наладки станка и, следовательно, связано с резким повышением стоимости изготовления таких деталей. Зависимость стоимости изготовления  $C$  от величины допустимой погрешности обработки  $T$  имеет гиперболический вид (см. рис. 1.14). Каждый способ обработки определенного вида поверхностей имеет свою экономически целесообразную границу точности или свою экономическую точность обработки. Превышение этой границы связано с неоправданно высокими затратами. Опыт, накопленный в производстве, позволяет установить экономическую точность обработки для каждого способа. Экономическая точность каждого способа обработки определяется видом применяемого оборудования, программой выпуска и некоторыми другими конкретными условиями.

На рис. 1.14 приведены зависимости стоимости изготовления от величины допустимой погрешности обработки для таких способов как точение, шлифование и притирка. Из графика можно определить, что  $T_1$  – наименьшая допустимая точность, при которой целесообразно применять обработку точением;  $T_2$  – наименьшая допустимая точность шлифования (в сравнении с точением и притиркой);  $\Delta$  – интервал, характеризующий экономическую точность шлифования.

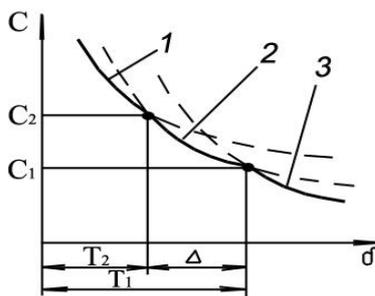


Рис. 1.14. Зависимость стоимости изготовления «С» от величины допустимой погрешности обработки «Т» для различных способов:

1 – для притирки; 2 – для шлифования; 3 – для точения

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Понятие «экономическая точность обработки» – относительно. Применяется лишь для сопоставления различных способов обработки однородных поверхностей. Если поверхность можно обработать с определенной степенью точности только одним способом, то это понятие неприменимо.

## 1.4. Расчет погрешностей обработки

### 1.4.1. Методы прогнозирования точности

Анализируя влияние ранее рассмотренных отдельных факторов на действительную погрешность обработки, можно получить материалы, позволяющие достоверно ее предсказывать. Так, при обработке деталей на предварительно настроенных станках методом автоматического получения размеров, она может быть определена как векторная сумма составляющих погрешностей:

$$\vec{\Delta} = \sum_{i=1}^K \vec{\Delta}_i ,$$

где  $K$  – число составляющих погрешностей.

Предварительная оценка ожидаемой погрешности обработки позволяет правильно спроектировать технологический процесс изготовления детали на станках.

В настоящее время используют два метода прогнозирования точности: расчетно-аналитический и статистический.

Первый метод заключается в установлении степени влияния па точность обработки каждого из рассмотренных выше факторов в отдельности с последующим определением суммарной погрешности. Этот метод очень трудоемок и требует выполнения, как правило, сложных расчетов.

Статистический метод позволяет оценить влияние сразу всей совокупности факторов, действующих в данной операции. Данный метод широко используется для исследования операции на точность в производственных условиях.

### 1.4.2. Систематические и случайные погрешности

Результирующая погрешность складывается из многих видов погрешностей, важнейшие из которых рассмотрены выше. Все действующие в процессе механической обработки погрешности подразделяют на два вида:

- а) систематические;
- б) случайные.

Систематической закономерно-изменяющейся называют такую погрешность, если по ходу обработки партии деталей можно наблюдать закономерность (хотя бы приближенную) в изменении размеров деталей. Так, на рис. 1.15 показана закономерность изменения размеров в партии деталей в связи с тепловыми деформациями станка, а на рис. 1.16 кривая отражает изменение размеров деталей в связи с износом инструмента.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

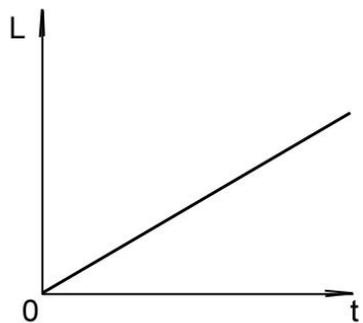


Рис. 1.15. Изменение размера деталей, вызываемое тепловыми деформациями станка

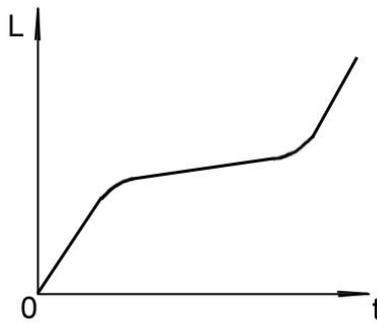


Рис. 1.16. Изменение размера деталей, вызываемое износом инструмента

Погрешности называются случайными, если закономерность в изменении погрешности отсутствует. При этом нельзя заранее определить ни величину, ни знак погрешности у той или иной детали и даже невозможно предвидеть сам факт появления такой погрешности.

Такая погрешность получается в результате действия одного или нескольких случайных факторов. Примерами причин случайных погрешностей могут быть изменение твердости заготовок в партии, колебание величины припуска в партии заготовок, погрешности измерения в результате субъективной оценки человеком показаний прибора и т.д. Если представить в координатах  $t$  (время) –  $L$  (размер) влияние случайной погрешности на размер, то получим график, представленный на рис. 1.17, из которого следует, что размер каждой следующей детали предсказать невозможно.

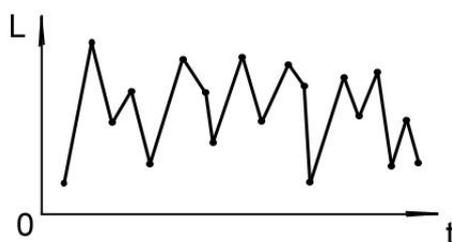


Рис. 1.17. Рассеяние размера, вызываемое случайной погрешностью обработки

Погрешности из-за разнонаправленности в значительной степени компенсируют друг друга. В связь с этим существуют следующие правила суммирования погрешностей:

- 1) систематические погрешности складываются алгебраически, т.е.с учетом знака или направления;
- 2) систематическая погрешность со случайной складывается арифметически, т.к. знак случайной погрешности нельзя заранее предвидеть и поэтому нужно принимать наихудший случай;
- 3) случайные погрешности суммируются квадратически.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(k_1 \delta_1)^2 + (k_2 \delta_2)^2 + \dots + (k_n \delta_n)^2},$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – коэффициенты, зависящие от закона распределения случайных погрешностей каждой группы;

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  – рассеяние размера, вызываемое  $i$ -й случайной погрешностью.

Обычно, если требуемая точность обработки высокая, то при применении точного оборудования и оснастки, в результирующей погрешности обработки преобладают систематические погрешности, и наоборот, если обработка ведется на изношенных станках и приспособлениях, дающих большой и случайный разброс размеров обработки (в которых малой долей проявляются закономерности), то в результирующей погрешности преобладают случайные величины.

### 1.5. Методы исследования точности обработки

Для исследования точности операций механической обработки применяются два метода:

1. метод кривых распределения;
2. метод точечных диаграмм.

#### 1.5.1. Метод кривых распределения

В общем случае рассеяние любого показателя качества характеризуется полем рассеяния:

$$\omega = A^{НБ} - A^{НМ},$$

где  $A^{НБ}$  – наибольшая величина показателя качества изделий в партии;

$A^{НМ}$  – наименьшая величина показателя качества изделий в партии.

Если в пределах поля рассеяния какое-либо значение принять за показатель, соответствующий геометрически правильному прототипу, то остальные значения поля рассеяния будут отражать ту погрешность, которая отличает каждый экземпляр изделия в партии и погрешность всей партии в целом.

Для исследования характера распределения погрешности в пределах партии деталей строят практическую кривую. По оси абсцисс располагают поле рассеяния  $\omega$ , которое разбивают на определенное количество равных отрезков, называемых интервалами. Определяют количество изделий, попавших в каждый интервал.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Это количество называют частотой попадания. Откладывая частоту в направлении оси ординат против середины соответствующего интервала, и соединив верхние точки отрезков между собой и с границами поля рассеяния, получают кривую распределения погрешности исследуемого параметра качества. С помощью кривых распределения можно изучать и прогнозировать качественные характеристики при производстве различных изделий, в том числе при изготовлении деталей на металлорежущих станках. Ниже приводится пример использования кривых распределения для прогнозирования количества годных и бракованных деталей, обработанных на настроенном станке, при этом параллельно излагается теория вопроса и ее практическое применение.

Действительные размеры деталей, обработанных на станке в условиях, когда действие факторов, вызывающих появление систематических погрешностей, проявляется слабо, являются случайными величинами непрерывного типа, так как размер каждой детали может иметь любое численное значение в поле рассеяния, характеризующего точность данной операции.

Случайные погрешности обычно вызывают рассеяние размеров деталей, подчиняющееся закону нормального распределения. В теории вероятностей установлено, что если изучаемая величина является суммой большого числа независимых случайных слагаемых, то хотя бы последние были нам известны, можно заранее считать, что наша величина имеет нормальное распределение. Этим объясняется и тот факт, что в процессе обработки деталей действительные размеры их часто подчиняются закону нормального распределения, так как результирующая погрешность обработки представляет собой сумму большого числа погрешностей, зависящих от станка, приспособлений, инструмента, заготовки и условий обработки.

### 1.5.2. Анализ точности обработки партии деталей с помощью кривых распределения

После обработки партии деталей на настроенном станке (например, в течение одной смены) производят выбор некоторого количества деталей для обмера. В примере, приведенном ниже, анализ точности обработки партии деталей будет выполнен по результатам обмера диаметра у 50 деталей, который в операционном эскизе задан

$$\phi = 16_{-0.08}^{+0.08}.$$

В пределах указанной выборки (50 шт.) наибольший предельный размер был  $x_{\max} = 16.05$  мм, а наименьший предельный размер  $x_{\min} = 15.89$  мм.

Разница  $x_{\max} - x_{\min} = w = 0.16$  мм, есть поле рассеяния размеров выборки (см. рис. 1.18).

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Для определения закона нормального распределения случайных величин (и последующего определения по нему вероятного процента брака) первоначально по результатам замеров строят кривую эмпирического распределения размеров и определяют две ее характеристики:

$\bar{X}$  – среднеарифметический размер партии и  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение, которые определяются по следующим зависимостям:

$$\bar{x} = \frac{x_1 \cdot m_1 + x_2 \cdot m_2 + \dots + x_k \cdot m_k}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i \cdot m_i ; \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left(x_1 - \bar{X}\right)^2 m_1 + \left(x_2 - \bar{X}\right)^2 m_2 + \dots + \left(x_k - \bar{X}\right)^2 m_k}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \left(x - \bar{X}\right)^2 \cdot m_i}{n}} , \quad (2)$$

где  $x_i$  – размер в соответствующем интервале;

$n$  – количество деталей в выборке;

$m_i$  – абсолютная частота попадания размера в соответствующий интервал;

$k$  – число интервалов, на которое разбито поле рассеяния размеров.

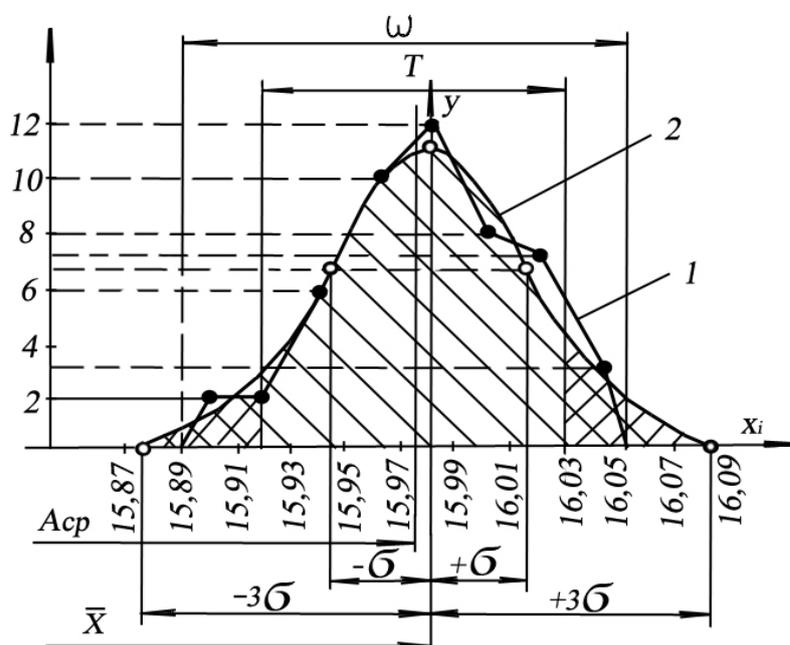


Рис. 1.18. График эмпирического распределения размеров

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Число интервалов рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$k \leq 5 \lg n$$

В нашем примере  $k = 5 \lg 50 \approx 8$

Зная  $\omega$  и  $k$  определяют цену деления по оси  $x$ :

$$C_u = \frac{\omega}{k} = 0,16 / 8 = 0,2$$

Для построения графиков эмпирического и теоретического распределения размеров, для выполнения расчетов по формулам 1 и 2, а также для определения оценочных критериев выборки целесообразно составить таблицу, которая для нашего примера будет содержать следующие данные.

Пользуясь данными таблицы (колонки 2 и 3), строим график эмпирического распределения (рис. 1.18). При этом точки, принадлежащие каждому интервалу размеров, на графике наносятся против середины соответствующего интервала.

