



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Металлургия и технология обработки материалов»

**А. М. Урбанович, С. Б. Сарело, А. Н. Швецов**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ ПРОКАТНОГО И ВОЛОЧИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности 1-42 01 01  
«Металлургическое производство  
и материалобработка (по направлениям)»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2018**

УДК 621.77.07(075.8)  
ББК 34.621-5+34.622-5я73  
У69

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 6 от 28.02.2017 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Металлургия и литейное производство» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. с.-х. наук *И. В. Астапенко*

**Урбанович, А. М.**

У69 Технология изготовления оснастки прокатного и волочильного производства : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» днев. и заоч. форм обучения / А. М. Урбанович, С. Б. Сарело, А. Н. Швецов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 122 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-367-7.

Предназначен для получения практических навыков по определению жесткости технологической системы и погрешностей обработки поверхностей, обеспечению точности размеров деталей оснастки и качества поверхностей, по использованию статистических методов исследования точности механической обработки деталей, получения композиционных материалов и процессов химико-термической обработки, а также для закрепления теоретических знаний.

Для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)», дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.77.07(075.8)  
ББК 34.621-5+34.622-5я73

ISBN 978-985-535-367-7

© Урбанович А. М., Сарело С. Б.,  
Швецов А. Н., 2018  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2018

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Цель работы:* получение практических навыков по определению величины погрешности закрепления заготовки и по оценке погрешности обработки, вызванной упругими деформациями технологической системы «станок–приспособление–инструмент–заготовка».

#### *Теоретические основы работы*

Важнейшие показатели качества машин в значительной степени определяются точностью их изготовления. Повышение нагрузок и скоростей работы машин, требований надежности обеспечиваются повышением точности изготовления их механизмов, отдельных деталей и машин в целом. Под точностью обработки понимают соответствие формы, размеров и положения обрабатываемых поверхностей требованиям чертежа и технических условий. По ряду причин при любых методах обработки полученные значения параметров обработанных поверхностей отличаются от заданных чертежом их номинальных значений. Разность этих значений называют погрешностью обработки. Суммарная погрешность механической обработки является следствием влияния на этот процесс ряда факторов, каждый из которых вызывает появление отдельной первичной погрешности.

Суммарную погрешность обработки или поле рассеяния выполняемого размера можно в общем виде выразить следующей зависимостью:

$$\Delta = f(\Delta y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta t, \sum \Delta \Phi),$$

где  $\Delta y$  – погрешность (поле рассеяния) выполняемого размера, которая возникает в результате упругих отжатий звеньев технологической системы под влиянием нестабильности сил резания. Величину  $\Delta y$  определяют для сечения заготовки, где жесткость системы минимальна;  $\varepsilon$  – погрешность установки заготовки;  $\Delta H$  – погрешность настройки станка, которая является разностью предельных положений режущего инструмента на станке, при настройке его на выполняемый размер;  $\Delta u$  – погрешность из-за размерного износа (по задней поверхности) режущего инструмента;  $\Delta t$  – погрешность выполняемого размера, вызываемая тепловыми деформациями системы;  $\sum \Delta \Phi$  – суммарная

погрешность формы данного элемента, вызываемая геометрическими неточностями станка, деформациями заготовки под влиянием сил закрепления, неравномерным по различным сечениям заготовки упругим отжатием технологической системы и др.

Существует три следующих метода расчета значений погрешностей для конкретно заданных условий обработки:

1) расчетно-аналитический, при котором расчет ведется по аналитическим (эмпирическим) зависимостям, описывающим протекание процесса и условий возникновения погрешностей. Он основан на учете физических явлений и позволяет выявить причины образования погрешностей;

2) вероятностно-статистический метод, который позволяет, не раскрывая физической сущности явлений, определять точность обработки большой партии деталей;

3) расчетно-статистический метод, сочетающий положительные стороны двух предыдущих методов, так как позволяет рассчитывать первичные погрешности как статистическим, так и расчетным путем.

При известных первичных погрешностях суммарную погрешность обработки можно определять методами полной или неполной взаимозаменяемости.

Суммарная погрешность обработки по методу полной взаимозаменяемости определяется алгебраическим сложением по максимуму и минимуму приведенных значений первичных величин погрешностей с использованием следующей зависимости:

$$\Delta = \Delta y + \varepsilon + \Delta H + \Delta u + \Delta \tau + \sum \Delta \Phi. \quad (1.1)$$

Расчет суммарной погрешности обработки этим методом прост, однако значение  $\Delta$  получается завышенным, что приводит к увеличению допуска на обработку и увеличению промежуточных и общих припусков на обработку.

Поэтому суммирование погрешностей целесообразнее производить по методу неполной взаимозаменяемости с использованием следующей зависимости:

$$\Delta = \sqrt{\Delta y^2 + \varepsilon^2 + \Delta H^2 + 3\Delta u^2 + 3\Delta \tau^2 + \sum \Delta \Phi}. \quad (1.2)$$

Рассмотрим несколько подробнее факторы, обуславливающие возникновение следующих первичных погрешностей, используемых в лабораторной работе: погрешность установки заготовок в приспособ-

лениях  $\epsilon$  и погрешность обработки, обусловленную жесткостью технологической системы  $\Delta_u$ .

Погрешность установки заготовок в приспособления ( $\epsilon$ ), как одна из составляющих общей погрешности выполняемого размера, состоит из: погрешности базирования –  $\Delta_b$ ; погрешности закрепления –  $\Delta_z$  и погрешности положения заготовки, вызываемой неточностью приспособления, –  $\Delta_{пр}$ .

Погрешности базирования возникают при несовпадении измерительной и технологической баз и определяется разностью расстояний от измерительной базы до установленного на размер инструмента. Для устранения и уменьшения погрешности базирования следует совмещать технологические и инструментальные базы, повышать точность выполнения размеров технологических баз, выбирать рациональное расположение установочных элементов и назначать правильно их размеры или уменьшать зазоры при посадке заготовок на охватываемые установочные элементы.

Погрешностью закрепления называется разность предельных расстояний от измерительной базы до установленного на размер инструмента в результате смещения обрабатываемых заготовок под действием сил закрепления. Зажимное усилие характеризуется: величиной действующей зажимной силы; направлением ее; точкой приложения. Следует отличать принудительное закрепление деталей и основанное на действии сил трения. Для повышения точности обработки следует стремиться к тому, чтобы усилие резания и другие большие усилия всегда воспринимались упорами или другими элементами, не зависящими от наличия сопротивления трения. Так, при установке заготовки в трехкулачковом патроне возникают погрешности закрепления в радиальном и осевом направлениях. В работе исследуется только погрешность, возникающая в осевом направлении.

Погрешность положения заготовки, вызываемая неточностью приспособления, определяется ошибками изготовления и сборки его установочных элементов, их прогрессирующим износом, а также ошибками установки и фиксации приспособления на станке. При использовании одного приспособления она представляет собой систематическую постоянную погрешность и устраняется соответствующей настройкой станка. При использовании нескольких одинаковых приспособлений, а также множественных приспособлений эта погрешность не компенсируется настройкой станка и входит полностью в погрешность приспособления.

В общем виде погрешность установки  $\varepsilon$  может быть представлена как векторная сумма:

$$\varepsilon = \Delta_{\delta} + \Delta_{\alpha} + \Delta_{\text{пр}}. \quad (1.3)$$

Для практических целей общая погрешность установки определяется в соответствии с правилами суммирования случайных величин по формуле

$$\varepsilon = 1,2 \cdot \sqrt{\Delta_{\delta}^2 + \Delta_{\alpha}^2 + \Delta_{\text{пр}}^2}. \quad (1.4)$$

Для определения погрешности обработки, вызванной упругими деформациями системы ( $\Delta y$ ), необходимо определить жесткость этой системы. Под жесткостью технологической системы станок-приспособление – инструмент – обрабатываемая заготовка понимают отношение силы резания, направленной нормально к обрабатываемой поверхности ( $P_y$ ), к смещению лезвия инструмента в направлении действия этой силы ( $y$ ) (рис. 1.1).

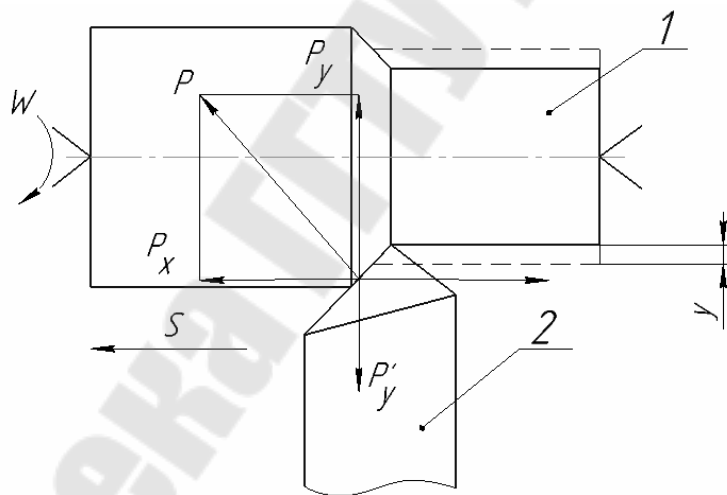


Рис. 1.1. Схема обработки заготовки на токарном станке:  
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – резец токарного станка

$$j = \frac{P_y}{y}, \text{ Н/мм}, \quad (1.5)$$

где  $P_y$  – составляющая силы резания, направленная нормально к обрабатываемой поверхности, Н;  $y$  – величина отжатия инструмента под воздействием силы  $P_y$ , мм.

При расчетах удобнее пользоваться величиной обратной жесткости, которая называется податливостью  $W$  :

$$W = \frac{1}{j}, \text{ Н/мм.} \quad (1.6)$$

Податливость технологической системы  $W_{\text{сист}}$  складывается из податливости составляющих ее элементов: податливости станка  $W_{\text{ст}}$  (включающей податливость приспособления и инструмента) и податливости детали  $W_{\text{дет}}$ , т. е.

$$W_{\text{сист}} = W_{\text{ст}} + W_{\text{дет}}. \quad (1.7)$$

Аналогично жесткость технологической системы определяется зависимостью

$$\frac{1}{j_{\text{сист}}} = \frac{1}{j_{\text{ст}}} + \frac{1}{j_{\text{дет}}}. \quad (1.8)$$

Наиболее распространенными являются следующие методы определения жесткости металлорежущих станков и их составных частей: статический (испытания проводятся на неработающем станке); производственный (испытания проводятся при обработке заготовки).

Сущность статического метода определения жесткости металлорежущих станков заключается в том, что элементы станка с помощью специальных приспособлений нагружают силой, воспроизводящей действия силы резания, и одновременно измеряют перемещение отдельных частей станка. Для таких испытаний имеются специальные стенды, которые включают нагружающее устройство с динамометром и устройства для измерения деформаций.

Производственный метод испытания жесткости станков основан на том, что при обработке заготовки с неравномерным припуском (изменяющаяся глубина резания  $t$ ) форма заготовки (эксцентricность, ступенчатость) копируется на обработанной поверхности детали. Причем степень копирования будет тем больше, чем меньше жесткость станка. При принятых условиях проведения опыта влияние всех факторов, кроме жесткости станка, практически исключается.

Податливость заготовки или детали теоретически можно определить по соответствующей формуле из курса «Сопротивление материалов»:

$$W_{\text{дет}} = \frac{l^3}{3EI}, \text{ Н/мм}, \quad (1.9)$$

где  $l$  – длина консоли, мм;  $E$  – модуль упругости, Н/мм<sup>2</sup> (для стали  $E = 2 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>);  $I$  – момент инерции поперечного сечения заготовки.