На графике указаны измеренное поле рассеяние размеров  $\omega$  и допуск на изготовление  $T$ . Пользуясь формулами 1 и 2, вычислим характеристики эмпирического распределения (нужны для дальнейших расчетов):

$$\vec{X} = 15,98 \text{ мм} \quad \text{и} \quad \sigma = 0,035 \text{ мм.}$$

**Таблица**

№	Интервалы размеров $x_i$	Абс. част $m_i$	Среднее знач. интерв.	$ t_i $	$Z_t$	$K' = \frac{n \cdot C_u}{\sigma} Z_t$	$N_x$	$N'_x$	$ N_x - N'_x $
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15,89...15,91	2	15,90	2,29	0,0297	0,848	2	0,849	0,510
2	15,91...15,93	2	15,92	1,71	0,0925	2,640	4	3,489	0,511
3	15,93...15,95	6	15,94	1,14	0,2080	5,950	10	9,439	0,561
4	15,95...15,97	10	15,96	0,57	0,3390	9,640	20	19,079	0,921
5	15,97...15,99	12	15,98	0,00	0,3990	11,40	32	30,479	1,521
6	15,99...16,01	8	16,00	0,57	0,3390	9,690	40	40,169	0,169
7	16,01...16,03	7	16,02	1,14	0,2080	5,950	47	46,119	0,881
8	16,03...16,05	3	16,04	1,71	0,0925	2,640	50	48,800	1,200
		50							

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Основная цель анализа точности обработки в партии деталей является прогнозирование вероятного количества бракованных и годных деталей на исследуемой операции. Выше было указано, что распределение размеров деталей на операциях механической обработки в большинстве случаев следует закону нормального распределения случайных величин. Это позволяет использовать указанный закон для анализа точности рассматриваемой операции. Для построения теоретической кривой нормального распределения (для последующего сравнения с эмпирической и установления возможности использования в расчетах закономерностей нормального распределения) используют следующую методику.

Аналитический закон нормального распределения выражается уравнением

$$y = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X - \vec{X}_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (3)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов,

$\vec{X}_0$  и  $\sigma_0$  – параметры генеральной совокупности.

Под генеральной совокупностью следует понимать все количество деталей, которое будет выполнено по данному технологическому процессу.

Для использования закона нормального распределения к анализу точности обработки партии деталей с некоторой погрешностью приравнивают соответствующие параметры экспериментального распределения и генеральной совокупности:

$$\sigma_0 \approx \sigma; \quad \vec{X}_0 \approx \vec{X} \quad (4)$$

Для практических расчетов при  $n \geq 20$  целесообразно использовать более точные соотношения с учетом погрешности эмпирических параметров распределения:

$$\sigma_0 = \sigma \pm \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}; \quad \vec{X}_0 = \vec{X} \pm \frac{X}{\sqrt{n}} \quad (4a)$$

С учетом использования экспериментальных данных (формулы 4 или 4a) полагают

$$y = \frac{K'}{n \cdot C_u} = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X - \vec{X}_0)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (5)$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

где  $K'$  – теоретическая частота для любых значений  $x = m'$ ;  
 $C_U$  – величина интервала по оси абсцисс.

Из (5) получаем:

$$K' = \frac{n \cdot C_u}{\sigma_0} \quad (6)$$

Используя подстановку

$$t = \frac{x - \vec{X}_0}{\sigma_0} \quad (7)$$

после преобразований получаем:

$$K' = \frac{n \cdot C_u}{\sigma_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}$$

Обозначив

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} = Z_t,$$

и приняв во внимание (4), получим

$$K' = \frac{n \cdot C_u}{\sigma_t} \cdot Z_t \quad (8)$$

Величина  $Z_t$  табулирована в справочниках для различных значений  $t$ . Значения  $t_i$ ,  $Z_t$  и  $K'$  приведены в таблице. Используя значение  $K'$ , строят теоретическую кривую распределения размеров (см. кривая 2 на рис. 1.18).

Однако для того, чтобы использование равенств (4) и (4а) было достаточно обоснованным, необходимо убедиться в том, что:

- а) используемая для анализа выборка деталей действительно подчиняется закону нормального распределения;
- б) она действительно является случайной.

Первоначально проверим выборку по первому пункту.

В математической статистике для проверки нормальности распределения выборки используется несколько критериев. Наиболее простым для вычислений является критерий акад. А.Н.Колмогорова  $\lambda$ . Используем этот критерий для анализа-нормальности распределения приведенной выше выборки.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Первоначально делается предположение о том, что партия деталей, из которой извлечена выборка, имеет нормальное распределение, следовательно, равенства (4) и (4а) справедливы.

Согласно методике:

$$\lambda = \frac{|N_X - N'_X|_{\max}}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

где  $N = \sum m_i$  – накопленные эмпирические частоты распределения случайной величины  $x'$ , которые подсчитываются в нашем примере по данным таблицы (столбец 3);

$N'_X$  – накопленные теоретические частоты распределения.

В числителе формулы (9) берется наибольшая абсолютная разность накопленных теоретических и эмпирических частот. Накопленные теоретические частоты подсчитываются на основе формулы (8).

Как видно из таблицы (колонка 10):  $|N_X - N'_X| = 1,521$ , поэтому

$$\lambda = \frac{1,521}{\sqrt{50}} \approx 0,214$$

где  $\lambda$  – случайная величина, которая подчиняется нормальному закону распределения, по которому можно вычислить вероятность этой величины  $P(\lambda)$ . Последняя также находится из таблицы.

$P(\lambda)$  – выражает вероятность соответствия эмпирического распределения, полученного в примере, распределению генеральной совокупности. Для анализа распределений, рассматриваемых в технике, установлено, что если  $P(\lambda) \leq 0,05$  (то есть вероятность соответствия очень мала), то наше первоначальное предположение об отсутствии различия между распределениями сборки и генеральной совокупности является неверным. И наоборот, если  $P(\lambda) \geq 0,05$ , то полученное расхождение между эмпирическими и теоретическими частотами следует считать случайными, а наше предположение верным. Для нашего примера согласно таблице (см., например, И.О. Соломин. Применение математической статистики в технологии машиностроения. – М. : Машиностроение, 1972. – 336 с.) при  $\lambda = 0,214$  и  $P(\lambda) = 1,0$ , то есть в данном случае имеет место достоверность, следовательно, сделанное в начале проверки предположение о соответствии распределения размеров исследуемой выборки нормальному закону является верным.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Проверка случайной выборки осуществляется в исследованиях тогда, когда в течение наблюдения центр распределения величины  $X$  может постепенно меняться, однако среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  остается постоянным. Именно такие явления наблюдаются на операциях механической обработки в силу действия ряда закономерно-изменяющихся погрешностей (например, размерный износ инструментов). Достаточно простым и надежным для проверки «случайности» выборки является способ последовательных разностей.

Он основан на определении некоторого критерия:

$$\tau = \frac{c^2}{S^2} > \tau_g, \text{ причем } C^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} a_i^2,$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2,$$

где  $a_i$  – определяется из следующих соотношений:

$$a_i = x_2 - x_1$$

$$a_i = x_3 - x_2$$

.....

$$a_{13} = x_{14} - x_{13}$$

$$a_{n-1} = x_n - x_{n-1}$$

где  $x_1, x_2 \dots x_n$  – порядковые номера деталей выборки,

$\tau_q$  – некоторое критическое значение критерия  $\tau$  известно, что при  $n > 20$  критерий  $\tau$  имеет нормальное распределение, если выборка, для которой он определен, действительно случайна.

Поэтому проверка «случайности» выборки сводится к сравнению  $\tau$  и  $\tau_q$ . Если  $\tau > \tau_q$ , то гипотеза случайности, выборки верна, если  $\tau < \tau_q$ , то неверна.

Для расчета  $\tau_q$  используют выражение  $\tau_q = 1 - \frac{tg}{\sqrt{n+1}}$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

В свою очередь величина  $\tau_q$  находится по таблице, если известно  $\Phi(tg) = 0.5 - \frac{q}{100}$ , величину  $q$  называют уровнем значимости.

В технике его часто принимают  $q = 5\%$

Определим значение  $\tau$

Для рассматриваемого примера значения  $C^2$  и  $S^2$  оказались равными:

$$C^2 = 0,0014; \quad S^2 = 0,0012$$

Следовательно:

$$\tau = \frac{0,0014}{0,0012}$$

Теперь определим  $\tau_q$  при 5 % уровне значимости.

$$\text{В этом случае } \hat{O}(t_q) = 0.5 - \frac{5}{100} = 0,45$$

Далее по таблице определяем  $t_q = 1,65$ . Следовательно:

$$\tau_q = 1 - \frac{1,65}{\sqrt{51}} = 0,74$$

Таким образом  $\tau > \tau_q$ . Следовательно, выборка является случайной. Выполненные проверки позволяют перейти к использованию закона нормального распределения для анализа точности обработки исследуемой партии деталей.

В связи с тем, что рассеяние размеров на исследуемой операции подчиняется закону нормального распределения, следовательно, практически размеры деталей могут находиться в пределах поля, ограниченного теоретической кривой. Годными же будут те детали, размеры которых будут находиться в пределах поля допуска (см. рис. 1.18).

Вероятность получения количества деталей в пределах поля допуска равна отношению площади, заключенной между ординатами, проведенными через границы поля допуска и границы теоретической кривой (рис. 1.18) ко всей площади, ограниченной кривой распределения и осью абсцисс. Для определения искомой площади используют нормированную функцию Лапласа, которая получается после интегрирования уравнения кривой Гаусса (формула (3)), с использованием подстановки:

$$t = \frac{x - \bar{X}_0}{\sigma_0}$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

После интегрирования получаем 
$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (10)$$

Значения функции Лапласа табулированы. В приведенном виде (10) формула используется для определения половины площади под кривой, так как при

$$t \rightarrow \infty, \Phi(t) \rightarrow 0.5$$

Для получения значения всей величины площади используют удвоенное значение функций, то есть:

$$2\hat{O}(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 \quad \text{при } \infty < t < +\infty$$

Для практических расчетов чаще всего используют диапазон кривой Гаусса в пределах  $-3 < +3$ . При этом  $2\hat{O}(3) = 0,9973$  или (в процентах) в указанном интервале содержится 99,73 % всей площади кривой. Поскольку  $x - \bar{X} = 3\sigma_0$ , то следовательно, для практических целей используют диапазон  $(x - X)_{\max} = \pm 3\sigma$ . Отсюда следует, что если  $T = 6\sigma$ , то вероятное количество годных деталей будет 99,73 %. В нашем примере площадь в пределах поля допуска расположена несимметрично относительно величины  $X$ , поэтому определение величины площади необходимо произвести для левой и правой частей отдельно.

Первоначально определяют значение аргумента  $t = \frac{x - \bar{X}_0}{\sigma_0}$ . При этом для получения наиболее достоверных данных следует использовать формулы (4а).

Тогда

$$\bar{X}_0 = 15.98 \pm \frac{0.035}{\sqrt{50}} = 15.98 \pm 0.005 ;$$

$$\sigma_0 = 0.035 \pm \frac{0.035}{10} = 0.035 \pm 0.0035$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Количество бракованных деталей определяют по формуле

$$W = [1 - \Phi(t_{Л}) - \Phi(t_{П})] \cdot 100\% ,$$

где  $t_{Л}$  и  $t_{П}$  – значение аргумента  $t$  соответственно для левой и правой границ поля допуска.

При полученных колебаниях значений  $\vec{X}_0$  и  $\sigma_0$  величина брака будет колебаться от  $W_{\max} = 19.75\%$  до  $W_{\min} = 5.95\%$  .

Полученный результат следует оценить как неудовлетворительный, так как процент бракованных деталей оказался, весьма высок. Об этом свидетельствует и такая характеристика как коэффициент точности операции:

$$\mu = \frac{6\sigma}{T} = \frac{0.21}{0.11} \approx 1.9 \quad \text{при } T = 6\sigma \quad \mu = 1$$

Причиной такой, величины брака могут быть погрешности систематические, случайные, либо их совместное действие. Так, если (см. рис. 1.19) при заданном допуске  $T$  распределение размеров будет соответствовать кривой 2 ( $6\sigma_2 > T$ ), то причиной брака в этом случае будет действие случайных погрешностей, источником которых, как указано выше, может быть колебание припуска, колебание твердости заготовок, низкая жесткость станка и т.д.

Именно такой случай имел место в рассмотренном примере. Следовательно, уменьшение качества бракованных деталей может быть достигнуто за счет воздействия на источники случайных погрешностей.

При величинах  $T = 6\sigma$  и  $\mu = 1$  точность операции считается достаточной. Однако на практике возможен брак даже и при достаточной точности процесса.

Действие систематической погрешности постоянного характера, например, приводит к смещению кривой Гаусса (кривая 3, рис. 1.19) относительно середины поля допуска. При этом может выполняться условие  $T = 6\sigma$ , однако  $\vec{X}$  получает приращение на величину  $\Delta$ , которая возникает в результате погрешности, допущенной при настройке станка. В соответствии с рис. 1.19  $\Delta = |\vec{X} - A_{cp}|$ .

В рассмотренном примере

$$\Delta = 15.98 - 15.975 = 0.005 ,$$

$$\Delta_{\text{доп}} = \frac{|E - 6\sigma|}{2} = \frac{|0.11 - 0.21|}{2} = 0.05$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Для работы без брака должно выполняться условие  $\Delta \leq \Delta_{\text{дон}}$ , что в данном примере выполняется. Изменение настройки станка с целью исключения погрешности настройки ( $\Delta = 0$ ) не позволяет освободиться от брака. Об этом можно судить и по коэффициенту точности настройки:

$$l = \frac{\Delta}{T} \leq l_{\text{дон}}; \quad l = \frac{0,005}{0,11} \approx 0,045;$$

$$l_{\text{дон}} = \frac{|T - 6\sigma|}{2T} = \frac{|1 - \mu|}{2} = \frac{|1 - 1,9|}{2} = 0,45$$

Следовательно, в нашем случае выполняется условие  $l < l_{\text{дон}}$ .