Для круглого сечения  $I = 0,05D^4$ , где  $D$  – диаметр заготовки в рассматриваемом сечении, мм.

### ***Оборудование, оснастка и материалы***

Токарно-винторезный станок модели 16К20 с трехкулачковым патроном

Резец из сплава Т15К6

Линейка слесарная

Штангенциркуль и микрометр

Индикатор часового типа ИЧ-10

Штатив с магнитным основанием ШМ-111

Заготовки из стального круглого проката:

1-я – диаметром  $D = 60$ – $80$  мм и длиной  $l = 80$ – $100$  мм;

2-я – диаметром  $D = 30$ – $50$  мм и длиной  $l = 100$ – $150$  мм.

### ***Техника безопасности***

1. Непосредственно перед выполнением работы проводится инструктаж по технике безопасности на металлорежущих станках.

2. Станок должен быть исправным и оснащен экраном, защищающим работающего от отлетающей стружки и смазочно-охлаждающей жидкости.

3. Перед включением станка убедиться в исправности заземления. Проверить, чтобы двери шкафа с электрооборудованием, крышки пульта управления, а также ограждения подвижных частей станка были закрыты и надежно закреплены.

4. Обработка заготовок на токарном станке осуществляется токарем или учебным мастером, имеющим соответствующую квалификацию, в присутствии студентов, выполняющих работу, и преподавателя.

### ***Выполнение работы***

**1. Определение погрешности закрепления заготовки в трехкулачковом патроне**

1.1. Установив первую заготовку в трехкулачковом патроне, проточить поочередно с двух сторон ее торцевые поверхности. Затем



установить на суппорт станка штатив с закрепленным индикатором, подвести наконечник индикатора к торцу заготовки с натягом 1–3 мм, установить стрелу индикатора на ноль поворотом шкалы. Заготовка при этом должна быть прижата вторым торцом к поверхности планшайбы патрона и закреплена (рис. 1.2).

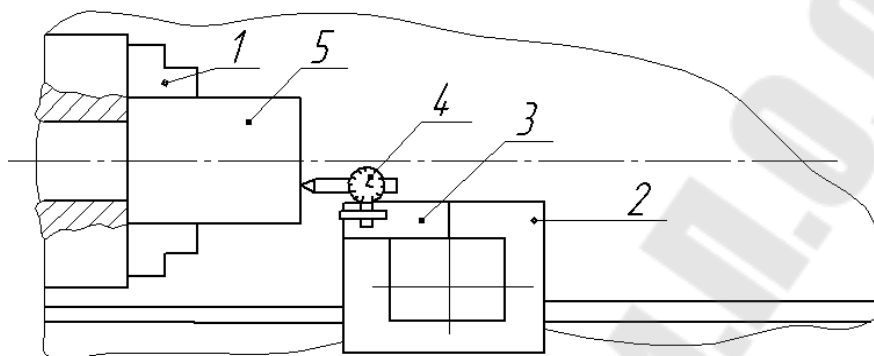


Рис. 1.2. Схема измерения погрешности закрепления заготовки:  
1 – трехкулачковый патрон; 2 – суппорт станка; 3 – штатив с магнитным основанием; 4 – индикатор; 5 – заготовка

1.2. Многократно проворачивая и закрепляя заготовку в патроне (40–50 раз), записывать показания индикатора, фиксирующего действительную величину погрешности закрепления. Из полученных данных выбрать наибольшее ( $\Delta_{\max}$ ) и наименьшее ( $\Delta_{\min}$ ) показания индикатора (с учетом знаков «+» и «-») и вычислить величину поля рассеяния погрешности осевых смещений заготовки ( $\Delta_{\text{закр}}$ ) по формуле

$$\Delta_{\text{закр}} = \Delta_{\max} - \Delta_{\min} \cdot \quad (1.10)$$

1.3. В интервале значений от  $\Delta_{\min}$  до  $\Delta_{\max}$  сгруппировать одинаковые показания индикатора и составить таблицу данных для построения графика распределения погрешностей осевых смещений заготовки при закреплении.

Относительная частота показаний индикатора (табл. 1.1) вычисляется из выражения

$$\frac{m}{n} 100,$$

где  $m$  – количество одинаковых показаний индикатора;  $n$  – общее количество измерений.

Таблица 1.1

## Данные для построения графика распределения погрешностей

Показания индикатора, мм	Частота показаний индикатора, $m$	Относительная частота, %
-0,02	2	4
-0,01	5	10
0	и т. д.	и т. д.
...		
0,09		
0,10		
$\Delta_{\text{закр}} = 0,12$ мм	$n = 50$	$\sum 100$ %

*Примечание.* В качестве примера графа «Показания индикатора» табл. 1.1 заполнена для интервала значений индикатора от  $\Delta_{\min} = -0,02$  мм до  $\Delta_{\max} = -0,02$  мм. Для первой строки рассматриваемого примера  $m = 2$ , следовательно относительная частота составит:  $\frac{2}{50} 100 = 4$  % и т. д.

1.4. По данным табл. 1.1 построить график распределения погрешностей осевых смещений заготовки при закреплении, откладывая по оси ординат относительную частоту показаний в процентах, а по оси абсцисс – значения показаний индикатора. Последовательно соединив нанесенные на графике точки между собой, получим ломаную линию, называемую кривой фактического распределения погрешностей.

1.5. Сделать выводы о проделанной части работы, обратив внимание на форму кривой распределения и причины, вызывающие появление погрешности закрепления.

## 2. Определение податливости станка

2.1. Установить и закрепить в трехкулачковом патроне станка первую заготовку, а в резцедержателе – резец с твердосплавной пластиной T15K6 со следующими геометрическими параметрами:  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\lambda = 0$  и  $r = 1$  мм (рис. 1.3).

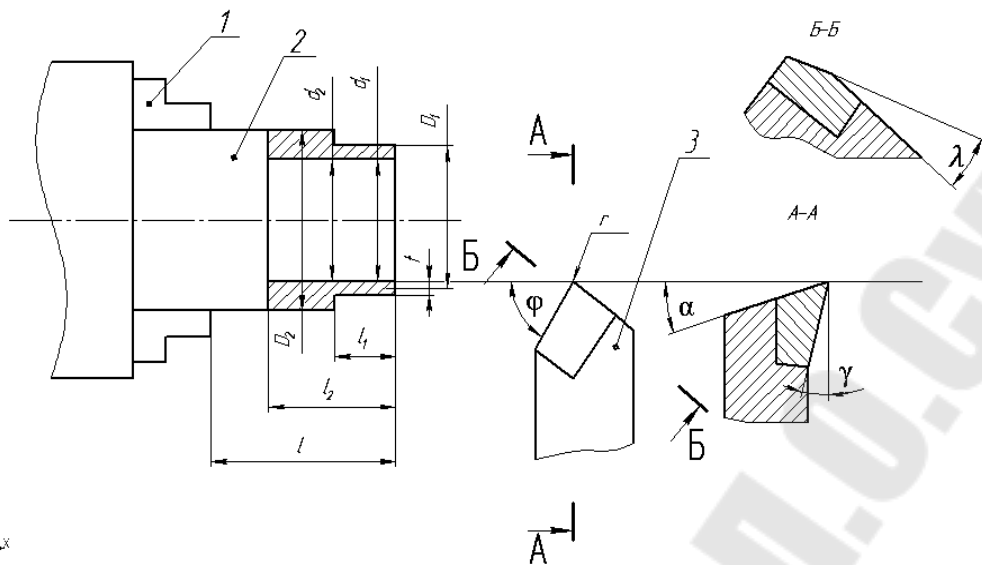


Рис. 1.3. Схема обработки и измерения заготовки:  
1 – трехкулачковый патрон; 2 – заготовка; 3 – резец

2.2. Проточить заготовку от торца на длину  $l_1 = 5-10$  мм так, чтобы  $D_2 - D_1 = 4-5$  мм и измерить фактические диаметры заготовки перед  $D_1$  и за  $D_2$  образованной ступенькой. Затем повторно проточить заготовку от торца на длину  $l_2 = 15-20$  мм с глубиной резания  $t$  на диаметре  $D_1$  равной 1 мм и измерить диаметры обработанной поверхности перед  $d_1$  и за  $d_2$  местом расположения ступеньки. Рекомендуемые режимы обработки: подача  $S = 0,05-0,1$  мм/об; частота вращения  $n = 800-400$  об/мин.

2.3. Вычислить фактические погрешности заготовки и обработанной поверхности по формулам:

$$\Delta_{\text{заг}} = D_2 - D_1 \text{ и } \Delta_{\text{дет}} = d_2 - d_1, \quad (1.11)$$

подставив в них измеренные численные значения  $D_1$ ;  $D_2$ ;  $d_1$  и  $d_2$ .

2.4. Податливость технологической системы определяется из следующей зависимости:

$$\Delta'_{\text{дет}} = C_p S^{y_p} V^{n_p} K'_p W_{\text{сист}} \Delta_{\text{заг}} \quad (1.12)$$

или отсюда

$$W_{\text{сист}} = \frac{\Delta_{\text{дет}}}{C_p S^{y_p} V^{n_p} K_p \Delta_{\text{заг}}}, \text{ мм/Н}, \quad (1.13)$$

где  $C_p$  – постоянная, характеризующая определенные условия обработки;  $S$  – подача, об/мин;  $V$  – скорость резания, м/мин ( $V = \frac{\pi D n}{1000}$ ), где  $D$  – диаметр обрабатываемой поверхности, мм;  $n$  – частота вращения шпинделя, об/мин;  $y_p$  и  $n_p$  – показатели степени;  $K_p$  – поправочный коэффициент, представляющий собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих изменение против табличных условий резания.

$$K_p = K_{\mu p} K_{\phi p} K_{\gamma p} K_{\lambda p} K_{r p}, \quad (1.14)$$

где  $K_{\mu p}$  – коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала.

При обработке конструкционной стали и стального литья

$$K_{\mu p} = \left( \frac{\sigma_B}{750} \right)^{n_p}, \quad (1.15)$$

где  $n_p$  – показатель степени в данной формуле. При  $\sigma_B = 600 \text{ Н/мм}^2$  – для обрабатываемой стали и режущей части инструмента из твердого сплава:  $n_p = 1,35$ ;  $K_{\phi p}$ ,  $K_{\gamma p}$ ,  $K_{\lambda p}$  и  $K_{r p}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента, а именно: главного угла в плане  $\phi^\circ$ , переднего угла  $\gamma^\circ$  и радиуса при вершине  $r$ , мм.

Для используемого резца с приведенными геометрическими параметрами режущей части твердосплавной пластины:

$$K_{\phi p} = 0,77; K_{\gamma p} = K_{\lambda p} = K_{r p} = 1; K_{r p} = 0,82.$$

Значения постоянной  $C_p$  и показателей степени  $y_p$  и  $n_p$  для данных условий обработки будут:  $C_p = 234$ ,  $y_p = 0,6$  и  $n_p = -0,3$ .

*Примечание.* Вычисленное значение  $W_{\text{сист}}$  перевести в мм/Н умножением полученного результата на число 10.

2.5. Вычислять теоретическую податливость обрабатываемой заготовки  $W_{\text{дет}}$  по формуле (1.9).

2.6. Определить податливость станка по следующей формуле, полученной из выражения (1.7):

$$W_{\text{ст}} = W_{\text{сист}} - W_{\text{дет}}. \quad (1.16)$$

### 3. Определение точности обработки заготовки

3.1. Установить и закрепить в трехкулачковом патроне станка вторую заготовку и при минимальной глубине резания ( $t = 0,2-0,5$  мм) проточить ее от торца вначале по всей длине  $l$ , а затем на длину  $l_1 = 5-10$  мм так, чтобы  $D_2 - D_1 = 1,5-2$  мм и после этого измерить фактические диаметры заготовки перед  $D_2$  и за  $D_1$  образованной ступенькой (см. рис. 1.3). Затем повторно проточить заготовку от торца на длину  $l_2 = 15-20$  мм с глубиной резания  $t$  на диаметре  $D_1$  равной  $l$  мм и измерить диаметры обработанной поверхности перед  $d_1$  и за  $d_2$  местом расположения ступеньки.

3.2. Вычислить фактические погрешности заготовки  $\Delta_{\text{заг}}$  и обработанной поверхности  $\Delta_{\text{дет}}$  по формулам (1.11).

3.3. Вычислить теоретическую податливость для обрабатываемой заготовки  $W_{\text{дет}}$  по формуле (1.9).

3.4. Определить податливость данной технологической системы  $W_{\text{сист}}$  по формуле (1.7), используя значения  $W_{\text{ст}}$ , вычисленные в п. 2 по формуле (1.16).

3.5. Определить расчетное значение погрешности обработанной поверхности  $\Delta'_{\text{дет}}$  в зависимости от точности заготовки  $\Delta_{\text{заг}}$  и жесткости технологической системы  $W_{\text{сист}}$  по формуле (1.12).

3.6. Данные измерений и расчетов, полученные при выполнении работы, свести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Режимы обработки, результаты измерений и расчетов

Но- мер заго- тов- ки	Режим обработки			$D_2$ , мм	$D_1$ , мм	$\Delta_{\text{заг}}$ , мм	$d_2$ , мм	$d_1$ , мм	$\Delta_{\text{дет}}$ , мм	$W_{\text{дет}}$ , мм/Н	$W_{\text{ст}}$ , мм/Н	$W_{\text{ст}}$ , мм/Н	$\Delta'_{\text{заг}}$ , мм
	$n$ , об/ мин	$S$ , мм/ об	$V$ , м/ мин										

3.7. Сравнить погрешность обработки поверхности  $\Delta_{\text{дет}}$ , полученную экспериментальным путем при обработке второй заготовки с ее расчетным значением  $\Delta'_{\text{дет}}$ , а также со значением  $\Delta_{\text{дет}}$  для первой заготовки. Качественно оценить изменение значений  $\Delta_{\text{дет}}$  в зависимости от изменения податливости заготовки  $W_{\text{дет}}$  и податливости технологической системы в целом  $W_{\text{сист}}$ . Сделать выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что понимается под точностью обработки?
2. Из каких первичных погрешностей складывается суммарная погрешность обработки?
3. Существующие методы расчета значений погрешностей.
4. Суммирование погрешностей по методу полной взаимозаменяемости.
5. Суммирование погрешностей по методу неполной взаимозаменяемости.
6. Из каких элементов складывается погрешность установки?
7. Дайте характеристику каждому из элементов погрешности установки.
8. Факторы, влияющие на точность обработки детали.
9. Из каких элементов складывается технологическая система при определении жесткости?
10. Определение жесткости технологической системы и как она определяется.
11. Определение податливости технологической системы и как она определяется.
12. Методы определения жесткости металлорежущих станков.
13. Как теоретически определяется податливость детали?
14. Из какой зависимости определяется податливость технологической системы?
15. По каким формулам вычисляются фактические погрешности заготовки  $\Delta_{\text{заг}}$  и обработанной поверхности  $\Delta_{\text{дет}}$ ?
16. По какой зависимости аналитически рассчитывается ожидаемая погрешность обработки детали?
17. Назовите основные составляющие, характеризующие режим обработки заготовки при точении.

## Лабораторная работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПРОХОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Цель работы:* приобретение практических навыков по обеспечению точности размеров при обработке элементарных поверхностей и закрепление материала лекционного курса по разделу «Точность изделия и способы ее обеспечения в производстве».

#### *Теоретические основы работы*

При механической обработке «станок – приспособление – инструмент – обрабатываемая заготовка» образуют замкнутую упругую систему, называемую технологической системой. В процессе обработки деталей сила резания, вызывающая упругие отжатия элементов технологической системы, непрерывно изменяется по своей величине из-за неравномерной глубины резания, непостоянства размеров заготовок в партии, нестабильности механических свойств материала заготовок и прогрессирующего затупления инструмента. Величина упругих отжатий элементов технологической системы зависит как от силы резания, так и от жесткости самих элементов, т. е. от их способности противостоять действующей силе и в свою очередь непосредственно влияет на геометрическую точность обработки.

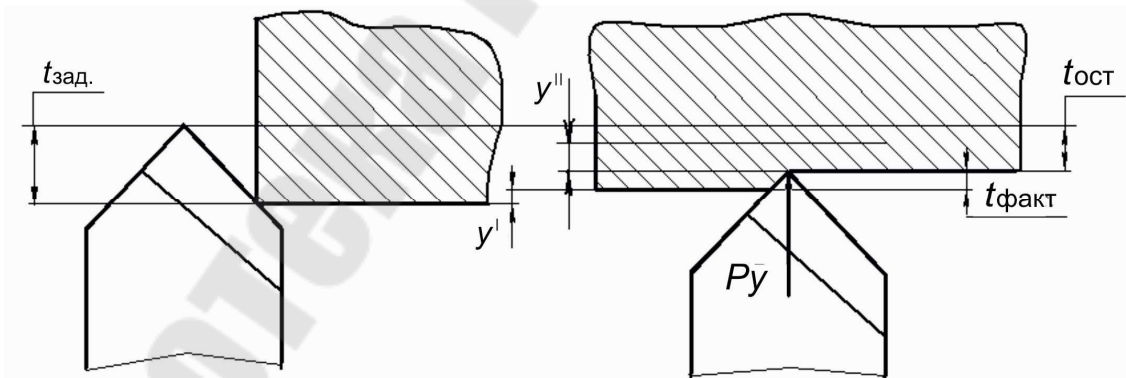


Рис. 2.1. Схема упругих перемещений элементов технологической системы в процессе обработки

Так, при настройке станка на обрабатываемый размер (рис. 2.1) устанавливается заданная глубина резания  $t_{зад}$ . Но в реальных условиях обработки под действием силы резания  $P_y$  заготовка упруго от-

жимается на величину  $y'$ , а режущий инструмент на величину  $y''$ , от заготовки и глубина резания уменьшается до  $t_{\text{факт}}$ . Следовательно остаточная глубина  $t_{\text{ост}}$ , определяющая погрешность обработки поверхности, определяется выражением

$$t_{\text{зад}} = y' + y'' = t_{\text{зад}} - t_{\text{факт}}. \quad (2.1)$$

Из-за этих факторов геометрические погрешности заготовки переносятся на обрабатываемую поверхность, как бы повторяя ее. С увеличением жесткости системы погрешность обработки, полученная на технологическом переходе, уменьшается, однако не может быть полностью устранена.

Понятие «жесткость» учитывает как упругие свойства технологической системы, так и условия ее нагружения: при изменении условий нагружения жесткость также изменяется. Например, при обтачивании вала жесткость его при положении резца в средней части будет отличаться от жесткости при положении резца у места закрепления вала в патроне. При переменной жесткости технологической системы, даже в случае обработки заготовки с геометрически правильной формой поверхности и постоянным припуском, величина  $t_{\text{ост}}$  не будет стабильной. То есть в реальных условиях происходит не копирование, а последовательное уменьшение погрешности обработки. Причем с каждым переходом величина этих погрешностей уменьшается.

В общем виде коэффициент уменьшения погрешности можно выразить следующей формулой:

$$K_y = \frac{\Delta_{\text{дет}}}{\Delta_{\text{заг}}}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta_{\text{дет}}$  – погрешность обработанной детали;  $\Delta_{\text{заг}}$  – погрешность исходной заготовки.

По известной же формуле из теории резания:

$$\Delta'_{\text{дет}} = C_p S^{Y_p} V^{n_p} K_p W_{\text{сист}} \Delta_{\text{заг}}. \quad (2.3)$$

Преобразовав эту формулу к следующему виду:

$$\frac{\Delta'_{\text{дет}}}{\Delta_{\text{заг}}} = C_p S^{Y_p} V^{n_p} K_p W_{\text{сист}} \quad (2.4)$$



и подставив полученное значение соотношения  $\frac{\Delta'_{дет}}{\Delta_{заг}}$  в формулу (2.3), получим следующую формулу для определения коэффициента уменьшения погрешности  $K_y$  за один проход:

$$K_y = C_p S^{Y_p} V^{n_p} K_p W_{сист}, \quad (2.5)$$

где  $C_p$  – постоянная, характеризующая определенные условия обработки;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, мм/мин;  $K_p$  – поправочный коэффициент, представляющий собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих изменение против табличных условий резания;

$$K_p = K_{\mu p} K_{\varphi p} K_{\gamma p} K_{\lambda p} K_{\tau p},$$

где  $K_{\mu p}$  – коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала;  $K_{\varphi p}, K_{\gamma p}, K_{\lambda p}$  и  $K_{\tau p}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента, а именно: главного угла в плане  $\phi^\circ$ , переднего угла  $\gamma^\circ$  и радиуса при вершине  $r$ , мм;  $X_p, Y_p$  и  $n_p$  – показатели степени;  $W_{сист}$  – податливость технологической системы.

При обработке заготовки за несколько рабочих ходов общий коэффициент уменьшения погрешностей  $K_{0y}$  равен:

$$K_{0y} = K_{1y} K_{2y} \dots K_{ny}, \quad (2.6)$$

где  $K_{1y}, K_{2y}, K_{ny}$  – коэффициенты уменьшения погрешностей, полученные на отдельных рабочих ходах;  $n$  – количество выполненных при обработке рабочих ходов.

$K_y < 1$  и поэтому  $K_{0y}$  при большом числе рабочих ходов является малой величиной.

В то же время:

$$K_{0y} = \frac{\Delta_{заг1}}{\Delta_{заг}} \cdot \frac{\Delta_{заг2}}{\Delta_{заг1}} \cdot \dots \cdot \frac{\Delta_{загn}}{\Delta_{загn-1}}. \quad (2.7)$$

Преобразовав выражение (2.6), получим:

$$\Delta_{\text{заг1}} = K_{1y} \Delta_{\text{заг}}; \Delta_{\text{заг2}} = K_{1y} K_{2y} \Delta_{\text{заг}}; \Delta_{\text{заг}n} = K_{1y} K_{2y} \dots K_{ny} \Delta_{\text{заг}}.$$

При незначительно неменяющихся условиях обработки поверхности за несколько проходов, можно принять:

$$K_{1y} = K_{2y} = \dots = K_{ny}, \text{ тогда } \Delta_{\text{заг}n} = K_y^n \Delta_{\text{заг}}.$$

Так как  $\Delta_{\text{заг}n} = \Delta_{\text{дет}}$ , то получим выражение

$$\Delta_{\text{дет}} = K_y^n \Delta_{\text{заг}}. \quad (2.8)$$

Из выражения (2.8) получим:

$$n = \frac{\lg \Delta_{\text{дет}} - \lg \Delta_{\text{заг}}}{\lg K_y}.$$

Подставив в данную формулу значение  $K_y$ , приведенное в формуле (2.5), получим:

$$n = \frac{\lg \Delta_{\text{дет}} - \lg \Delta_{\text{заг}}}{\lg \left( C_p S^{Y_p} V^{n_p} K_p \frac{1}{j_{\text{сист}}} \right)}. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) позволяет определять необходимое число рабочих ходов  $n$ , обеспечивающее, при известной жесткости технологической системы, получение из исходной заготовки детали с требуемой точностью размеров. При получении дробного числа принимается ближайшее большее целое число проходов.