Основные мероприятия по уменьшению брака на рассмотренной операции должны быть направлены на уменьшение величины коэффициента точности  $\mu$  и соответственно, величины  $\sigma$ , которая зависит от величины случайных погрешностей.

Условия работы без брака характеризуются следующими значениями коэффициентов:

$$\mu \leq 1; \quad l \leq l_{\text{дон}}$$

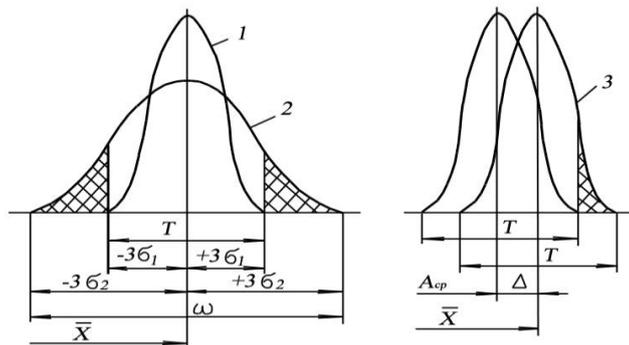


Рис. 1.19. Влияние систематической погрешности на положение кривой Гаусса

Если неравенства (II) не выполняются, то возможен брак. Процент годных деталей определяется по формуле

$$W = \varphi\left(\frac{T/2 - \Delta}{\sigma}\right) - \varphi\left(\frac{-T/2 - \Delta}{\sigma}\right)$$

где  $\frac{T}{2} - \Delta$  – координата верхней границы поля допуска относительно середины поля рассеяния;

$-\frac{T}{2} - \Delta$  – координата нижней границы поля допуска относительно середины поля рассеяния.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Процент неисправного и исправного брака определяется по формулам:

$$W_{ИСП} = 0,5 - \varphi\left(\frac{T/2 - \Delta}{\sigma}\right);$$

$$W_{НЕИСП} = 0,5 - \varphi\left(\frac{-T/2 - \Delta}{\sigma}\right)$$

### 1.5.3. Рассеяние размеров при действии доминирующих факторов

При обработке деталей на рассеяние размеров может оказать влияние один доминирующий фактор. Например, при доминирующем влиянии тепловых деформаций станка во время повышения температуры (см. рис. 1.15) распределение размеров в партии деталей может соответствовать закону равной вероятности (рис. 1.20).

В этом случае величина фактического поля рассеяния определяется по формуле

$$\omega = 2\sqrt{3}\sigma$$

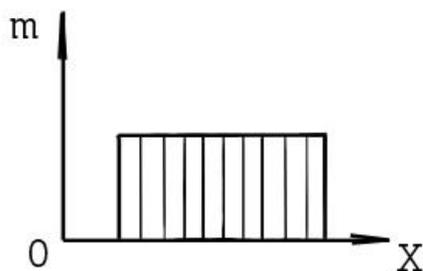


Рис. 1.20. Закон равной вероятности

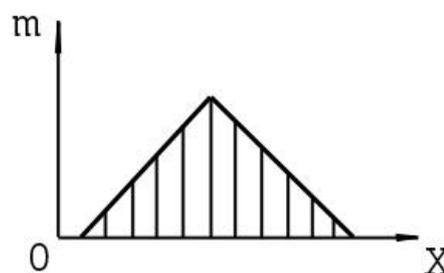


Рис. 1.21. Закон Симпсона вероятности

Если изменение размеров деталей, вызываемое износом инструмента, имеет закономерность, представленную на рис. 1.16, то распределение размеров может выражаться законом Симпсона (см. рис. 1.21).

В этом случае  $\omega = 2\sqrt{6}\sigma$

Следует отметить, что при анализе точности обработки законы равной вероятности и Симпсона практически не могут быть использованы в «чистом» виде, так как всегда имеются случайные погрешности, деформирующие их в направлении закона нормального распределения.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 1.5.4. Метод точечных диаграмм

Метод кривых распределения обладает тем недостатком, что не учитывает последовательность обработки деталей, т.е. не дает представления о распределении погрешностей обработки во времени.

Метод точечных диаграмм позволяет отделить случайные погрешности от систематических погрешностей, дает наглядное представление о резких отклонениях в ходе процесса и времени их появления. Точечную диаграмму (рис. 1.22) строят по ходу обработки в координатах: номер детали ( $N^{\circ}$ ), размер детали ( $L$ ).

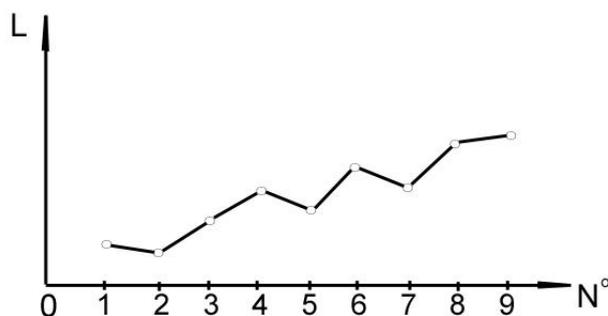


Рис. 1.22. Точечная диаграмма

Если при обработке на точность размеров влияют только случайные факторы, то точечные диаграммы не дают дополнительной информации о точности операции по сравнению с кривыми распределения (см. рис. 1.17).

Если же при обработке будет действовать какая-либо доминирующая закономерно изменяющаяся погрешность (например, вызываемая износом режущего инструмента), то ее влияние можно определить, из точечной диаграммы (рис. 1.22).

При значительных колебаниях размера от детали к детали направление полосы рассеяния на малом участке выявить трудно. Тогда на точечной диаграмме откладывают не размер каждой детали, а средний размер группы из нескольких деталей. В этом случае тенденция изменения размера во времени выявляется более отчетливо, так как рассеяние средних групповых размеров меньше, чем рассеяние отдельных размеров. Так, если рассеяние размеров подчиняется нормальному закону распределения со средним квадратичным отклонением  $\sigma$ , то рассеяние средних групповых размеров также будет подчиняться нормальному закону, но

$$\sigma_{gp} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

где  $n$  – число деталей в группе;

$\sigma_{gp}$  – среднее квадратичное отклонение поля рассеяния, определенное по деталям одной группы.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Построение точечных диаграмм широко практикуется при статистическом контроле хода операций. При таком контроле проверяют не все детали, а лишь определенную часть (обычно не более 25 %).

Из общего потока деталей последовательно выделяют определенные группы-пробы и по результатам их измерения строят точечную диаграмму (рис. 1.23). Выход среднего группового размера  $\bar{X}$  за контрольные границы ( $b_K$  и  $H_K$ ) служит сигналом для подналадки станка.

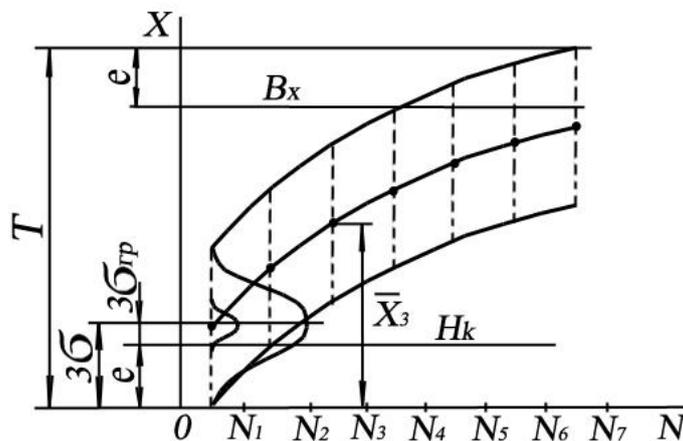


Рис. 1.23. Точечная диаграмма, построенная по средним размерам групп

Положение верхней  $b_K$  и нижней  $H_K$  контрольных линий по отношению к границам поля допуска ( $T$ ) определяется величиной

$$l = 3\sigma - 3\sigma_{гр} = 3\sigma\left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)$$

### 1.6. Точность обработки на настроенных станках

В общем случае погрешность выполнения операционного размера складывается:

- из погрешности установки детали;
- из погрешности настройки станка;
- из погрешности обработки, являющейся результатом действия как случайных, так и закономерных-изменяющихся факторов.

Настройка станка заключается в придании режущему инструменту определенного положения относительно установочных поверхностей приспособления или относительно автоматических выключателей движений.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Задача настройки – совместить центр группирования погрешностей с расчетным значением настроечного размера  $A_H$  (рис. 1.24). Достичь совмещения практически невозможно, вследствие чего имеет место погрешность настройки  $\delta_H$ :

$$\delta_H = l_{im} (A_{Hi} - A_H) = \pm \Delta$$

Здесь  $\delta_H = \Delta$  – поле рассеяния настроечного размера

$A_{Hi}$  – координата центра группирования погрешностей, достигнутых при  $n$ -й настройке станка.

Величина и допуск настроечного размера определяются из величины и допуска операционного размера таким образом, чтобы с учетом возникающих в процессе обработки погрешностей обеспечить получение операционного размера при наименьшем числе наладок.

Расчетное значение настроечного размера  $A_H$  (рис. 1.24) находится из уравнения

$$A = A_H + \tau + c - \frac{(c + \Delta)}{2},$$

$$A_H = A \pm \frac{c}{2};$$

где  $A$  – среднее значение операционного размера в партии из  $i$  деталей;

$c$  – суммарная величина закономерно-изменяющихся погрешностей за период между подналадками.

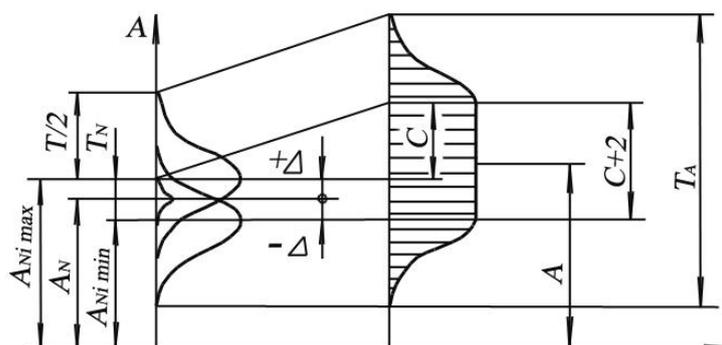


Рис. 1.24. Распределение операционного размера в партиях деталей, обработанных за ряд наладок:  $i$  – партия деталей, обработанных с одной наладки

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Величину  $C$  найдем (рис. 1.24) из уравнения

$$T_A = \delta + \delta_H + c$$

Здесь  $T_A$  – допуск операционного размера;

$\delta$  – мгновенное поле рассеяние операционного размера, которое является результатом воздействия случайных факторов.

Совместное влияние погрешностей  $\delta$ ,  $\delta_H$  и  $C$  вызывает рассеяние операционного размера.

При этом, как уже отмечалось,  $\delta$  и  $\delta_H$  – поля рассеяния, которое является результатом воздействия случайных факторов,  $C$  – закономерно изменяющегося фактора.

На рис. 1.24 показана схема распределения операционных размеров без учета погрешностей базирования. Однако в практике эти погрешности довольно часто оказывают влияние на точность операционного размера. При этом важна не только точность установочных элементов приспособления и обрабатываемой детали (зазор между базовым отверстием детали и установочным пальцем приспособления, колебание положения оси детали, устанавливаемой в призму, и т.д. приводят к рассеянию размеров при обработке), но и отклонения формы и расположения базовых поверхностей детали. Действительно, при построении связанной с базовыми поверхностями детали, система координат  $O_1x_1y_1z_1$  ось  $x_1$  (рис. 1.25а) может занять одно из двух крайних положений. Совпасть с осью  $X$  системы координат  $Oxyz$  или пройти касательно к впадине на базовой поверхности. Расстояние между этими двумя положениями оси  $x_1$  есть не что иное, как возможная погрешность базирования  $\Delta_{баз.з}$ . Аналогично определяется погрешность базирования для случаев, изображенных на рис. 1.25а и 1.25б. Погрешность базирования в данном случае есть – погрешность взаимного расположения точек реальной базовой поверхности в направлении получаем до операционного размера. Эта погрешность вызывает рассеяние операционного размера. Это рассеяние обнаруживается при измерении деталей в том случае, когда точки контакта базовой поверхности с измерительным приспособлением не совпадают с точками контакта базы с приспособлением станка.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

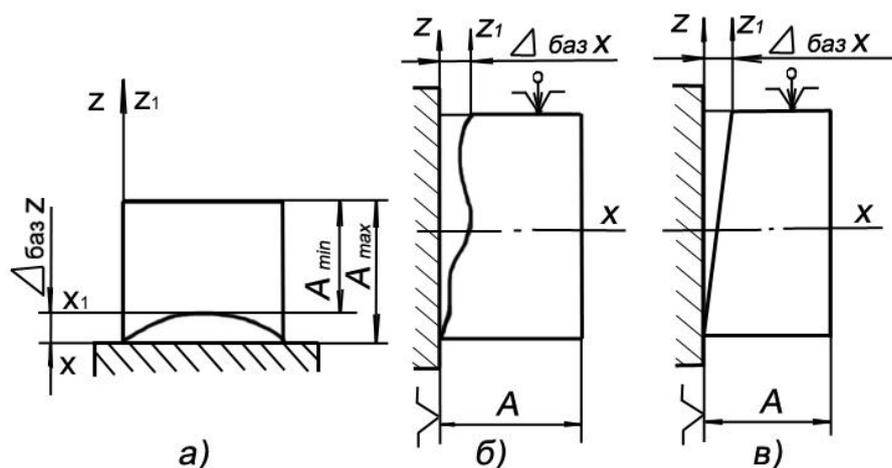


Рис. 1.25. Влияние отношений формы (а и б) и расположения (в) технологических баз на точность операционного размера

Действительно, если принять равными нулю все погрешности обработки, то операционный размер  $A$  из каждой детали партии (см. рис. 1.25) все же будет иметь значения с колебаниями:

$$A_{\min} \text{ до } A_{\max},$$

где  $\Delta_{\text{баз.z}}$  – погрешность базирования данной детали, равная отклонению формы (расположения) данной детали.