### ***Оборудование, оснастка и материалы***

Токарно-винторезный станок модели 16К20 с трехкулачковым патроном

Резец с режущей пластиной из сплава Т15К6

Штангенциркуль и микрометр

Рабочие чертежи на деталь – вал и его исходную заготовку

Заготовка из стального круглого проката диаметром  $d = 30\text{--}50$  мм и длиной  $l = 100\text{--}150$  мм

## **Техника безопасности**

1. Обработка заготовки на токарном станке производится токарем или учебным мастером, имеющим соответствующую квалификацию, в присутствии студентов, выполняющих работу, и преподавателя.
2. Непосредственно перед выполнением работы студентам проводится инструктаж по ТБ на металлорежущих станках.
3. Станок должен быть исправным и оснащен экраном, защищающим работающего от отлетающей стружки и смазывающе-охлаждающей жидкости.
4. Перед включением станка убедиться в исправности заземления. Проверить, чтобы двери электрошкафа, крышки пульта управления, а также защитные ограждения подвижных частей станка были закрыты и надежно закреплены.
5. В процессе работы станка наблюдающие студенты должны находиться на безопасном расстоянии от его движущихся частей и зоны резания.

## **Выполнение работы**

1. Установить и закрепить в трехкулачковом патроне токарного станка заготовку из стального круглого проката и настроить станок на следующие режимы обработки:  $S = 0,05\text{--}0,11$  мм/об,  $n = 800\text{--}400$  об/мин.
2. Проточить заготовку от торца на длину 20–30 мм с глубиной резания  $t = 0,5\text{--}1$  мм и измерить ее фактические диаметры перед  $D_1$  и за  $D_2$  образованной ступенькой. Затем повторно проточить заготовку от торца на длину 50–60 мм с глубиной резания  $t = 0,5\text{--}1$  мм на диаметре  $D_1$  и измерить диаметры обработанной поверхности перед  $d_1$  и за  $d_1$  местом расположения ступеньки.
3. Вычислить фактические погрешности заготовки  $\Delta_{\text{заг}}$  и обработанной поверхности  $\Delta_{\text{дет}}$  по формулам:  $\Delta_{\text{заг}} = D_2 - D_1$ ;  $\Delta_{\text{дет}} = d_2 - d_1$ , подставив в них измеренные численные значения соответствующих диаметров вала.
4. Подставив в формулу (2.9) полученные значения  $\Delta_{\text{заг}}$  и  $\Delta_{\text{дет}}$ , вычислить необходимое число рабочих ходов для сравнения расчетных данных с экспериментальными. Недостающие для вычисления данные, характеризующие жесткость технологической системы

$\left( \frac{1}{j_{\text{сист}}} = W_{\text{сист}} \right)$  и определенные условия обработки ( $C_p$ ,  $Y_p$ ,  $n_p$  и  $K_p$ ), можно взять из лабораторной работы № 1 или вычислить по изложенной в ней методике.

5. По чертежам исходной заготовки (рис. 2.2) и изготавливаемой из нее детали типа ось по назначенным допускам установить допустимые погрешности на диаметр исходной заготовки  $\Delta_{\text{заг}}$  и диаметр обработанной поверхности детали  $\Delta_{\text{дет}}$ .

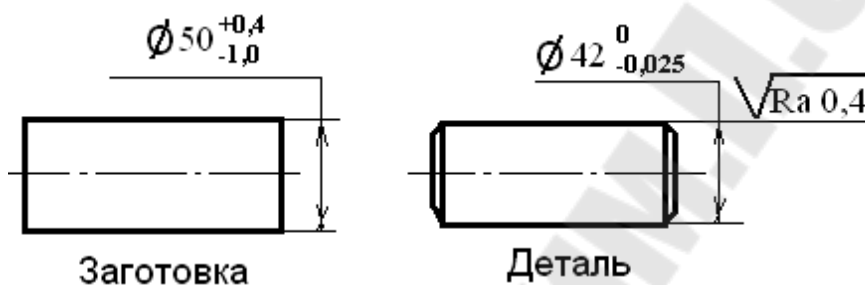


Рис. 2.2. Чертежи заготовки и детали

6. Подставить полученные погрешности  $\Delta_{\text{заг}}$  и  $\Delta_{\text{дет}}$  в формулу (2.9) и вычислить необходимое количество рабочих ходов для обработки этой поверхности в условиях, аналогичных проведенному эксперименту.

7. Данные измерений и расчетов, полученные при выполнении работы, свести в табл. 2.1, выполненную по приведенной форме.

Таблица 2.1

**Режимы обработки, результаты измерений и расчетов**

Режим обработки				$D_2$	$D_1$	$\Delta_{\text{заг}}$	$d_2$	$d_1$	$\Delta_{\text{дет}}$	$n$		Примечание
$n$ , об/ мин	$S$ , мм /об	$t$ , мм	$V$ , м/мм						факт.	расч.		
...												
...												

8. Провести анализ по приведенным в таблице данным и сделать **ВЫВОДЫ**.

## ***Содержание отчета***

Отчет должен содержать:

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Перечень используемого при выполнении оборудования, оснастки и материалов.
4. Раздел «Выполнение работы», в котором приводятся описание последовательности выполнения работы в соответствии с разделом 5 с приведением и расшифровкой расчетных формул, вычисления, результаты измерений и вычислений, сведенные в таблицу.
5. Выводы по работе.

## ***Контрольные вопросы***

1. Какие элементы образуют при механической обработке замкнутую упругую технологическую систему?
2. Какие факторы вызывают нестабильность силы резания?
3. Жесткость технологической системы и как она определяется?
4. Объясните значение параметров, указанных на схеме рис. 2.1, и приведите установленную между ними зависимость.
5. Как определяется в общем виде коэффициент уменьшения погрешности?
6. Как определить допустимую погрешность исходной заготовки и обработанной поверхности детали из чертежей, приведенных на рис. 2.2?
7. Как определяется фактическая погрешность исходных заготовок и обработанных деталей при обработке партии заготовок?
8. Приведите формулу, характеризующую величину упругого отжатия.
9. Приведите формулу для определения радиальной составляющей силы резания.
10. Как определяется общий коэффициент уменьшения погрешности при обработке заготовки за несколько проходов?
11. Приведите формулу для определения необходимого числа рабочих ходов при известной жесткости технологической системы.
12. Как определялись фактические погрешности заготовки и обработанной поверхности при экспериментальной обработке заготовки?

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Цель работы:* ознакомление с факторами, влияющими на качество поверхностей деталей машин, приобретение практических навыков по исследованию некоторых параметров качества в зависимости от методов и режимов обработки.

#### *Теоретические основы работы*

Качество поверхностей деталей машин определяется совокупностью таких характеристик, как: геометрические отклонения, шероховатость и волнистость, физико-механические и химические свойства, а также микроструктурой поверхностного слоя. В процессе изготовления детали на ее поверхности возникают неровности, в поверхностном слое изменяется структура, фазовый и химический состав, возникают остаточные напряжения.

Геометрические характеристики качества обработанной поверхности определяются погрешностью обработки  $\Delta X$ , которая выражается в единицах рассматриваемого параметра и определяется разностью между действительным (полученным) значением параметра  $X_d$  и его номинальным (заданным) значением  $X_n$ .

$$\Delta X = X_d - X_n. \quad (3.1)$$

В общем виде геометрические погрешности обработки подразделяются на: погрешности размера, погрешности формы и погрешности расположения поверхностей.

Погрешности выполняемого размера изготавливаемой детали задаются в чертеже допусками на размер, обеспечивающими ее служебное назначение. Эти допуски устанавливаются стандартами единой системы допусков и посадок (ЕСТД) по степеням точности, называемыми квалитетами (ГОСТ 25347–82, ГОСТ 25346–82, ГОСТ 25348–82).

Термины и определения, относящиеся к основным видам отклонений допусков формы и расположения, установлены ГОСТ 24642–81. Под отклонением формы поверхности (профиля) понимают отклоне-

ния реальной поверхности (реального профиля) от формы номинальной поверхности (номинального профиля). Количественно отклонение формы оценивается наибольшим расстоянием от точек реальной поверхности (реального профиля) до прилегающей поверхности (прилегающего профиля) по нормали к прилегающей поверхности (прилегающего профиля).

Отклонение расположения – отклонение реального расположения рассматриваемого элемента от его номинального расположения.

Суммарные отклонения формы и расположения – отклонения, являющиеся результатом совместного отклонения формы и расположения рассматриваемой поверхности. Допуски формы и расположения поверхности установлены ГОСТ 24643–81, который предусматривает 16 степеней точности.

Под волнистостью поверхности понимают совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых рассеяние между смежными возвышенностями или впадинами превышает базовую длину  $l$ .

Шероховатостью поверхности называют совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины  $l$ . Термины и определение шероховатости поверхности установлены ГОСТ 25142–82.

Установлено шесть следующих параметров шероховатости поверхности:

$R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;

$R_z$  – высота неровностей профиля по 10 точкам;

$R_{max}$  – наибольшая высота неровностей профиля;

$S_m$  – средний шаг неровностей профиля;

$S$  – средний шаг местных выступов профиля;

$t_p$  – относительная опорная длина профиля.

При обозначении шероховатости поверхности рекомендуется отдавать предпочтение параметру  $R_a$ , так как эталонные образцы для определения шероховатости поверхности обычно выполняются по этому параметру.

Шероховатость поверхности изготавливаемой детали зависит от многих факторов: метода обработки, режимов резания, геометрических параметров и качества поверхности режущей части инструмента, пластической и упругой деформации обрабатываемого материала, жесткости технологической системы и связанных с ней вынужденных колебаний и вибрации при резании, смазывающе-охлаждающей жид-

кости и др. Из параметров режима резания наиболее существенное влияние на процесс образования шероховатости поверхности оказывают скорость резания ( $V$ ) и подача ( $S_0$ ). Путем экспериментальных исследований установлена непосредственная связь между скоростью резания и высотой образующегося нароста материала на резце, от значения и этапов образования которого в значительной степени зависит шероховатость обработанной поверхности.

На рис. 3.1 показана зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности от скорости резания при точении.

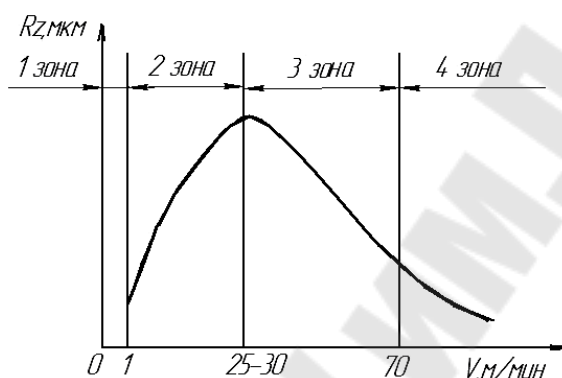


Рис. 3.1. Зависимость параметра шероховатости от скорости резания ( $V$ ): материал образца – сталь 45; материал резца – P18;  $S_0 = 0,48$  мм/об;  $t = 1$  мм;  $\gamma = 12^\circ$ ;  $\alpha = 6^\circ$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $r_B = 1,5$  мм

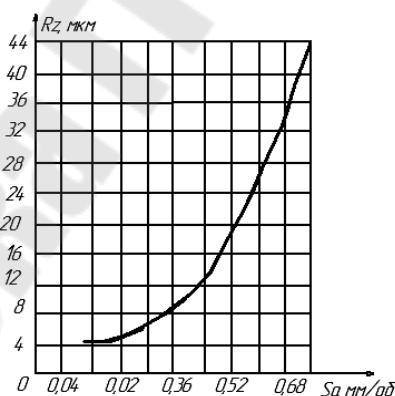


Рис. 3.2. Зависимость параметра шероховатости от подачи ( $S_0$ ): материал образца – сталь 40X10C2M; материал резца – P18;  $V = 66,6$  м/мин;  $t = 1$  мм;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = 9^\circ$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 20^\circ$ ;  $r_B = 1,5$  мм

На приведенном графике зависимости (см. рис. 3.1) можно выделить четыре характерных зоны. Первая зона соответствует весьма малым скоростям резания ( $V = 1$  м/мин). Она характеризуется тем, что нарост на резце в ней отсутствует и поэтому обрабатываемая поверх-



ность получается без задиров. Во второй зоне нарост появляется на резце и достигает наибольшей высоты при скорости резания 25–30 м/мин. В результате шероховатость обрабатываемой поверхности повышается. Третья зона соответствует скоростям резания от 25 до 80 м/мин и характеризуется уменьшением и исчезновением нароста с увеличением скорости резания. При этом параметр шероховатости также уменьшается. В четвертой зоне при скоростях резания более 80 м/мин нарост на резце не образуется и с изменением скорости резания параметр шероховатости изменяется незначительно, в основном за счет уменьшения степени пластического деформирования материала. При обработке материалов, не склонных к образованию нароста, параметр шероховатости не зависит от изменения скорости резания. На рис. 3.2 приведена зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности от подачи ( $S_o$ ) при точении сталей. Из графика видно, что с увеличением подачи увеличивается и параметр шероховатости. Причем интенсивность этого приращения возрастает особенно сильно на участке подач до 0,6–0,7 мм/об, а дальше принимает постоянное значение. При малых подачах ( $S_o \leq 0,2$  мм/об) уменьшение параметра шероховатости с уменьшением подачи весьма незначительно в связи с тем, что чем меньше подача, тем большую роль в формировании шероховатости начинают играть микронеровности лезвия инструмента.

Глубина резания ( $t$ ) оказывает незначительное влияние на параметр шероховатости поверхности. Однако изменение глубины резания при малых ее значениях (0,2–0,3 мм) может существенно изменить условия срезания стружки. В таких условиях влияние глубины резания на образование шероховатости поверхности значительно возрастает. Применение смазочно-охлаждающей жидкости способствует уменьшению параметра шероховатости поверхности.

Силы и температура резания оказывают влияние на формирование поверхностного слоя, поэтому его физико-механические свойства отличаются от исходного материала. Материал поверхностного слоя испытывает наклеп, разупрочнение; изменяется его структура, микротвердость; образуются остаточные напряжения.

Наклеп поверхностного слоя оценивают по глубине ( $h_n$ ) и степени наклепа ( $U_n$ ) градиентом наклепа ( $U_{гр}$ ).

$$U_n = \frac{H_{\max} - H_{\text{исх}}}{H_{\text{исх}}} 100 \%; \quad (3.2)$$

$$U_{\text{гр}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{исх}}}{h_{\text{н}}}, \quad (3.3)$$

где  $H_{\text{max}}$  и  $H_{\text{исх}}$  – соответственно максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя металла.

В результате наклепа зерна металла измельчаются, и материал становится более твердым. При этом возможно разрушение кристаллической решетки в зернах, что внешне проявляется в надрывах, задирах и других дефектах поверхностного слоя. При механической обработке в среднем можно считать, что степень наклепа поверхностного слоя составляет: у алюминия – 90–100 %, у латуни – 60–70 %, у мягкой конструкционной стали – 40–50 %, у твердой конструкционной стали – 20–30 %.

Глубина наклепанного слоя: при черновой обработке резцом – 0,4–0,5 мм и при чистовой – 0,07–0,08 мм; при шлифовании – 0,04–0,06 мм; при полировании – 0,02–0,04 мм.

На глубину и степень наклепа оказывают влияние свойства обрабатываемого материала, методы обработки, режимы резания, геометрия режущего инструмента и другие факторы в такой же мере, как и на пластическую деформацию. Так, с увеличением скорости резания степень и глубина наклепа уменьшаются. Подача влияет на наклеп в большей мере, чем глубина резания. С износом режущего инструмента увеличивается радиус округления лезвия и в связи с этим повышается пластическая деформация и, как следствие, глубина наклепа может увеличиваться вдвое и больше. Пластическая деформация вызывает и остаточные напряжения, которые распространяются примерно на глубину наклепанного слоя.

Причем при движении резца в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения и одновременно с этим под действием округления лезвия происходит уплотнение материала, при котором появляются сжимающие напряжения. В зависимости от конкретных условий обработки могут превалировать в поверхностном слое те или другие напряжения. Остаточными называются такие внутренние напряжения, которые сохраняются в детали при снятии внешней нагрузки. Различают три рода остаточных напряжений. Напряжения первого рода уравниваются в пределах больших объемов материала, соизмеримых с размерами обрабатываемых заготовок. Напряжения второго рода образуются в микроскопических объемах с размерами одного порядка с зёрнами и кристаллами. Напряжения треть-

его рода возникают в ультрамикроскопических объемах и уравниваются в пределах нескольких ячеек кристаллической решетки вещества. В технологии машиностроения наибольшее внимание уделяется напряжениям первого рода, которые наряду с другими методами можно в частности определять экспериментальным методом, разработанным академиком Н. Н. Давиденковым. Сущность этого метода заключается в том, что остаточные напряжения определяют расчетами по величине деформации образца после снятия с него напряженного слоя.

Практика применения этого метода показала, что изучение остаточных тангенциальных напряжений, образующихся на деталях цилиндрической формы, целесообразно вести на кольцах небольшой толщины (до 10 мм). При этом наружный диаметр изучаемых колец должен быть по возможности близок к диаметру исследуемой детали.

Чтобы получить в кольцах такие же остаточные напряжения, как и в исследуемых деталях машин, кольца обрабатывают по изучаемым цилиндрическим поверхностям (внутренним или наружным) при таких же условиях (станок, инструмент, режимы резания), при которых обрабатываются данные детали. Затем обработанную цилиндрическую поверхность колец точно измеряют, разрезают их по образующей и после этого снова измеряют изменившийся диаметр колец. Напряжения, снятые при разрезке кольца, обозначают  $\sigma_{11}$ . Они являются частью полных тангенциальных напряжений  $\sigma_T$  и составляют 2–5 % от них.

Когда обработка колец ведется по наружному диаметру, то напряжения  $\sigma_{11}$ , снятые при разрезке кольца по образующей, вычисляют по формуле

$$\sigma_{11} = -\frac{E\alpha\Delta D}{D_{cp}} \cdot \frac{z' + \frac{\delta^2}{6D_{cp}}}{z' + \frac{D_{cp}}{2}}, \text{ МПа}, \quad (3.4)$$

где  $E$  – модуль упругости, который для конструкционных сталей может быть принят равным  $2 \cdot 10^6$  МПа;  $\alpha$  – коэффициент, который определяется из следующего выражения:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \mu^2},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Для конструкционных сталей  $\mu = 0,28$ ;  $z'$  – расстояние между средней линией кольца и серединой рассматриваемого слоя, мм:

$$z' = \frac{\delta}{2},$$

$\delta$  – толщина стенки кольца, мм:

$$\delta = \frac{D - d}{2},$$

где  $D$  и  $d$  – наружный и внутренний диаметры кольца, мм;  $D_{\text{ср}}$  – диаметр срединной окружности кольца:

$$D_{\text{ср}} = D - \delta \text{ или } D_{\text{ср}} = D + \delta,$$

$\Delta D$  – измеренное изменение наружного диаметра кольца после резки, мм:

$$\Delta D = D - D_1,$$

где  $D_1$  – диаметр кольца после резки.

По вычисленному значению  $\sigma_{11}$  можно определить величину полных тангенциальных напряжений  $\sigma_T$  по следующей зависимости:

$$\sigma_T \approx K \sigma_n, \text{ МПа,} \quad (3.5)$$

где  $K$  – коэффициент, равный 20–50; для приближенных расчетов можно принять  $K = 35$ .

Следует иметь в виду, что при выполнении приведенных расчетов значения  $\Delta D$ , а следовательно,  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_T$  могут быть как положительными, так и отрицательными. Причем при положительных значениях полных тангенциальных напряжений  $\sigma_T$  напряжения в поверхностном слое являются растягивающими, а при  $\sigma_T$  отрицательном – сжимающими.

Состояние поверхностного слоя деталей оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства машин: износоустойчивость, усталостную прочность, стабильность посадок в сопрягаемых деталях (зазоров и натягов), коррозионную стойкость и др. На начальный износ сопряженных деталей влияют также форма и направление неровностей (шероховатости) поверхности относительно на-

правления их скольжения. Так, например, наклеп, возникающий в поверхностном слое, уменьшает износ поверхности в 1,5–2 раза. Сопротивление материалов усталости под действием переменной нагрузки возрастает одновременно с понижением параметра шероховатости поверхности. Наклеп и остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое повышают усталостную прочность, а остаточные напряжения растяжения снижают ее. Установлено, что поверхности с малой шероховатостью меньше подвержены коррозии и поэтому в некоторых ответственных машинах, работающих в неблагоприятных атмосферных условиях, полируют даже те поверхности деталей, которые при обычных условиях эксплуатации можно было бы не обрабатывать.

Наклеп ускоряет коррозию в 1,5–2 раза, так как при пластическом деформировании поликристаллического материала в нем создаются микронеоднородности, способствующие возникновению большого числа очагов коррозии.

Качество поверхности деталей машин определяется методами и режимами механической обработки. Его показатели могут быть улучшены путем применения как обычных методов обработки (точение, фрезерование, сверление, строгание), осуществляемых на оптимальных режимах, так и методами отделочно-упрочняющей обработки, одним из которых является алмазное выглаживание.

Алмазное выглаживание заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней выглаживателем, представляющим собой закрепленный в оправке алмазный кристалл. При этом оставшиеся от предыдущей обработки неровности поверхности сглаживаются полностью или частично, и поверхность приобретает зеркальный блеск, повышается твердость поверхностного слоя, в нем создаются сжимающие напряжения. После выглаживания поверхность остается чистой без вырывов и задиров и не шаржированной осколками абразивных зерен, что обычно происходит при процессах абразивной обработки. Особенностью алмазного выглаживания является применение в качестве деформирующего элемента алмаза, обладающего высокой твердостью, малым коэффициентом трения по металлу и повышенной теплопроводностью. Высокая твердость алмаза позволяет обрабатывать практически все металлы, поддающиеся пластической деформации, как мягкие, так и закаленные до твердости 60–65 HRC<sub>3</sub>. Малая величина радиуса инструмента (алмаза) (0,75–4 мм) обуславливает и малую величину прилагаемой силы

выглаживания ( $P = 50\text{--}250\text{ Н}$ ), что позволяет обрабатывать этим методом в том числе тонкостенные и нежесткие детали при невысоких требованиях к жесткости технологической системы. Схема выглаживания, по которой проводится эксперимент в лабораторной работе, приведена на рис. 3.3.