Величина рассеяния операционного размера  $\delta_{\text{баз}}$  партии деталей в этом случае будет равна наибольшему отклонению формы (расположения) деталей партии

$$\delta_{\text{баз}} = \Delta_{\text{баз.max}} - \Delta_{\text{баз.min}}, \text{ но } \delta_{\text{баз.min}} = 0$$

Следовательно,  $\delta_{\text{баз}} = \Delta_{\text{баз.max}}$

Конечно, если деталь при измерении базируется по той же схеме, что и при обработке, то величина этого рассеяния фиксироваться измерительным прибором не будет и, следовательно, не учитывается.

Кроме погрешностей базирования на рассеяние операционного размера может влиять, как выше отмечалось, неравномерность смещения деталей и контактные деформации баз под действием сил закрепления –  $\delta_{\text{закр}}$ .

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Погрешности базирования и закрепления в сумме образуют погрешность установки. Нестабильность погрешности установки партии деталей вызывает рассеяние выполняемых размеров на величину  $\delta_y$ .

Результирующая погрешность операционного размера  $A$  партии деталей в общем случае может складываться из следующих составляющих:

$$\delta_A = \delta_y + \delta_H + \delta + c ,$$

Величина погрешности  $\delta_y$  для различных операций и технологических процессов может колебаться в широких пределах. Однако в большинстве случаев практическое осуществление схем базирования детали на станке и при измерении совпадает, а погрешности закрепления в силу достаточной жесткости деталей и приспособлений оказываются незначительными. Вследствие этого погрешности установки не учитываются при составлении норм экономической точности различных методов обработки (эти нормы составляются путем обобщения статистически данных о точности обработки).

Существующие нормы экономической точности  $T_{AЭ}$ , приводимые в справочниках, учитывают влияние на точность обработки остальных трех факторов:

$$T_{AЭ} = \delta_H + \delta + c$$

Погрешности  $\delta_H$ ,  $\delta$  и  $c$  характерны для каждого метода обработки и, следовательно, определяют точность обработки каждого из методов.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

## 2. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 2.1. Понятие о качестве поверхности

Одним из показателей качества машин в машиностроении является качество поверхности деталей машин.

В процессе формообразования деталей машин путем поверхностного пластического деформирования, механической обработки резанием, электрофизическими или электрохимическими методами обрабатываемая поверхность приобретает определенные физико-механические свойства с одновременным изменением рельефа.

В общем случае качество поверхности деталей машин определяется совокупностью геометрических параметров (шероховатостью, волнистостью, погрешностью формы, физико-механическими характеристиками поверхностного слоя, микроструктурой слоя и остаточными напряжениями). Поверхностный слой кроме механических свойств может приобрести отличные от основного материала химические свойства

### 2.2. Критерии оценки шероховатости поверхности

Шероховатость представляет собой геометрический след кромки инструмента в материале детали, искаженный пластическими деформациями, сопутствующими процессу формообразования детали (рис. 2.1).

В литературе принято шероховатость поверхности характеризовать отношением  $S_m$  к высоте неровностей  $R_z$ :

$$\frac{S_m}{R_z} < 50$$

По ГОСТу 2789-73 шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности детали.

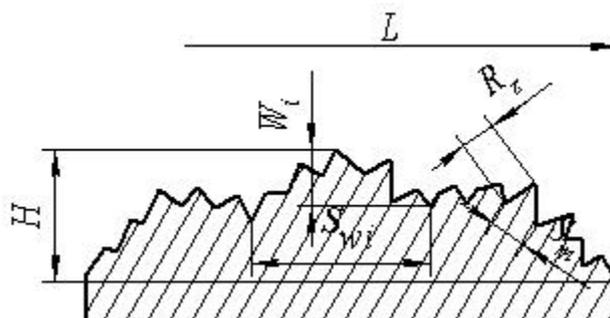


Рис. 2.1. Схема реальной поверхности

[К оглавлению](#)

В основу стандарта положена, система базирования на среднюю линию профиля. Средняя линия профиля (линия  $m$  на профилограмме, показанной на рис. 2.2) – базовая линия, которая имеет форму номинального профиля и делит измеренный профиль так, что в пределах базовой длины сумма квадратов расстояний точек профиля до этой линии минимальная, т.е.

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = \min$$

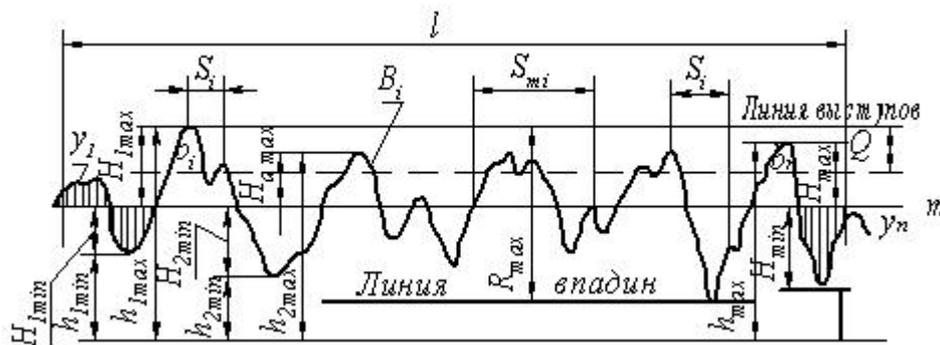


Рис. 2.2. Профилограмма поверхности

Для количественной оценки шероховатости поверхности по стандарту приняты следующие параметра:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\max}$ ,  $S_m$ ,  $S$ ,  $t_P$ .

$R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля, определяется как среднее арифметическое из абсолютных значений расстояний точек измеренного профиля до его средней линии:

$$R_a = \frac{1}{n} \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{или приблизительно}$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где  $l$  – базовая длина;

$y_i$  – отклонение (ордината) профиля от средней линии;

$n$  – число измеренных ординат;

$R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам, определяется суммой средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов  $H_{i\min}$  и пяти наибольших максимумов  $H_{i\max}$  профиля в пределах базовой длины

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

$$R_Z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right);$$

$R_{\max}$  – наибольшая высота неровностей профиля – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины. Линия выступов и линии впадин – линии, эквидистантные средней линии профиля и проходящие соответственно через наивысшую точку выступов и через низшую точку впадин измеренного профиля;

$S_m$  – средний шаг неровностей профиля – это среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины,

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi},$$

где  $S_{mi}$  – шаг неровностей профиля по средней линии;

$S$  – средний шаг неровностей профиля по вершинам – среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины;

$\eta_p$  – опорная длина профиля, определяется суммой длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне  $p$  (см. рис. 1.2) в материале выступов профиля линией, эквидистантной средней линии.

Оценку многих эксплуатационных характеристик качества поверхности (износостойкость, контактная жесткость и др.) можно производить по параметру  $t_p$ .

$t_p$  – относительная опорная длина профиля – это отношение опорной длины профиля  $\eta_p$  к базовой длине, выражено в процентах.

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} \cdot 100\%,$$

где  $p$  – уровень сечения профиля – расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля (рис. 1.2). Значение  $p$  выбирают в процентах от  $R_{\max}$ .

Важной геометрической характеристикой шероховатости является направление следов обработки.

Стандартом предусмотрено 6 типов их расположения: параллельное  $V_{\parallel}$ ; перпендикулярное  $V_{\perp}$ ; перекрещивающееся  $V_x$ ; произвольное  $V_M$ ; кругообразное (для торцов)  $V_C$ ; радиальное  $V_R$ .

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 2.3. Волнистость поверхности

Волнистость поверхности – это совокупность периодически чередующихся возвышенностей и впадин, образующих неровности поверхности с шагом, большим базовой длины, принятой при измерении шероховатостей.

Волнистость поверхности характеризуется отношением:

$$\frac{S_w}{W_i} = 60 \dots 100$$

(см. рис. 2.1) и пока еще не регламентируется отечественными стандартами.

По рекомендациям РС 3951-73 принятым для стран СЭВ, волнистость оценивается высотой волнистости  $W_z$  и средним шагом волнистости  $S_w$ .

$W_z$  – это среднее арифметическое из пяти ее значений:

$$W_z = \frac{1}{5} (W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5),$$

$S_w$  – средний шаг волнистости – это среднее арифметическое значение расстояний между одноименными сторонами соседних волн, измеренных по средней линии профиля:

$$S_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{wi}$$

### 2.4. Макроотклонения

Макроотклонения – это отклонения формы поверхности. В отличие от шероховатости, которая рассматривается как погрешность формы малых участков поверхности, макрогеометрические отклонения поверхности является единичными на протяжении всей рассматриваемой поверхности. Обычно макроотклонения характеризуются отношением:

$$\frac{L}{H} > 1000 \quad (\text{см. рис. 2.1})$$

К макрогеометрическим погрешностям можно отнести: конусообразность, бочкообразность, овальность и др.

Эти погрешности соизмеримы с размерами всей детали и рассматриваются в разделе «Точность обработки на настроенных станках».

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

## 2.5. Влияние методов и режимов обработки на шероховатость

Шероховатость поверхности зависит от ряда факторов, к которым можно отнести следующие:

- материал обрабатываемой заготовки и его свойства;
- метод обработки и режимы резания;
- жесткость технологической системы (станок-приспособление-инструмент-деталь) и их вибрации;
- характер режущего инструмента и его геометрия;
- вид и состав применяемой смазочно-охлаждающей жидкости.

### 2.5.1. Материал заготовка

Разные марки сталей и чугунов при одних и тех же методах обработки, инструментах, и режимах резания могут давать шероховатости, отличающиеся по величине в несколько раз. Главными причинами такого колебания будут различная способность сталей образовывать наросты и явления схватывания инструмента с заготовкой по площадке трения (явления адгезии). При обработке лезвийным инструментом заготовок из мягкой малоуглеродистой стали шероховатость обработанной поверхности имеет большую величину, чем при обработке высокоуглеродистых. А поверхность сталей, в составе которых свинец или повышенное содержание серы, после обработки менее шероховата, чем тех же сталей, не имеющих этих элементов. Поверхность среза имеет меньшую величину микронеровностей при обработке сталей с мелкозернистой структурой. Микронеровности выше, если структура стали имеет пластинчатый перлит в отличие от глобулярного.

Шероховатость поверхности во многом определяется технологическими условиями получения заготовки. На поверхности проката остаются следы погрешностей прокатных валков. Микронеровности горячекатаного проката достигают 150 мкм, а холоднотянутого 50 мкм. У поковок высота поверхностных неровностей зависит от методовковки. При свободной ковке высота неровностей получается порядка 1,5.. ..4 мм. При горячей штамповке на поверхности заготовок копируются погрешности штампов с высотой до 50 мкм. Поверхности отливок копируют литейные формы. Микронеровности у мелких отливок, залитых в песчаную форму ручной формовки, достигают 500 мкм, а у крупных – 1500 мкм и зависят от величины зерен формовочной смеси, плотности набивки форм. При машинной формовке в песчаных формах высота неровностей достигает 300 мкм, кокильном и центробежном литье – 200 мкм, при литье по выплавляемым моделям – 40 мкм, при литье под давлением – 10 мкм.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 2.5.2. Метод обработки и режимы резания

Каждому методу обработки соответствует определенный диапазон высоты шероховатостей. Точение черновое позволяет получить на поверхности детали шероховатость  $R_z = 80 \dots 150$  мкм, тонкое точение  $R_z = 6 \dots 10$  мкм, чистовое шлифование  $R_z = 5 \dots 10$  мкм, хонингование  $R_z = 1 \dots 3$  мкм. При обработке лезвийными инструментами (резцами, фрезами) наиболее существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает подача и скорость резания.

Влияние подачи на шероховатость поверхности выражается кривой, представленной на рис. 2.3.

Из рисунка видно, что с увеличением подачи шероховатость поверхности увеличивается.

С уменьшением подачи до  $S < 0,01$  мм/об шероховатость возрастает, что объясняется упругими отжимами в технологической системе.

Для большинства конструкционных сталей зависимость высоты неровностей от скорости резания может быть выражена кривой, представленной на рис. 2.4.