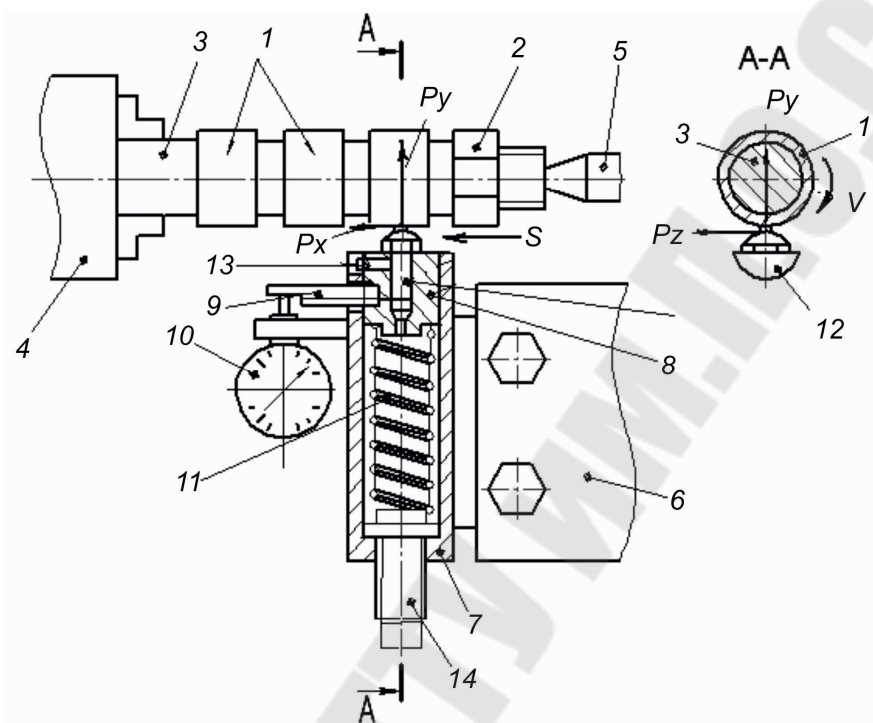


Рис. 3.3. Схема выглаживания с упругим закреплением инструмента

Обрабатываемые кольца 1 устанавливаются и зажимаются гайкой 2 на оправке 3, которая в свою очередь закрепляется в патроне 4 и поджимается центром 5 токарного станка.

Устройство для алмазного выглаживания содержит закрепленный в резцодержателе 6 станка корпус 7, в котором расположен шток 8, связанный рычагом 9 с индикатором 10 и поджимающийся тарированной пружиной 11. Выглаживатель 12 с алмазным кристаллом устанавливается в посадочном отверстии штока 8 и закрепляется винтом 13. При настройке требуемое усилие выглаживания обрабатываемой поверхности устанавливается путем поджатия по контрольной шкале регулировочным винтом 14 тарированной пружины 11. Затем с помощью поперечного суппорта выглаживатель подводится до касания с обрабатываемой поверхностью и по индикатору 10 устанавли-

вается натяг на величину 0,2–0,3 мм. После этого включается станок и производится выглаживание поверхности детали.

Основными параметрами процесса выглаживания, влияющими на качество поверхности и производительность, являются: напряженное состояние в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью; скорость деформирования; кратность приложения нагрузки к каждой точке обрабатываемой поверхности.

Напряженное состояние в зоне контакта может быть охарактеризовано средним давлением на площади контакта и определяется механическими свойствами обрабатываемого материала, размерами рабочей части инструмента и глубиной его внедрения в обрабатываемую поверхность (или приложенной к нему силой). Скорость деформирования определяется скоростью движения инструмента относительно детали. Кратность приложения нагрузки определяется размерами рабочей части выглаживателя, величиной приложенной к нему силы, подачей и числом проходов при выглаживании.

Возникающая в зоне контакта выглаживателя с обрабатываемой поверхностью сила  $P$  раскладывается на три составляющие силы: радиальную  $P_y$ ; тангенциальную  $P_z$ ; осевую  $P_x$  (рис. 3.3). Под действием радиальной силы  $P_y$  инструмент внедряется в обрабатываемую поверхность на глубину  $h$  и при движении по ней в направлении подачи  $S$  сглаживает исходные неровности  $R_{\text{исх}}$ . Составляющие силы  $P_x$  и  $P_z$  в десять-двадцать раз меньше радиальной  $P_y$ . Поэтому в качестве силы выглаживания  $P$  можно принимать ее радиальную составляющую  $P_y$ , которая определяется по следующей формуле:

$$P = P_y = c\varepsilon\text{HV} \left( \frac{Dr}{D+r} \right)^2, \text{ Н}, \quad (3.6)$$

где  $c$  – коэффициент, численно равный  $\pi = 3,14$ ;  $\varepsilon = \frac{h}{r}$  – относительная глубина внедрения выглаживателя ( $h$  – глубина внедрения выглаживателя в обрабатываемую поверхность, мм);  $r$  – радиус рабочей части выглаживателя, мм ( $r = 2$ ); HV – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу (для конструкционных сталей HV = 1600–2200 МПа);  $D$  – диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

Нормальное протекание процесса выглаживания происходит при определенных значениях относительной глубины внедрения выглаживателя в обрабатываемую поверхность.

При значении  $\varepsilon$ , меньшем определенной величины  $\varepsilon_1$ , инструмент с обрабатываемой поверхностью имеет упругую связь и выглаживания не происходит. При значении  $\varepsilon$  большем определенной величины  $\varepsilon_2$  пластическое течение материала прекращается и начинается разрушение поверхностного слоя детали. Экспериментально установлено, что для сталей  $\varepsilon_1 = 0,002-0,004$ , а значения  $\varepsilon_2$  составляют  $0,01-0,02$ . Необходимая величина относительной глубины внедрения выглаживателя  $\varepsilon$  выбирается между предельными значениями минимальной  $\varepsilon_1$  и максимальной  $\varepsilon_2$  величин, т. е.

$$\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1. \quad (3.7)$$

Рассчитанная таким образом по формуле (3.6) сила выглаживания  $P$  должна обеспечить получение требуемого качества обрабатываемой поверхности. Следует учитывать, что с увеличением до определенного значения силы выглаживания  $P$  шероховатость обрабатываемой поверхности уменьшается все более медленно до минимального значения. При дальнейшем увеличении силы  $P$  шероховатость поверхности возрастает по сравнению с минимальным значением в результате пластических искажений поверхности инструментом.

Подача  $S$  является вторым по значению фактором процесса, влияющим на высоту шероховатости. При изменении подачи в интервале  $0,02-0,10$  мм/об шероховатость возрастает почти по линейной зависимости. Связь между высотой образующихся при выглаживании неровностей  $R_z$  и подачей  $S$  описывается следующей зависимостью:

$$R_z = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}}, \text{ мм.} \quad (3.8)$$

При подачах, меньших  $0,02$  мм/об, уменьшения шероховатости не наблюдается. Это объясняется пластическим искажением микропрофиля и перенаклепом поверхностного слоя вследствие большой кратности приложения нагрузки.

При увеличении подачи свыше  $0,1$  мм/об происходит резкое увеличение шероховатости, что объясняется как зависимостью (3.7), так и уменьшением степени пластической деформации вследствие малой кратности приложения нагрузки.



Скорость выглаживания  $V$  мало влияет на величину шероховатости. При изменении скорости от 16 до 120 м/мин величина шероховатости практически не изменяется.

### ***Оборудование, оснастка и материалы***

Токарно-винторезный станок модели 16К20 с трехкулачковым патроном

Резец с режущей пластиной из сплава Т15К6

Устройство для алмазного выглаживания

Ножовка по металлу

Тиски слесарные

Оправка для закрепления колец

Три кольца-заготовки из конструкционной стали

Штангенциркуль и микрометр

Комплект стандартных образцов шероховатости

### ***Техника безопасности***

1. Обработка колец на токарном станке производится токарем или учебным мастером, имеющим соответствующую квалификацию, в присутствии студентов, выполняющих работу, и преподавателя.

2. Непосредственно перед выполнением работы студентам проводится инструктаж по ТБ на металлорежущих станках и по выполнению слесарных работ.

3. Станок должен быть исправным и оснащен экраном, защищающим работающего от отлетающей стружки и смазывающе-охлаждающей жидкости.

4. Перед включением станка необходимо убедиться в исправности заземления. Проверить, чтобы двери электрошкафа, крышки пульта управления, а также защитные ограждения подвижных частей станка были закрыты и надежно закреплены.

5. В процессе работы станка наблюдающие студенты должны находиться на безопасном расстоянии от его движущихся частей и зоны резания.

6. Перед разрезкой кольца обеспечить его надежное закрепление в тисках, а также убедиться в исправности ножовки по металлу, ножовочного полотна и надежном его закреплении.

## Выполнение работы

1. Измерить наружный диаметр обрабатываемых колец-заготовок и назначить для их обтачивания по наружной поверхности за два перехода (черновой и чистовой) оптимальные режимы резания ( $t, S, V$ ).

Требуемую частоту вращения шпинделя станка определить по формуле

$$n = \frac{1000V}{\pi D'}, \text{ об/мин,} \quad (3.9)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $D'$  – диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

2. Вычислить наружный диаметр кольца после чернового и чистового обтачивания по формуле

$$D' = D_{\text{зар}} - 2(t_1 + t_2), \text{ мм,} \quad (3.10)$$

где  $D_{\text{зар}}$  – наружный диаметр кольца-заготовки, мм;  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно принятая глубина резания для чернового и чистового точения.

Затем назначить оптимальные режимы для его алмазного выглаживания. Для этого принять в соответствии с рекомендациями относительную глубину внедрения инструмента  $\varepsilon$  по формуле (3.6),

вычислить требуемую силу выглаживания  $P$ . Из выражения  $\varepsilon = \frac{h}{r}$  вы-

числить ожидаемую глубину внедрения выглаживателя в обрабатываемую деталь  $h$  при выбранном значении  $\varepsilon$ . Принять оптимальное значение подачи  $S$  и по формуле (3.8) вычислить ожидаемый параметр шероховатости  $R_z$  выглаженной поверхности.

3. Установить в токарном станке на оправке 3 кольца-заготовки (см. рис. 3.3) и обработать их следующим образом:

– на принятых режимах резания за один проход выполнить черновое точение наружной поверхности всех трех колец;

– затем на принятых режимах резания за один проход выполнить чистовое точение наружной поверхности двух первых колец; и наконец, на принятых режимах произвести алмазное выглаживание наружной поверхности первого кольца. Обработанные кольца снять с оправки и измерить их внутренний (с точностью до 0,1 мм) и наружный (с точностью до 0,001 мм) диаметры.

4. Поочередно зажать обработанные кольца в слесарных тисках и разрезать их по образующей с помощью ножовки по металлу. Затем измерить наружный диаметр колец после разрезки (с точностью до 0,001 мм) и по формулам (3.4) и (3.5) вычислить остаточные напряжения  $\sigma_{11}$ , снятые при разрезке кольца, и полные тангенциальные остаточные напряжения  $\sigma_T$ , возникшие в поверхностном слое кольца после обработки.

5. Определить действительную шероховатость обработанных поверхностей трех колец, полученную в результате черногого точения, чистового точения, и алмазного выглаживания, методом их визуального сравнения с поверхностями комплекта стандартных образцов шероховатости, под которыми указана приведенная на образце шероховатость поверхности в параметрах шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ .