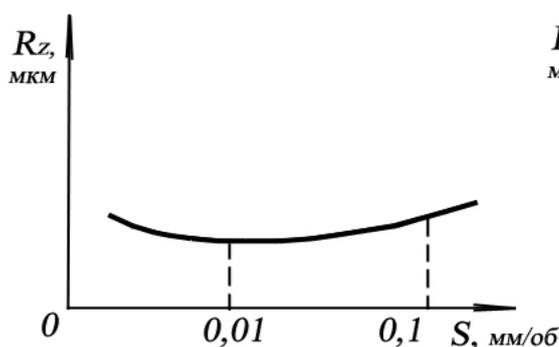


Рис. 2.3. Зависимость шероховатости от подачи

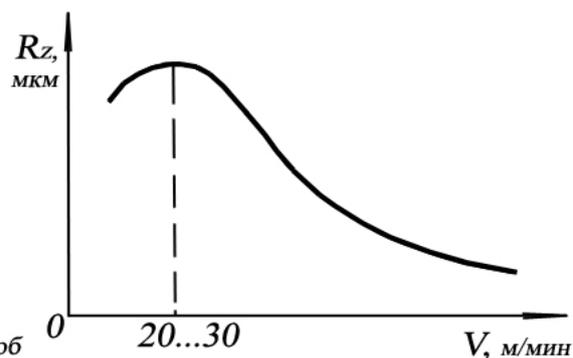


Рис. 2.4. Зависимость шероховатости от скорости резания

С увеличением скорости резания  $V > 30$  м/мин шероховатость уменьшается. При скорости резания порядка 20...30 м/мин на режущей грани инструмента образуется нарост, который приводит к увеличению шероховатости. При больших скоростях резания возможно увеличение вибраций в системе СПИД и некоторое размягчение обрабатываемого материала, что приводит к росту шероховатостей.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

### 2.5.3. Геометрия режущего инструмента

Всякую обработанную режущим инструментом поверхность в первом (грубом) приближении можно рассматривать как след рабочего движения режущей кромки. При таком представлении шероховатость поверхности будет определяться в поперечном сечении чисто геометрическими факторами: формой режущей кромки инструмента (радиусом закругления при вершине) и размером подачи.

Однако образование шероховатостей нельзя объяснить только следом движения режущей кромки в материале заготовки. На шероховатость поверхности влияют пластические явления захвата и отрыва слоев материала, находящегося под режущей кромкой (сталь) и явления хрупким выкрашиванием частиц материала (серый чугун, цветные сплавы). Износ режущего инструмента увеличивает шероховатость, поэтому доводка режущего инструмента способствует уменьшению высоты шероховатости.

### 2.5.4. Жесткость технологической системы

Вибрации элементов технологической системы периодически изменяют положение режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности, создавая на ней выступы и впадины. Вибрации зависят от жесткости технологической системы, от неуравновешенности вращающихся частей, дефектов привода и др. В зависимости от частоты и амплитуды колебаний изменяются форма и размеры поверхностных неровностей.

### 2.5.5. Смазывающе-охлаждающая жидкость

Работа школы академика П.А. Ребиндера показала, что жидкость, в которой происходит резание, может активно участвовать в смазочно-охлаждающем процессе. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при резании сводится к охлаждающему действию на заготовку и инструмент, пластифицированию поверхностного слоя путем адсорбирования поверхностно-активных веществ, которые оказывают расклинивающее действие, к смазочному и химическому воздействиям (рис. 2.5).

Молекулы активных веществ, проникая в трещины, создают давление на стенки до  $100 \text{ кН/м}^2$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

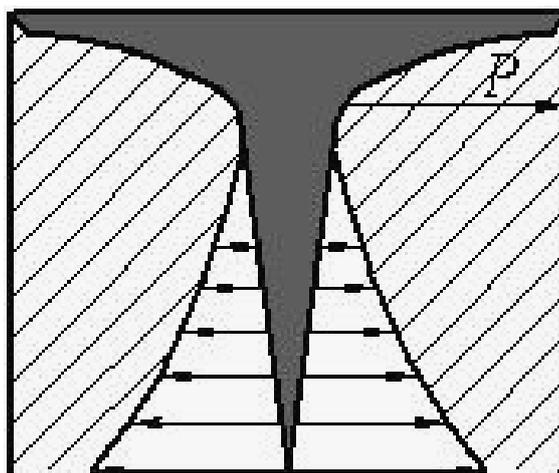


Рис. 2.5. Расклинивающее действие СОЖ

Благодаря действию активных веществ, облегчается процесс резания, уменьшаются явления отрыва металла с обрабатываемой поверхности заготовки и тем самым уменьшается шероховатость поверхности. На практике в качестве СОЖ применяют; эмульсии, содовые водные растворы с добавками нитрита натрия, мыльные растворы, сернистые масла, а также керосиново-масляные смеси.

## 2.6. Причины возникновения волнистости и погрешностей формы

Причиной возникновения волнистости на поверхности детали часто являются вибрации в упругой системе СПИД с большой амплитудой колебаний и относительно невысокой частотой. Например, вибрации в случае шлифования возникают в связи с наличием биения шпинделя станка при неудовлетворительной балансировке шлифовального круга, а также при плохой правке круга после затупления и засаливания.

Для уменьшения волнистости необходимо, главным образом, снижать вибрации путём уменьшения сил резания, проведением тщательной балансировки вращающихся инструментов (шлифовальных кругов, фрез), применением более точных, «беззазорных» подшипников, уменьшением зазоров в плоскостях сопряжений и стыков, увеличением натягов в неподвижных соединениях, т.е. увеличивать жесткость и уменьшать податливость технологической системы.

Причинами образования погрешностей формы являются: погрешности станка, жесткость упругой технологической системы, копирование погрешностей, получаемых при предшествующей обработке и погрешности режущего инструмента. Обычно погрешности формы оговариваются техническими требованиями на точность обработки или, если они не оговорены, то подразумеваются, что они не выходят за пределы поля допуска на размеры. Причины и меры их устранения рассматриваются в разделе точность обработки.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

## 2.7. Состояние поверхностного слоя

Металлическое изделие, следовательно, и его поверхностный слой, состоит из кристаллов. Идеальное кристаллическое строение сверхчистого железа представляется (рис. 2.6) в виде решетки, в узлах которой расположены атомы (положительно заряженные ионы). Нити сверхчистого железа выращивают, например, из растворов солей.

В результате многообразия производственных условий при остывании слитка стали, почти одновременно, образуется много центров кристаллизации. Около каждого центра формируется группа кристаллов неправильной формы, которые носят названия зерен. Различие отдельных зерен между собой заключается в разной пространственной ориентации кристаллической решетки и разной величине зерен (рис. 2.7).

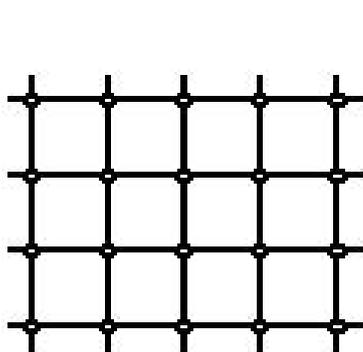


Рис. 2.6. Идеальное кристаллическое строение сверхчистого железа

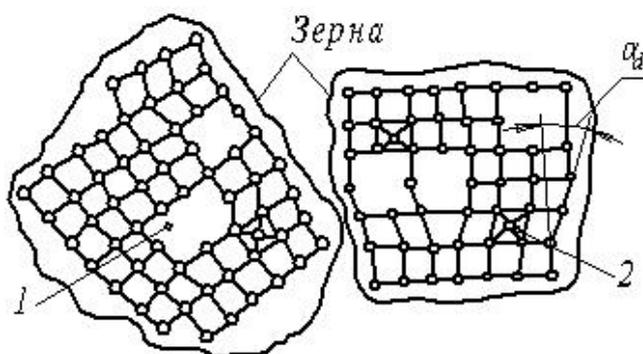


Рис. 2.7. Строение реального кристалла (зерна): 1 – вакансии; 2 – точечные дислокации;  $\alpha_\delta$  – угол разориентировки блоков зерна

В реальных металлах идеальная кристаллическая решетка нарушена. Из возможных нарушений кристаллического строения внутри одного зерна необходимо отметить следующие:

- в некоторых узлах решетки отсутствуют атомы (ионы) и имеют место вакансии;
- некоторые атомы могут находиться не в узлах, а в междоузлиях, то есть имеется неправильное расположение атомов или дислокации;
- зерно состоит из блоков, повернутых друг относительно друга, представляя своеобразную мозаику.

Приложение к металлу усилия вызывает деформацию – изменение расстояний между точками тела  $\Delta l$ . Деформация может быть упругой, исчезающей после снятия нагрузки и пластической, остающейся после снятия нагрузки. На рис. 2.8 представлена зависимость деформации растяжения металла от нагрузки (напряжения).

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Диаграмма растяжения сверхчистого железа представлена линией 1, которая показывает, что при растяжении происходят только упругие деформации. Для металла с идеальной кристаллической решеткой прочность его определяется силой межатомных связей. Как только внешняя нагрузка превысит силы межатомных связей, металл хрупко разрушается, образуя две новые поверхности. При этом разрыв происходит при напряжениях в 200 раз и более превышающих напряжения разрыва для реальных металлов (самых лучших конструкционных легированных сталей).

В реальных же металлах при наличии несовершенства кристаллической решетки при приложении внешней нагрузки только в начале наблюдаются упругие деформации, а затем при достижении  $P_{02}(\sigma_{02})$  – предела текучести металл начинает течь, то есть деформироваться пластически. Таким образом, металл с реальной кристаллической решеткой подвергается сначала упругой деформации, затем пластической и только затем наступает разрушение (кривая 2 на рис. 2.8).

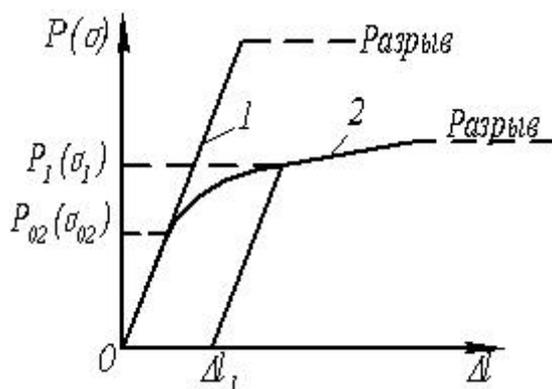


Рис. 2.8. Зависимость реформации от нагрузки

Причем, как видно из рис. 2.8, после снятия приложенной нагрузки  $P_1$ , в металле останется деформация  $\Delta_1$ . Если теперь вновь нагрузить металл, то для осуществления повторно пластической деформации нужна нагрузка больше, чем  $P_1(\sigma_1)$ . Это означает, что повысилась прочность металла, металл получил наклеп. Наклепом называется упрочнение металла под действием пластической деформации.

Пластическая деформация объясняется тем, что по самой слабой дислокации происходит сдвиг элементов кристаллической решетки, то есть происходит движение дислокации. Это движение или пластическая деформация происходит до тех пор, пока атомы дислокации не займут более прочное выгодное положение, чем первоначальное. При этом пластическая деформация при данной силе прекращается. Если увеличить силу, то находящиеся в других местах дислокации не выдерживают эту нагрузку и начинают двигаться до того момента, пока атомы не попадут в более выгодное положение и не закрепятся. Таким образом, механизм перемещения дислокаций объясняет явление упрочнения металла по мере его пластической деформации.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Пластическая деформация поверхностного слоя кроме движения дислокаций сопровождается увеличением плотности дислокаций за счет увеличения числа дефектов и искажений кристаллической решетки, изменением структуры металла путем изменения и дробления зерен с ориентацией последних в направлении усилия деформирования. В металле поверхностного слоя резко возрастает количество дислокаций, вакансий и другие несовершенства кристаллической решетки, повышая его напряженность. Взаимодействие полей напряжений дислокаций между собой и с другими дефектами решетки затрудняет движение дислокаций, и сопротивление пластической деформации возрастает, металл упрочняется.

Это упрочнение продолжается до тех пор, пока в силу неизменности объемов металла, при деформации не образуется шейка и не наступит разрыв – разрушение по слабому сечению шейки.

В процессе пластической деформации выделяется тепло. При этом почти вся работа деформации (98...99 %) переходит в тепло, и лишь небольшая часть затрачивается на образование новых поверхностей. С одной стороны температура резания (для железоуглеродистых сталей не выше  $300^\circ$ ) способствует повышению активности колебаний глубже расположенных в поверхностном слое атомов, что приводит к более глубокому упрочнению. Температура резания, близкая к критической (для стали  $t_p > 500^\circ$ ), способствует восстановлению первоначального положения атомов, а это приводит к разупрочнению поверхностного слоя.

В результате пластической деформации в поверхностном слое в зависимости от количества тепла, выделяющегося при резании, преобладает либо процесс упрочнения (малые скорости резания, малые температуры), либо разупрочнение (высокие скорости резания, высокие температуры).

## 2.8. Влияние процессов резания лезвийным инструментом на изменения поверхностного слоя сталей твердостью $HRC < 40$ единиц

На рис. 2.9 представлена схема процесса резания лезвийным инструментом и зависимость микротвердости по глубине поверхностного слоя.

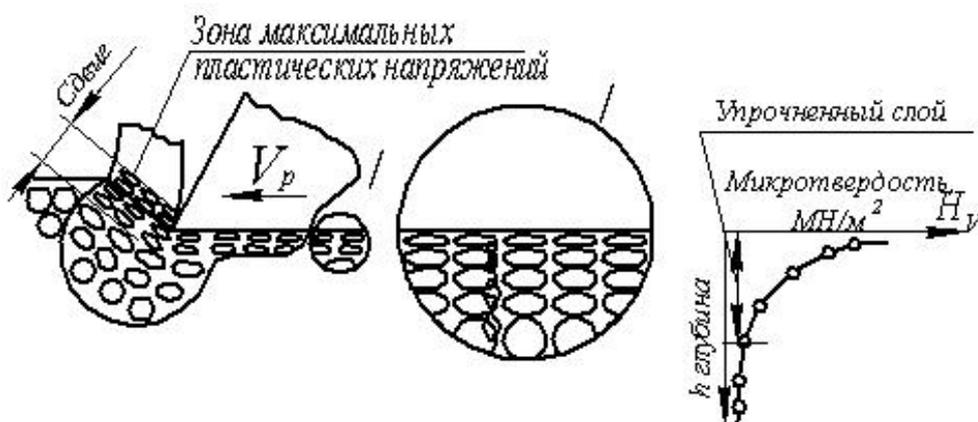


Рис. 2.9. Схема образования поверхностного слоя

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Зерна металла, попадая в зону сдвига, удлиняются, приобретая ту или иную степень деформации. При удлинении зерна, т.е. при его пластической деформации в соответствии с теорией дислокаций, происходит упрочнение – наклеп. Это упрочнение еще больше увеличивается под площадкой износа инструмента за счет сдвига поверхностных слоев под действием сил трения. Следовательно, поверхностные слои по своим механическим свойствам будут отличаться от глубинных недеформированных слоев.

В зависимости от пластических свойств сталей или сплавов, от толщины среза (подачи) и скорости резания глубина наклепа может меняться от нескольких сотых долей миллиметра до нескольких десятых долей миллиметра (при черновой обработке).

При скоростном резании лезвийным инструментом могут возникать высокие температуры, которые являются одной из причин возникновения в поверхностном слое значительных остаточных напряжений.

Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при обработке резанием может быть объяснено рядом причин.

При отделении стружки от обрабатываемой поверхности на малых скоростях резания режущий инструмент вытягивает верхние волокна подрезцового слоя, которые претерпевают деформацию растяжения. После удаления режущего инструмента пластически растянутые верхние волокна обрабатываемой поверхности, связанные с нижними волокнами, приобретают остаточные напряжения сжатия, а нижележащие слои – напряжения растяжения.

При обработке металлов с большими скоростями и при температуре резания ( $t_p$ ) более  $500^\circ$  в поверхностном слое образуются напряжения растяжения (скоростное течение, фрезерование и т.д.). Рассмотрим, как они образуются. Объяснить это можно по схеме, предложенной Л.А. Одингом (рис. 2.10).

**I этап.** В результате воздействия тепла в зоне резания слой 1 нагревается до температуры выше  $t_p$  и находится в пластичном состоянии, практически лишенном напряжении. Слой 2, нагретый выше  $t_H$ , но ниже  $t_p$  претерпевает упругую деформацию расширения, которой мешает с одной стороны инструмент, с другой – холодный слой 3. В слое 2 создаются сжимающие напряжения, а в слое 3 остаются исходные («+» или «-») напряжения.

**II этап.** После окончания резания слой 1 охлаждается ниже  $f_p$  за счет отвода тепла в охлаждающую жидкость и становится непластичным. Объем 1 слоя уменьшается в процессе остывания, но этому мешает еще нагретый слой 2. Поэтому в 1 слое возникают растягивающие напряжения, во 2 слое сжимающие и в 3 холодном слое – исходные.

**III этап.** После окончательного остывания в верхнем 1 слое усиливаются растягивающие напряжения, а в слое 2 сжимающие с переходом в слое 3 в исходные.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

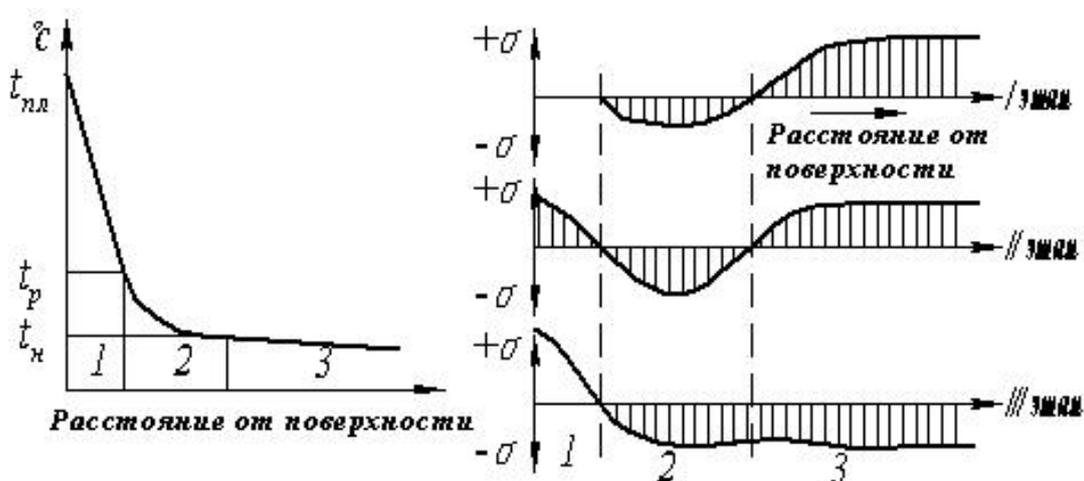


Рис. 2.10. Схема возникновения остаточных напряжений в поверхностном слое (по Одингу):  $t_H$  – нормальная температура;  $t_p$  – температура пластического состояния;  $t_{пл}$  – температура плавления

### 2.9. Влияние процессов шлифования на изменение поверхностного слоя сталей $HRC > 40$ единиц

В процессе резания лезвийным инструментом поверхностный слой нагревается не выше температуры фазовых и структурных превращений, то есть не выше  $840^\circ$ .

В процессе шлифования (см. рис. 2.11), который осуществляется при скорости вращения круга  $35...50$  м/с и скорости вращения детали  $20...40$  м/мин, на дуге контакта от последовательного воздействия зерен абразивного круга контактная температура в зоне резания поднимается до  $1540^\circ$  (рис. 2.12).

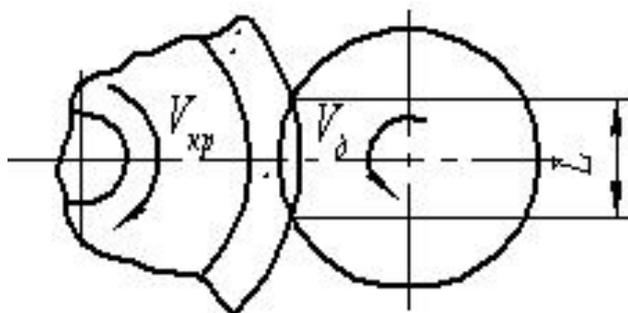


Рис. 2.11. Схема круглого шлифования:  $L$  – дуга контакта круга с деталью

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

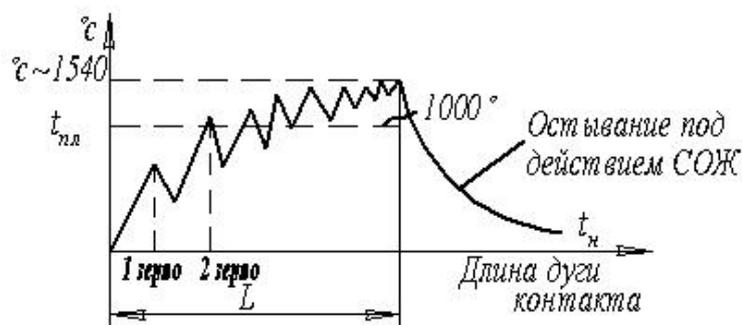


Рис. 2.12. Схема нагрева поверхностного слоя

Для закаленных деталей характерна структура мартенсита. Причем, чем больше твердость стали после закалки, тем больше процентное содержание структуры мартенсита. Мартенсит – это практически оставшийся аустенит с гранцентрированной кубической решеткой  $Fe_\gamma$  и определенные размером решетки. Так как контактная температура шлифования выше критической температуры фазовых превращений ( $840^\circ$ ), то в поверхностном слое шлифованной детали структура неустойчивого метастабильного мартенсита переходит в ту или иную структуру отпуска (троостит, сорбит) вплоть до мягкого  $Fe_\alpha$ , которые имеют структуру объемноцентрированного куба с меньшим параметром решетки, что приводит к уменьшению объема отпущенного слоя.

Таким образом, переход  $Fe_\gamma$  в  $Fe_\alpha$  вызывает, во-первых, резкую потерю микротвердости и прочности, так как расстояние между атомами  $Fe_\alpha$  больше, чем у  $Fe_\gamma$ , а число атомных связей меньше, чем у  $Fe_\gamma$ ; и во-вторых, т.к. объем решетки  $Fe_\alpha$  больше, чем объем решетки  $Fe_\gamma$ , то изменение структуры влечет за собой уменьшение объемов поверхностного слоя, который стремится сжаться, а так как ему мешает сжаться сердцевина детали, то отпущенный поверхностный слой оказывается сильно растянутым и в нем возникают очень большие напряжения растяжения. На рис. 2.13а представлена схема микрошлифа и зависимости микротвердости и напряжений для случая образования структур отпуска.

Для высокоуглеродистых сталей У8, У10, ШХ15 на самой поверхности при резком охлаждении СОЖ может образоваться слой вторичной закалки (рис. 2.13б),

Так как стали, до разрушения, выдерживают напряжения растяжения примерно в 4 раза меньше, чем напряжения сжатия, то зачастую поверхностные напряжения от шлифования вызывают появление микротрещин на поверхности либо сразу после шлифования, либо во время эксплуатации. Шлифовальные трещины, образуемые из-за высокой температуры шлифования, выглядят на поверхности как хаотично расположенные короткие (1...2 мм) и довольно частые трещины. На микрошлифе они располагаются не глубже слоя отпуска и заканчиваются в конце слоя, как бы стремясь отделить его от неизменных по структуре глубинных слоев (рис. 2.14).

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

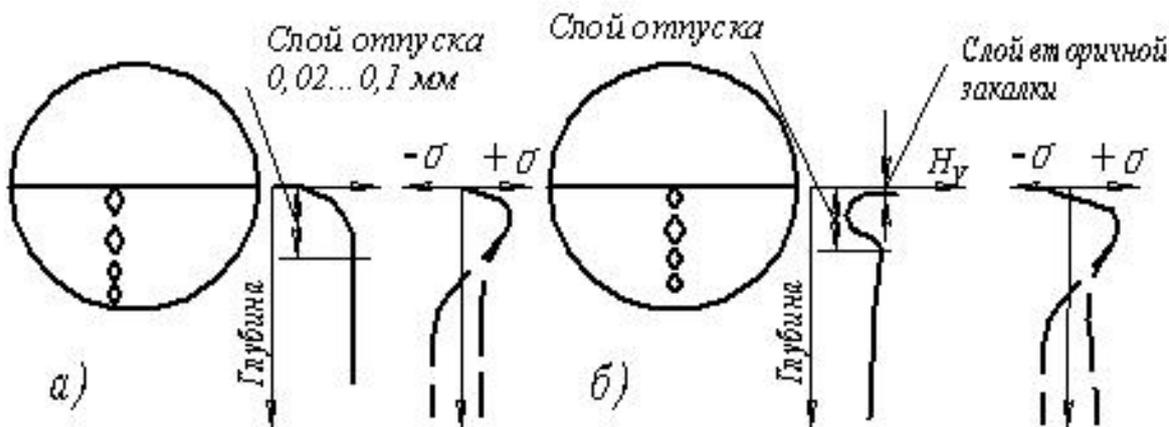


Рис. 2.13. Схема микрошлифа шлифованной поверхности и характер распределения микротвердости и остаточных напряжений по глубине слоя: а) случай образования структур отпуска; б) случай образования слоя вторичной закалки

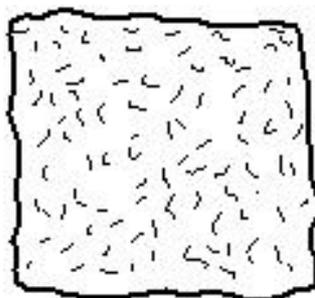


Рис. 2. 14. Вид микротрещин после операции шлифования

Трещины можно определить, помещая деталь в масляную ванну, в которой во взвешенном состоянии находятся мельчайшие железные опилки, которые под действием магнитного поля оседают по границам трещин. Вынув деталь из ванны, можно визуально обнаружить трещины.

На практике встречаются трещины, размеры которых доходят до нескольких миллиметров и ориентированы они по форме детали (рис. 2.15)

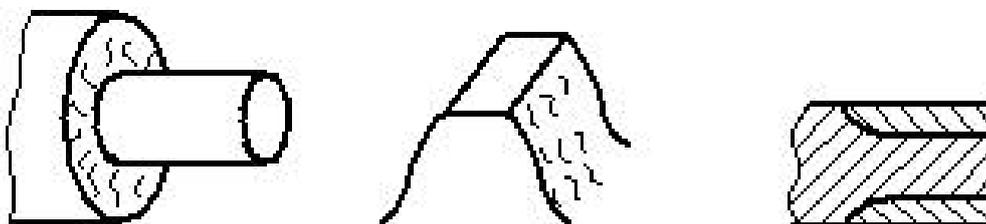


Рис. 2 15. Характер трещин от суммарного влияния заготовительных операций, термической обработки и шлифования

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

На микрошлифе такие трещины видны как глубокие, большей толщины отпущенного слоя, и перпендикулярные обработанной поверхности трещины. Причиной возникновения таких трещин является общее напряженное состояние всей детали, обусловленное неблагоприятным режимом термической обработки. Причем эти трещины могут появиться после термообработки до шлифования, но они просто не видны, а могут образоваться в процессе шлифования, при котором возникают напряжения растяжения отпущенного слоя, сложатся с напряжениями от термической обработки. В этом случае шлифовальные напряжения являются лишь толчком, стимулирующим развитие термических трещин. Такие трещины не удастся ликвидировать за счет уменьшения нагрева при шлифовании (применением более мягких кругов, уменьшением подач, увеличением скорости детали). Они могут быть ликвидированы лишь за счет изменения режимов термической обработки.

Трещины могут образоваться не сразу после шлифования, а в процессе эксплуатации детали и даже при ее вылеживании на складе. Поэтому ответственные детали машин (шейки коленчатых валов, поршневые пальцы, торсионы и другие детали), работающие на усталость, проходят после шлифования дополнительную отделочную обработку для снятия со шлифованных деталей отпущенного и напряженного слоя. К такой обработке относятся хонингование, суперфиниширование алмазными или абразивными брусками, обработка шкуркой, доводка абразивными или алмазными пастами.

В деформированном напряженном поверхностном слое изменяются также и другие физические свойства: повышается электросопротивление, увеличивается остаточный магнетизм и коэрцитивная сила. С увеличением наклепа понижается магнитная проницаемость. Поверхность металла обладает повышенной химической активностью и в реальных условиях неизбежно адсорбирует атомы элементов окружающей среды, покрываясь слоями адсорбированных газов, паров воды и жиров.

Воздействие, внешней среды приводит к образованию на поверхности металла различных соединений, прежде всего различных окислов. В результате диффузии в поверхностном слое могут возникнуть химические соединения основного материала с проникающими извне веществами. Диффузионная подвижность атомов может привести к перераспределению концентрации легирующих элементов. Так, благодаря диффузии при высоких температурах в поверхностном слое стальных деталей может произойти обезуглероживание. Характер структуры, глубина залегания структурных составляющих поверхностного слоя зависит от метода обработки. Если рассмотреть структуру поверхностного слоя одной и той же стали при двух различных видах обработки, например шлифовании и притирке, то будем иметь картину, представленную на рис. 2.16.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

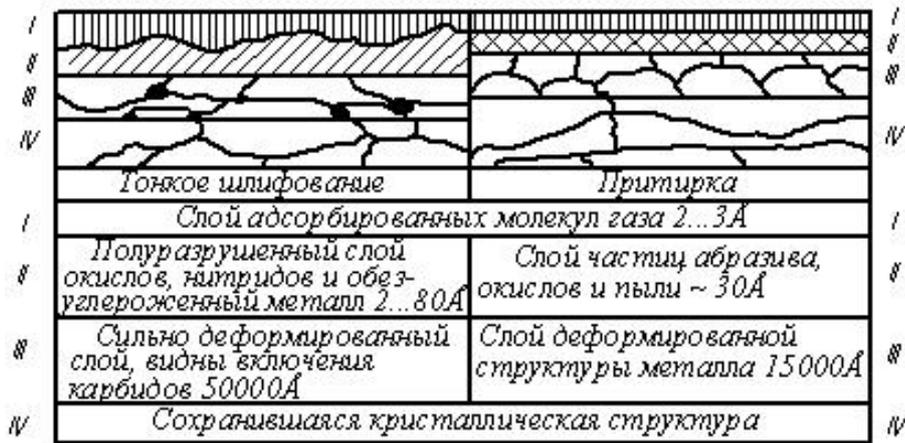


Рис.2.16. Структура поверхностного слоя после шлифования и притирки

### 2.10. Методы исследования поверхностного слоя

Для оценки степени пластической деформации и напряженности поверхностного слоя после механической обработки в инженерной практике чаще применяют методы измерения микротвердости и остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей. Более точную оценку качества поверхностного слоя можно получить методами рентгеноструктурного и металлографического анализов.

Для измерения микротвердости обычно используется прибор ПМТ-3, на котором алмазной 4-гранной призмой под действием малых нагрузок (для закаленной стали не более  $10\text{H}$ ) можно измерять микротвердость как отдельных зерен и структурных составляющих, так и всего поверхностного слоя. Сущность метода заключается в том, что при значительной глубине измененного слоя ( $0,1\text{...}0,2\text{ мм}$  и более) под небольшим углом к исследуемой поверхности  $I$  производится плоский косой срез (рис. 2.17), который окончательно обрабатывается притиркой пастами ГОИ на чугунных и стеклянных плитах. О величине микротвердости судят по размеру диагонали отпечатка «С», получаемого на поверхности среза, который, замеряется на приборе (рис. 2.17а).

Глубина слоя, на которой значения микротвердости становятся постоянными и равными микротвердости исходного материала, принимаются за общую глубину измененного слоя.

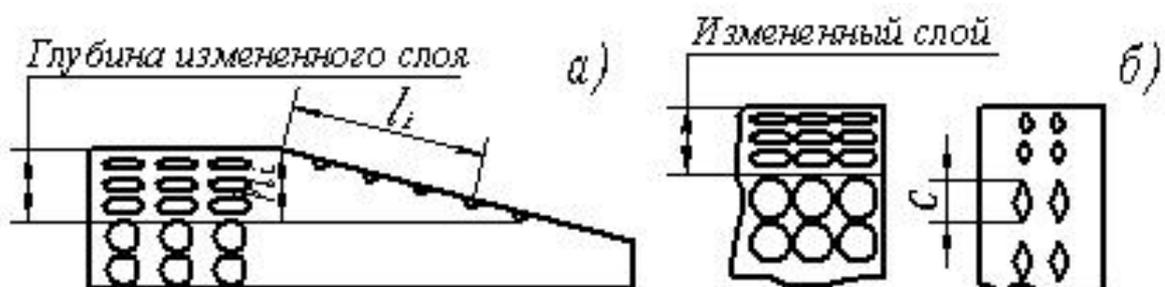


Рис.2.17. Схема для замера микротвердости поверхностного слоя:  
а) косой срез; б) срез, перпендикулярный исследуемому слою

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

При измененных слоях в несколько сотых миллиметра алмазная пирамида проваливается в исходный слой металла на косом срезе, поэтому делается срез перпендикулярно поверхностному слою на этом измененном слое делается измерение микротвердости (рис. 2.176). Напряжения в поверхностном слое определяются по методике академика Н.Н. Давиденкова. Методика позволяет определять тангенциальные и осевые (нормальные) напряжения. Сущность метода Н.Н. Давиденкова заключается в определении тангенциальных напряжений по модулю упругости и деформации разрезанных колец при последовательном удалении поверхностных слоев.

Образец – кольцо. Оно изготавливается из того же металла, что и деталь, при одинаковых режимах обработки. Исследуемая поверхность кольца – наружная. На торцевой поверхности кольца (см. рис. 2.18) наносятся в точках  $A_1$  и  $A_2$  кернения (риски) и замеряется расстояние  $L_1$ . Между точками  $A_1$  и  $A_2$  кольцо разрезается, а затем производится повторное измерение расстояния  $L_2$  между теми же точками  $A_1$  и  $A_2$ . После разрезки кольца расстояние увеличится или уменьшится в зависимости от созданных в исследуемом наружном поверхностном слое напряжений. Разность  $(L_2 - L_1)$  характеризует величину напряжений, а знак разности – знак напряжений.

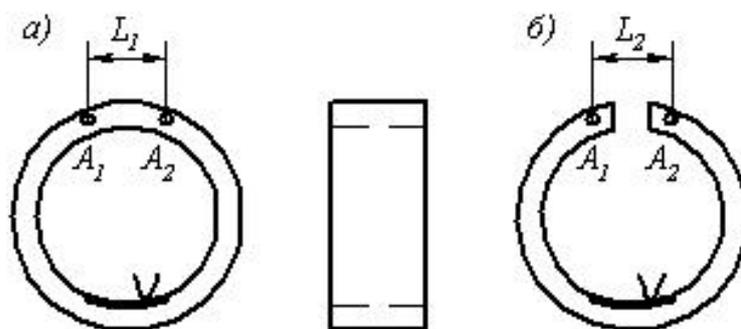


Рис. 2.18. Образец для замера напряжений:  
а) кольцо до разрезки; б) кольцо после разрезки.

Для выявления напряжений, оставшихся в поверхностном слое применяют метод тензометрирования деформаций при установке тензодатчиков непосредственно на исследуемые образцы с непрерывной регистрацией величины деформации в процессе снятия тончайших поверхностных слоев путем электрополирования. Все поверхности образца, кроме исследуемых, защищаются от воздействия электролита кислотоупорной резиной и клеем № 88.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

При снятии тонких слоев с образца, который служит анодом, происходит деформация последнего, а с ним и тензодатчика. Изменение сопротивления тензодатчика регистрируется самопишущим прибором по времени. Толщина снятого электрополированием слоя за определенный промежуток времени определяется по тарировочному графику, построенному по данным предварительно проведенного эксперимента. Общее тангенциальное остаточное напряжение складывается из трех составляющих

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 ,$$

где  $\sigma_1$  – остаточные напряжения, снимаемые при разрезании кольца.

Эта часть напряжений возникает во всем объеме детали за счет объемных напряжений во всей заготовке;

$\sigma_2$  – напряжение, оставшееся после разрезки в сечении кольца, выявляется при постепенном удалении слоев. В каждом слое к моменту, когда закончено удаление всех предыдущих слоев, напряжение равно  $\sigma_2$ , оно снимается вместе с удаляемым слоем;

$\sigma_3$  – поправка, которая учитывает напряжения, снятые в слое за удаления всех предыдущих слоев.

На рис. 2.19 для примера показан характер распределения микротвердости напряжений в поверхностном слое детали, имеющей прижоги после шлифования. По аналогичной методике определяются осевые остаточные напряжения, только в качестве образцов используются пластины, вырезанные из втулки.

### **2.11. Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей**

Качество поверхности обработанных деталей имеет существенное влияние на их долговечность. Долговечность детали зависит от возможностей детали сопротивляться коррозии, износу и усталостному разрушению и от способности сохранять в процессе эксплуатации прочность неподвижных соединений.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

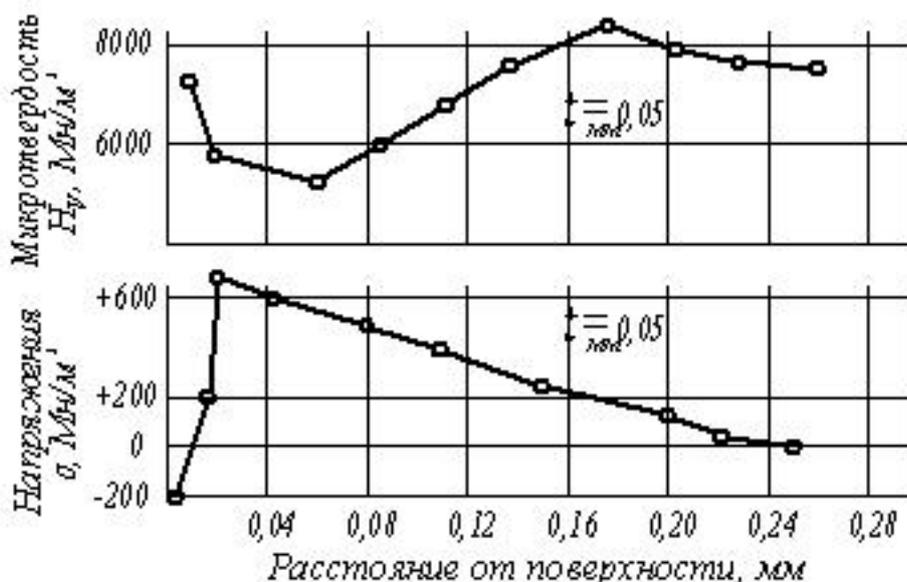


Рис. 2.19. Распределение микротвердости (а) и остаточных напряжений (б) по глубине поверхностного слоя шлифованной закаленной стали У8:

$$S = 3750 \text{ мм/мин}; n_{\text{изд}} = 77 \text{ об/мин}; V_{\text{изд}} = 7,5 \text{ м/мин}$$

Защитные покрытия, предохраняющие поверхность от коррозии (окраска, никелирование) не могут быть использованы на трущихся поверхностях. В таких случаях эффективным средством повышения антикоррозийной стойкости является улучшение качества поверхности.

Коррозия вызывается атмосферными влияниями, а также действием различных газов и жидкостей.

Корродирующие вещества осаждаются в углублениях неровностей и распространяются вдоль склонов шероховатостей (рис. 2.20). В результате действия этих веществ образуются новые гребешки за счет разъедания и разрушения прежних гребешков. Если коррозия сопровождается истиранием, то процесс разрушения происходит быстрее.

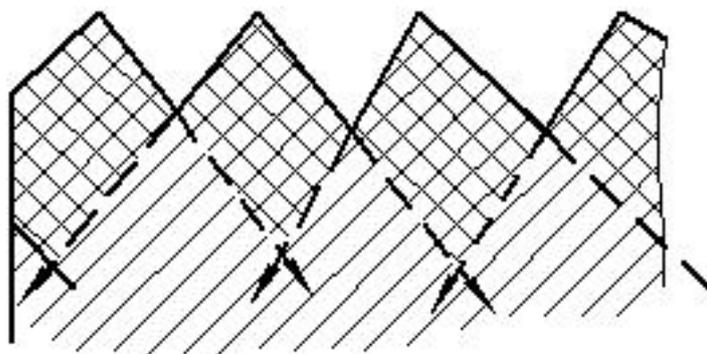


Рис.2.20. Схема действия на металл корродирующих веществ

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Кроме высоты профиля на коррозионную стойкость влияет радиус закругления при впадинах. Чем больше радиус, тем более устойчива поверхность против коррозии.

Износостойкость деталей также в значительной степени зависит от высоты и формы шероховатостей.

В начальный период в процессе приработки в местах контакта развиваются напряжения выше предела текучести, происходит сдвиг, сжатие и интенсивный износ вершин шероховатостей. В процессе приработки создается новая рабочая шероховатость поверхности, которая отличается по форме и размерам от технологической шероховатости и имеет направление, близкое к направлению скольжения, и которая является оптимальной в течение дальнейшего изнашивания. Необходимое направление следов механической обработки влияет на коэффициент трения и определяется условиями эксплуатации. Износостойкость шероховатостей зависит от давления и смазки. При больших давлениях износ практически не зависит от шероховатости. При малых давлениях увеличение шероховатости приводит к увеличению износа. Увеличение микрогеометрических отклонений, волнистости также приводит к увеличению износа поверхности.

Качество поверхности оказывает значительное влияние на усталостную прочность деталей машин. Разрушение детали, в особенности при переменных нагрузках, происходит чаще в результате концентрации напряжений в местах неровностей поверхности. Коэффициент концентрации для поверхностей, обработанных резанием, лежит в пределах 1,5...2,5. Чем чище обработана поверхность, тем меньше возможность возникновения поверхностных трещин, вызванных усталостью металла.

Качество поверхности влияет на стабильность посадок сопрягаемых деталей.

Например, для соединений с натягом при запрессовке детали происходит «сглаживание» неровностей сопрягаемых поверхностей, вызывающее ослабление натяга.

Значительное влияние на качество запрессовки оказывают волнистость поверхностей сопряжения по окружности и огранка. Эти погрешности формы снижают прочность запрессовки, так как уменьшается фактическая поверхность контакта деталей.

Наклеп в поверхностной слое сопрягаемых деталей уменьшает смятие поверхностных гребешков при запрессовке и эксплуатация и поэтому увеличивает надежность прессовых соединений. Наличие в поверхностном слое втулки сжимающих напряжений, а в поверхностном слое вала растягивающих напряжений способствует наименьшему износу прессовых соединений.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

## 2.12. Технологическое обеспечение требуемых эксплуатационных качеств деталей машин

В литературе распространено представление о том, что состояние внешних слоев металлов определяется последней механической операцией. Справедливость таких взглядов можно отнести только к микрогеометрии, но далеко не всегда к физическому состоянию поверхностного слоя.

При выборе методов окончательной обработки необходимо обеспечить заданную точность обработки и шероховатость обработанной поверхности, и требуемые параметры физико-механических свойств поверхностного слоя. Причем, учитывая технологическую наследственность необходимо обеспечить требуемые параметры качества поверхности уже на операциях, предшествующих окончательным операциям или техническим переходам.

С целью уменьшения разницы в твердости различных участков поверхности детали, вызванных неравномерной пластической деформацией и различиями структурными превращениями и снижения уровня неблагоприятных остаточных напряжений часто вводят в технологический процесс методы поверхностно-пластического деформирования, методы термической и термохимической обработки.

К таким методам можно отнести: дорнование отверстий; обкатывание шариками, роликами или алмазными наконечниками; дробеструйная обработка; цементация с закалкой; азотирование.

Для снятия упрочнения применяют отжиг, нормализацию, старение, изотермический нагрев.

Рассмотрим кратко сущность и возможности вышеперечисленных методов, которые более подробно излагаются в разделах методов обработки курса «Технологии машиностроения».

Дорнование – метод проталкивания под прессом через отверстие дорна или прошивки. Повышается точность, уменьшается шероховатость до  $R_a=0,16$  мкм, появляется наклеп и остаточные напряжения сжатия. Повышается выносливость образцов с дорнованными отверстиями по сравнению с просверленными отверстиями почти в 4 раза.

Обкатывание роликами и шариками выполняется на станках токарной группы.

К вращающейся детали прижимается закрепленная в суппорте державка с роликом или шариком с усилием 1000...3000 Н. При продольном перемещении суппорта за 2...3 рабочих хода производится обработка заготовки. В зависимости от предшествующей обработки возможно получение поверхности с  $R_a=0,63...0,16$  мкм и наклепом на глубину до 4...5 мм (вагонные оси). Усталостная прочность обкатанных поверхностей образцов по сравнению со шлифованными поверхностями возрастает в несколько раз.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Еще более высокие показатели качества достигаются при алмазном выглаживании. Рабочей поверхности алмаза придают сферическую форму с радиусом 1,5...4 мм. Заготовка вращается со скоростью 40...50 м/мин. Алмаз имеет подачу 0,04...0,1 мм/об. Усилие прижатия инструмента 50...200 Н. Благодаря высокой твердости, износостойкости алмаза по методу алмазного выглаживания можно обрабатывать как закаленные, так и вязкие жаропрочные стали и сплавы.

Дробеструйная обработка применяется для повышения усталостной прочности деталей машин сложной формы. Отдельные дробинки из стали, чугуна или стекла, выбрасываемые направленным потоком сжатого воздуха или быстровращающейся крыльчаткой на обрабатываемую поверхность, создают определенное упрочнение поверхностного слоя. Характеристики упрочненного слоя зависят от размеров дробинки, скорости удара, угла направления, расхода дроби и времени обработки. Срок службы повышается для пружин в 1,5...2 раза, для ресор в 10...12 раз.

Для повышения качества поверхности широко применяются также термические и термохимические методы: поверхностная закалка с отпуском, цементация, азотирование, цианирование. Для уменьшения или снятия наклепа и остаточных напряжений применяется изотермический нагрев для каждого сплава можно подобрать температурный режим и продолжительность изотермического нагрева (в вакууме), после чего напряжения уменьшаются до заданного уровня или полностью снимаются.

Весьма эффективным методом регулирования остаточных напряжений является ускоренный сквозной нагрев и охлаждение детали в печи, в расплаве солей, индукционным нагревом ТВЧ. По сравнению с поверхностным пластическим деформированием тепловое регулирование остаточных напряжений не вызывает дополнительного наклепа поверхностного слоя.

Таким образом, управляя методам обработки, можно создать желаемое качество поверхности, соответствующее определенным условиям эксплуатации детали.

### **2.13. Прогнозирование глубины изменения поверхностного слоя при проектировании технологических процессов**

Аналитический расчет глубины деформированного упрочнения позволит заранее определить ожидаемую глубину измененного поверхностного слоя, исходя из исходных условий проведения технологической операции (материал заготовки, задаваемые режимы резания, геометрия режущего инструмента).

Аналитический расчет глубины поверхностного слоя основан на анализе напряженного поля под действием сил резания.

Для большей наглядности анализ напряженного поля проведем на примере свободного резания, т.е. будем рассматривать обработку пластины некоторой ширины «в» (рис. 2.21).

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Основные параметры определяющие процесс резания:  $\gamma$  – передний угол,  $\beta_1$  – угол сдвига,  $a$  – толщина среза,  $P_z$  и  $P_y$  – главная и радиальная составляющие сил резания,  $\xi$  – угол между направлением скорости и равнодействующей.

Под действием сил резания в поверхностном слое в его произвольной точке М (рис. 2.21) будут возникать радиальные напряжения  $\sigma_r$ .

Из курса сопротивления материалов зависимость для радиальных напряжений  $\sigma_r$  запишется в виде

$$\sigma_r = -\frac{c_1 \cdot R \cdot \cos \alpha}{b \cdot r},$$

4

где  $c_1 = \frac{1}{2(\pi + \beta_1) - \sin 2\xi + \sin 2(\xi + \beta_1)}$  – постоянная;

$R$  – равнодействующая сил резания;

$\alpha$  – угол между направлением равнодействующей силы и радиусом, проведенным в точку М (см. рис. 2.22);

$b$  – ширина пластины;  $r = OM$ .

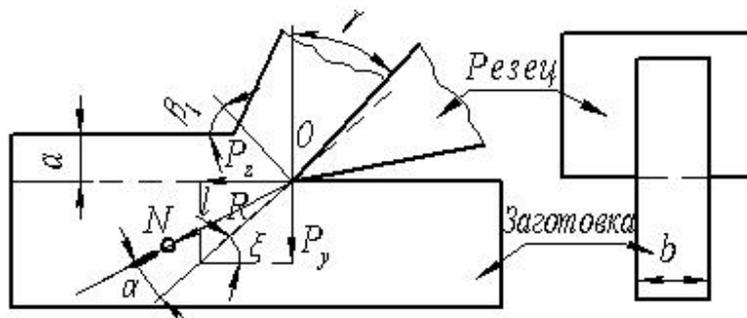


Рис. 2.21. Схема резания

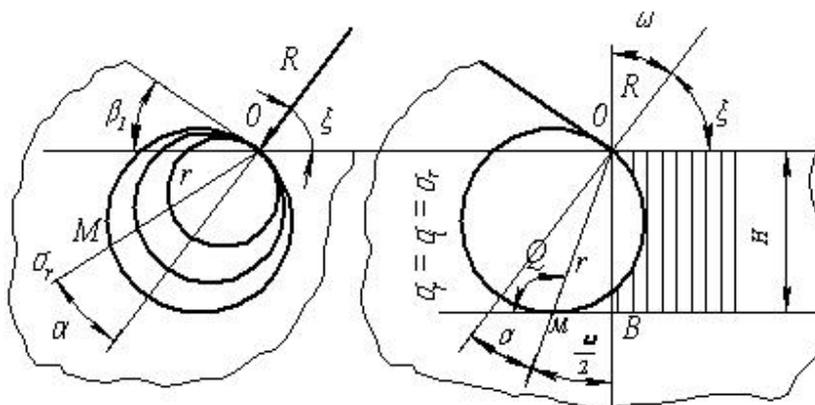


Рис. 2.22. Схема для определения глубины наклепа

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

Анализ зависимости для  $\sigma_r$  показывает, что в точке приложения равнодействующей силы  $O$  соприкасаются окружности равных напряжений (изохромы). Диаметр окружности равных напряжений, как это следует из рис. 2.22, равен

$$d = \frac{r}{\cos \alpha}$$

Таких окружностей можно провести бесчисленное множество. Однако существует и такая окружность, напряжения на контуре которой равны пределу текучести обрабатываемого материала заготовки, т.е.  $\sigma_r = \sigma_T$ . Кроме того, справедливо  $\sigma_r = \sigma_i$ , где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

На рис. 2.22 изображена условная схема силового нагружения, на которой нанесена окружность равных напряжений, соответствующая условию

$$\sigma_r = \sigma_T = \sigma_i$$

Очевидно, что внутри области, очерченной этой окружностью, возникнут пластические деформации, которые останутся и после снятия внешней нагрузки. Что касается области внешнего контура, то при нагружении будут развиваться упругие деформации, которые после прекращения акта нагружения исчезнут, диаметр названной выше окружности может быть найден на основании следующего выражения:

$$\sigma_r = -\frac{c_1 \cdot R \cdot \cos^2 \frac{\omega}{2}}{b \cdot r} = -\frac{c_1 \cdot R}{b \cdot \frac{r}{\cos \alpha}} = -\frac{c_1 \cdot R}{b \cdot d} = \sigma_i = \sigma_T,$$

откуда

$$d = -\frac{c_1 \cdot R}{b \cdot \sigma_T}$$

Поскольку процесс резания близок к процессу сжатия, учтем знак предела текучести на сжатие (–).

При относительном перемещении резца вместе с ним движется формируемое силой  $R$  напряженное поле. В конечном итоге на поверхности изделия останется слой с остаточными деформациями, характеризуемый наклепом.

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

На рис. 2.22 
$$h_H = DB = r \cdot \cos \frac{\omega}{2},$$

$$MOB = \alpha = \frac{\omega}{2} = \frac{90^\circ - \zeta}{2}$$

Окончательно можно определить глубину измененного слоя

$$h_H = + \frac{c_1 \cdot R \cdot \cos^2 \frac{\omega}{2}}{b \cdot \sigma_T}$$

Пример. Определим глубину слоя с наклепом для следующих условий: при обработке стали 45 ( $\sigma_T = 600$  МПа) на режиме  $b = 1,0$  мм,  $a = 0,05$  мм,  $V = 100$  м/мин получено  $P_Z = 800$  Н,  $P_y = 800$  Н,  $\beta = 25^\circ$ .

Соответственно  $R = 1130$  Н,  $\zeta = 45^\circ$ .

$$c_1 = \frac{4}{2(\pi + \beta_1) - \sin 2\zeta + \sin 2(\zeta + \beta_1)} = \frac{4}{2(3,14 + 0,44) - 1 + 0,64} = 0,59$$

$$\frac{\omega}{2} = \frac{90^\circ - \zeta}{2} = 22,5^\circ$$

Глубина слоя с деформационным упрочнением составит

$$h_H = + \frac{c_1 \cdot R \cdot \cos^2 \frac{\omega}{2}}{b \cdot \sigma_T} = \frac{0,59 \cdot 1130 \cdot 0,85}{4 \cdot 600} = 0,256 \text{ мм}$$

[К началу главы](#)

[К оглавлению](#)

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 358 с.
2. Егоров, М.Е. Технология машиностроения / М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, В.Л. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1976. – 535 с.
3. Иващенко, И.А. Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов: учебное пособие для авиационных вузов / И.А. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
4. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке: учебное пособие / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: КПТИ, 1981. – 90 с.
5. Корсаков, В.С. Основы технологии машиностроения / В.С. Корсаков. – М.: Высшая школа, 1977. – 411 с.
6. Маталин, А.А. Технология механической обработки / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
7. Соломин, И.О. Применение математической статистики в технологии машиностроения / И.О. Соломин. – М.: Машиностроение, 1972. – 336 с.

[К оглавлению](#)

**Гузеев Виктор Иванович,  
Буторин Геннадий Иванович,  
Шамин Владимир Юрьевич**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Учебное текстовое электронное издание

1,94 Мб

1 оптический компакт-диск

Редактор Е.В. Федорова

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано к использованию 10.12.2013.  
Тираж 100 экз. Заказ 206.

---

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.