6. Данные измерений и расчетов, полученные при выполнении работы, свести в таблицу, выполненную по приведенной форме (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Режимы обработки, результаты измерений и расчетов

Но- мер ко- ль- ца	Вид обра- бот- ки	Режимы обработки				Шерохова- тость поверх- ности $R_a$ , мкм		$d$ , мм	$D$ , мм	$D_1$ , мм	$\Delta D$ , мм	$\sigma_{11}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа
		$S$ , мм/ об	$V$ , м/ мин	$n$ , об/ мин	$t$ , мм	дости- жи- мая	факти- чес- кая						
3	Чер- новое точе- ние					50–6,3							
2	Чисто- вое точе- ние					6,3–0,4							
1	Ал- маз- ное выгла- жива- ние			$n$ , об/ мин	$p$ , Н	$h$ , мм	0,8–0,05						
						рас- чет- ный	фак- ти- чес- кий						

Фактическая глубина внедрения выглаживателя в обрабатываемую поверхность кольца (припуск на выглаживание) определяется по формуле

$$h_{\text{фкт}} = \frac{D' - D'_{\text{выгл}}}{2}, \text{ мм}, \quad (3.11)$$

где  $D'$  и  $D'_{\text{выгл}}$  – соответственно наружный диаметр кольца до и после операции алмазного выглаживания.

7. Провести анализ приведенных в таблице данных, характеризующих качество поверхностей колец при различных режимах и методах обработки, обратив внимание на режимы обработки, полученную шероховатость поверхностей, характер и величину полных тангенциальных остаточных напряжений  $\sigma_T$ , возникших в поверхностном слое материала, на соответствие расчетных данных экспериментальным и факторы, влияющие на величину этих значений. Сделать выводы.

### ***Оформление отчета***

Отчет должен содержать:

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Перечень используемого при выполнении оборудования, оснастки и материалов.
4. Раздел «Теоретические основы работы», в котором кратко излагаются теоретические сведения по выполняемым экспериментам.
5. Раздел «Выполнение работы», в котором приводится схема установки и обработки колец-заготовок на токарном станке (см. рис. 3.3) с ее описанием, описание последовательности выполнения работы в соответствии с разделом 5 с приведением и расшифровкой расчетных формул, а также расчеты, результаты измерений и вычислений с заполненной таблицей данных.
6. Выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

1. Совокупностью каких параметров характеризуется качество поверхностей деталей машин?
2. Дайте определение погрешности обработки.
3. Назовите виды геометрических погрешностей обработки.
4. Дайте определение волнистости и шероховатости поверхности.

5. Какими параметрами характеризуется шероховатость поверхности?
6. Как влияет изменение шероховатости поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин?
7. Как влияют режимы резания на шероховатость обрабатываемой поверхности при точении?
8. Какими параметрами определяются режимы резания при точении?
9. Причины возникновения наклепа в обрабатываемом поверхностном слое и методы его оценки.
10. Как влияет наклеп в поверхностном слое на эксплуатационные свойства деталей машин?
11. Какие напряжения называются внутренними остаточными напряжениями?
12. Сколько родов остаточных напряжений и как они характеризуются?
13. В чем заключается сущность экспериментального метода определения внутренних остаточных напряжений первого рода, разработанного академиком Н. Н. Давиденковым?
14. Каким образом с помощью экспериментального метода определить внутренние остаточные напряжения в поверхностном слое обрабатываемых деталей?
15. Как влияют остаточные напряжения на эксплуатационные свойства деталей машины?
16. Приведите формулы для вычисления полных тангенциальных остаточных напряжений  $\sigma_T$ , возникающих в кольце при его обработке по наружной поверхности.
17. В чем заключается сущность алмазного выглаживания?
18. Какие параметры процесса алмазного выглаживания влияют на качество обработанной поверхности?
19. Приведите формулу для вычисления силы выглаживания.
20. Как влияют сила выглаживания и подача на шероховатость обработанной поверхности при алмазном выглаживании?
21. Как влияет скорость обработки при алмазном выглаживании на шероховатость поверхности?
22. Приведите формулу, устанавливающую зависимость шероховатости выглаженной поверхности от величины подачи.
23. Чем определяется кратность приложения нагрузки в каждой точке обрабатываемой поверхности?

## Лабораторная работа № 4

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

*Цель работы:* приобретение практических навыков по измерению деталей, обработке полученных данных и контролю за точностью механической обработки с помощью статистических методов с построением кривых распределения и определению по ним процента возможного брака; закрепление материала лекционного курса по теме «Анализ параметров качества изделий с помощью методов математической статистики».

#### *Теоретические основы работы*

Изучение причин (факторов), вызывающих погрешности при обработке заготовок на металлорежущих станках, позволило установить связь между этими причинами и величинами погрешностей и, таким образом, управлять погрешностями, снижая или устраняя их совсем. При анализе точности технологического процесса эти погрешности подразделяются на систематические и случайные.

Систематической погрешностью называют погрешность, которая для всех деталей рассматриваемой партии остается постоянной или же закономерно изменяется от детали к детали. Например, постоянной погрешностью будет погрешность формы обтачиваемой поверхности (конусность) в результате непараллельности оси шпинделя направляющим станины токарного станка. Закономерно изменяющиеся погрешности появляются в результате, например, износа режущего инструмента или тепловой деформации станка в период его пуска до достижения состояния теплового равновесия. Такие погрешности подчиняются определенной закономерности и складываются алгебраически, т. е. с учетом их знаков.

Случайные погрешности возникают в результате действия большого количества несвязанных между собой факторов. Определить заранее момент появления и точную величину этой погрешности для каждой конкретной детали в партии не представляется возможным. Примерами случайных погрешностей являются погрешность положения заготовки на станке или погрешность обработки, вызываемая упругими отжатиями элементов технологической системы под влиянием нестабильных сил резания. Из-за случайных погрешностей

часть деталей в партии будет иметь размеры к верхнему пределу допуска, часть – к нижнему пределу допуска. Случайные погрешности, суммируясь с систематическими, приводят к рассеянию суммарной погрешности, а следовательно, – к рассеянию действительных размеров.

Для выявления закономерностей распределения погрешностей и их влияния на точность обработки пользуются статистическими методами исследования, основанными на выводах теории вероятности и математической статистики. Для таких исследований используются в частности кривые распределения, которые строятся на основании многократных наблюдений одного и того же явления по следующей методике.

Берется партия деталей в количестве 50–100 штук и измеряется по контролируемой поверхности с точностью не ниже 0,1 допуска на размер. Затем по результатам измерений определяется разность между наибольшим и наименьшим размерами (размах варьирования), величина которой в свою очередь разбивается на 7–11 равных интервалов. Далее для каждого интервала определяется количество деталей  $m_i$  с размерами в пределах этого интервала (абсолютная частота), а также относительная частота (часть), которая вычисляется из выражения

$$\frac{m_i}{n} 100\% , \quad (4.1)$$

где  $n$  – общее количество исследуемых деталей.

Если какой-либо из размеров попадает на границу интервала, то в смежные интервалы относится по 0,5 единицы. При построении графика на оси абсцисс откладываются отрезки, соответствующие размеру принятого значения интервала и по середине каждого из них откладываются ординаты, пропорциональные относительной частоте. Соединив последовательно вершины этих ординат прямыми линиями, получают ломаную линию, которая при увеличении количества деталей в партии, сужении интервалов и увеличении их числа будет приближаться к плавной кривой линии, называемой кривой распределения. Анализ кривых распределения, построенных на основании наблюдений за технологическим процессом, позволяет определить влияние систематических и случайных погрешностей на выполнение процесса обработки, а по форме кривой распределения установить точность обработки. Наиболее часто встречающимися кривыми распределения являются: кривая распределения по закону равной вероятности; кривая распределения по закону Симпсона и кривая распределения по закону Гаусса, или как часто его называют, закону нормального распределения.

Закон равной вероятности получения размеров деталей, обрабатываемых в одной партии, показывает, что при выбранном методе обработки и оборудовании размер зависит только от одного из факторов, например, от износа режущего инструмента. Если износ инструмента при этом нарастает во времени по прямолинейному закону, размер обрабатываемой заготовки изменяется также строго постоянно, увеличиваясь или уменьшаясь (рис. 4.1). Однако это возможно, если действия всех остальных факторов несущественны и не влияют на изменение размеров деталей.

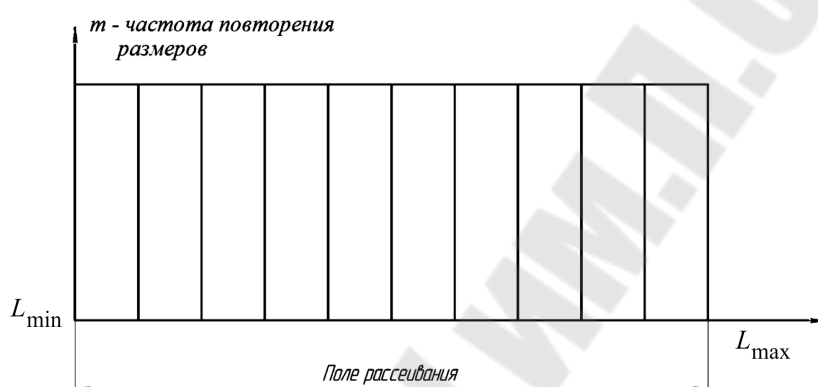


Рис. 4.1. График распределения по закону равной вероятности

Если жесткость технологической системы недостаточна и в связи с износом элементов системы появляется дополнительная ее деформация, то размеры обрабатываемых деталей могут изменяться во времени уже по закону Симпсона, и кривая распределения получаемого размера принимает вид треугольника (рис. 4.2) из-за суммарного действия уже двух факторов: износа инструмента и связанного с ним увеличения деформации технологической системы.

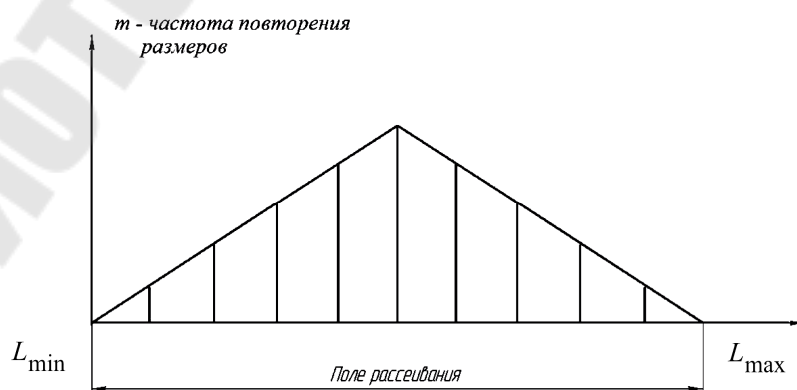


Рис. 4.2. График распределения по закону Симпсона



Если же в процессе обработки заготовок получаемая погрешность обработки является результатом действия многих факторов и ни один из них не является преобладающим, то наиболее вероятным будет распределение размеров в данной партии по закону нормального распределения (закону Гаусса), уравнение кривой которого имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{x^2}{2\sigma^2}, \quad (4.2)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение аргумента;  $y$  – частота появления погрешностей;  $x$  – отклонение действительных размеров от средних, равное разности каждой детали и среднего арифметического размера:

$$x = L_i - L_{cp}, \quad (4.3)$$

где  $L_i$  – фактические размеры каждой детали в партии;  $L_{cp}$  – средний размер деталей в партии, который определяется по формуле

$$L_{cp} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{n}, \quad (4.4)$$

где  $L_1, L_2, L_3, L_n$  – размеры отдельных деталей в партии, мм;  $n$  – количество деталей в партии.

Среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{(L_1 - L_{cp})^2 + (L_2 - L_{cp})^2 + \dots + (L_n - L_{cp})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (L_i - L_{cp})^2}{n}}. \quad (4.5)$$

Из уравнения кривой нормального распределения следует, что среднее квадратичное отклонение является единственным параметром, определяющим форму кривой нормального распределения. На рис. 4.3 показаны кривые нормального распределения, ординаты которых определены при  $\sigma = 1; 1,5; 2$ . Форма кривых позволяет сделать вывод, что чем меньше величина  $\sigma$ , тем меньше кривая растянута и, следовательно, меньше рассеяние размеров. Таким образом, величина  $\sigma$  определяет рассеяние размеров и характеризует степень влияния случайных погрешностей.

Многочисленными исследованиями установлено, что в технологии машиностроения распределение размеров обрабатываемых дета-

лей подчиняется чаще всего рассмотренному закону Гаусса, что позволяет его использовать для определения показателей точности технологических процессов обработки. Расчеты показывают, что в интервале  $x = \pm 0,36\sigma$  находится 35 % площади, ограниченной кривой нормального распределения, при  $x = \pm 0,7\sigma$  – 50 %, а при  $x = \pm 3$  – 99,7 %. В последнем случае кривая почти сливается с осью абсцисс. Из этого следует, что отклонения размеров 99,7 % обрабатываемых деталей находятся в пределах  $\pm 3\sigma$  или по абсолютной величине  $6\sigma$ . Отсюда можно сделать вывод, что если допуск  $\sigma$  на контролируемый размер больше  $6\sigma$ , то требуемая точность обработки обеспечивается. При  $\sigma < 6\sigma$  имеется вероятность появления брака, так как часть деталей будет не соответствовать требуемым размерам и, следовательно, принятый процесс обработки должен быть усовершенствован.

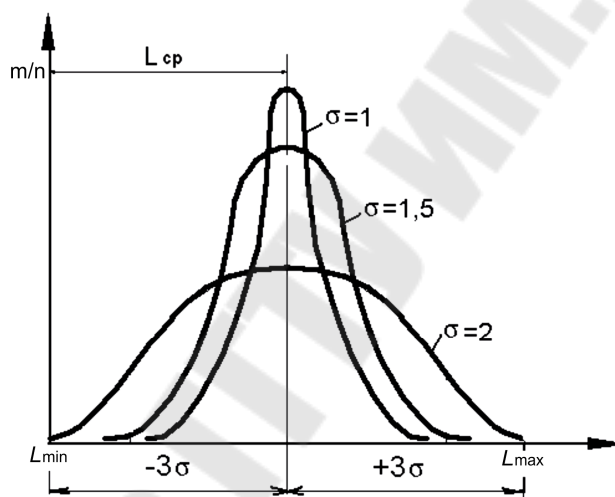


Рис. 4.3. Кривые нормального распределения при различных значениях  $\sigma$

Метод построения кривых распределения позволяет осуществлять исследование точности обработки законченного этапа технологического процесса, но при этом не учитывается последовательность обработки деталей, так как все детали, изготовленные в данной партии, как бы перемешиваются.

### **Оборудование, оснастка и материалы**

Рабочие чертежи деталей

Партии предварительно обработанных деталей в количестве не менее 50 штук в каждой

Микрометры

Микрокалькуляторы

## Порядок проведения работы

1. Определение среднего квадратичного отклонения для партии деталей.

1.1. Начертить в отчете эскиз с рабочего чертежа исследуемой партии деталей, указав на нем контролируемую поверхность и ее размер с предельными отклонениями.

1.2. Произвести микрометром измерение по контролируемому размеру  $L_i$  партии однотипных деталей в количестве  $n$  не менее 50 штук и результаты измерений записать в отчет. Затем из полученных данных выбрать наибольший и наименьший размеры и вычислить разность  $P$  между ними.

$$P = L_{\max} - L_{\min} \quad (4.6)$$

1.3. Полученное число  $P$  разделить на принятое количество интервалов (от 7 до 11) и вычислить величину интервала группирования размеров  $\Delta L$ . Далее для каждого интервала определить количество деталей  $m_i$  с размерами в пределах этого интервала. Если какой-либо из размеров попадает на границу интервала, то в смежные интервалы следует отнести по 0,5 единицы. По формуле (4.1) вычислить относительное количество деталей в каждом интервале. Полученные данные свести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Результаты деления на интервалы**

Номер группы	Интервалы размеров $L_i$ , мм	Частота $m_i$	Относительная частота $\frac{m_i}{n} 100\%$
1	2	3	4
1	17,19–17,20	2	4
2	17,20–17,21	5	10
3	17,21–17,22	8	16
4	17,22–17,23	11	22
5	17,23–17,24	10	20
6	17,24–17,25	11	22
7	17,25–17,26	1	2
8	17,26–17,27	2	4
		$n = \sum m_i = 50$	$n_{\text{отн}} = \sum \frac{m_i}{n} 100 = 100\%$

**Пример 1.** В результате измерения партии деталей в количестве 50 штук диаметром по чертежу  $d = 17,20_{-0,01}^{+0,05}$  мм получили:

$$L_{\min} = 17,19 \text{ мм}; L_{\max} = 17,27 \text{ мм}.$$

Тогда для 8 принятых групп распределения размеров величина интервала группирования  $\Delta L$  будет

$$\Delta L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{8} = \frac{17,27 - 17,19}{8} = 0,01 \text{ мм}.$$

Допустим, что в этом примере после распределения результатов измерения деталей по группам и соответствующих вычислений получены данные, приведенные в табл. 4.1.

1.4. Определяем средний арифметический размер деталей в исследуемой партии по формуле

$$L_{\text{cp}} = \frac{\sum(L'_i m_i)}{n}, \quad (4.7)$$

где  $L'_i$  – средний размер интервала группирования размеров;  $m_i$  – количество деталей в группе;  $n$  – общее количество деталей в исследуемой партии.

Для упрощения расчетов составляем табл. 4.2 и данные вычислений по формуле (4.7) сводим в стлб. 4 этой таблицы.

1.5. Вычисляем среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  по формуле (4.5) следующим образом. Определяем по формуле (4.3) отклонения действительных размеров от средних  $x_i$  для каждого интервала группирования и результаты вычислений сводим в стлб. 5 табл. 4.2. Затем определяем квадраты этих отклонений  $x_i^2$  (сводим в стлб. 6 табл. 4.2), а также произведение величин  $m_i x_i$  для каждого интервала и суммарное значение этих величин  $\sum m_i x_i^2$  (сводим в стлб. 7 табл. 4.2).

Далее вычисляем значение  $\sigma$  по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum m_i x_i^2}{n}}. \quad (4.8)$$

Для рассматриваемого в п. 1.3 примера в табл. 4.2 приведены данные вычислений по п. 1.4 и 1.5 с результатом:

$$\sum m_i x_i^2 = 134,5 \cdot 10^{-4}.$$

Подставив полученные данные в формулу (4.8), определим среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  для этой партии деталей:

$$\sigma = \sqrt{\frac{134,5 \cdot 10^{-4}}{50}} = \sqrt{2,69 \cdot 10^{-4}} = 0,0164.$$

Таблица 4.2

### Результаты вычислений

Номер группы	Интервалы размеров $L_i$ , мм	Частота $m_i$	$L_i m_i$	Отклонение от средней арифметической $x_i = L_i - L_{cp}$	Квадраты отклонений $x^2$	Произведение величин $m_i x_i^2$
1	2	3	4	5	6	7
1	17,19–17,20	2	34,390	–0,035	$12,25 \cdot 10^{-4}$	$24,5 \cdot 10^{-4}$
2	17,20–17,21	5	86,025	–0,025	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$31,25 \cdot 10^{-4}$
3	17,21–17,22	8	137,720	–0,015	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-4}$
4	17,22–17,23	11	189,475	–0,005	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$
5	17,23–17,24	10	172,350	+0,005	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
6	17,24–17,25	11	189,695	+0,015	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$24,75 \cdot 10^{-4}$
7	17,25–17,26	1	17,255	+0,025	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$
8	17,26–17,27	2	34,530	+0,035	$12,25 \cdot 10^{-4}$	$24,5 \cdot 10^{-4}$
		$m_i = 50$	$L_{cp} =$ $= \frac{861,44}{50} =$ $= 17,23$			$\sum m_i x_i^2 =$ $= 134,5 \cdot 10^{-4}$

## 2. Построение кривых фактического и нормального распределения

2.1. По данным табл. 4.1 строим кривую фактического распределения, откладывая на оси абсцисс отрезки, соответствующие размеру принятого значения интервала группирования  $\Delta L$ , а затем по середине каждого из них откладываем ординаты, пропорциональные относительной частоте (стлб. 3).

Соединив последовательно вершины этих ординат прямыми линиями, получим ломаную кривую фактического распределения размеров.

2.2. Для построения кривой нормального распределения по оси абсцисс откладываем значения  $L_i$ , а по оси ординат – значения  $y$ , вычисленные по уравнению (4.2), при фактическом значении, определенном в п. 1.

Для упрощенного построения кривой нормального распределения достаточно определить значения координат ее пяти основных точек. Первая точка  $Y_1$  соответствует  $Y_{\max}$ . Ордината будет максимальной в том случае, когда  $L_i$  совпадает с  $L_{\text{ср}}$  или  $X_i = L_i - L_{\text{ср}} = 0$ . Тогда подставляя в уравнение (4.2) вместо  $X_i$  ноль, получим:

$$Y_i = Y_{\max} = \frac{1}{G\sqrt{2\pi}} = \frac{0,4}{G}. \quad (4.9)$$

Вторая  $Y_2$  и третья  $Y_3$  точки соответствуют точкам перегиба кривой, что будет при  $X_i = \pm\sigma$ . Подставляя в уравнение (4.2) значения  $X_i = \pm\sigma$ , получим:

$$Y_2 = Y_3 = \pm \frac{1}{G\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}} = \pm \frac{1}{G\sqrt{2\pi}e} = \pm \frac{0,24}{\sigma}. \quad (4.10)$$

Кривая нормального распределения простирается в обе стороны в бесконечность, асимптотически приближаясь к оси абсцисс. Однако с достаточной степенью точности можно принять, что точки  $Y_4$  и  $Y_5$  равны нулю при  $X_i = \pm 3\sigma$ .

Для сопоставления кривой нормального распределения с кривой распределения фактических размеров следует привести вычисленные значения  $Y$  к масштабу, в котором вычерчена кривая фактического распределения. Для этого значения  $Y_1$ ,  $Y_2$  и  $Y_3$  в уравнениях (4.9) и (4.10) умножаются на  $\Delta L$  и  $n_{\text{отн}}$  (где  $\Delta L$  – принятый интервал группирования размеров;  $n_{\text{отн}}$  – суммарная относительная частота).

$$\begin{aligned} \text{Тогда } Y_1 &= \frac{0,4\Delta L n_{\text{отн}}}{\sigma} = \frac{40\Delta L}{\sigma} \text{ при } X_i = 0; \\ Y_2 = Y_3 &= \frac{0,24\Delta L n_{\text{отн}}}{\sigma} = \frac{24\Delta L}{\sigma} \text{ при } X_i = \sigma; \\ Y_4 = Y_5 &= 0 \text{ при } X_i = 3\sigma. \end{aligned} \quad (4.11)$$

По вычисленным значениям пяти основных точек в координатах, где построена кривая фактического распределения, построить кривую нормального распределения.

Сравнить построенные в одних координатах кривые фактического и нормального распределения размеров для исследуемой партии деталей и сделать выводы.

**Пример 2.** В качестве примера на рис. 4.4 изображены кривые фактического и нормального распределения размеров, построенные по данным партии деталей, рассмотренной в примере п. 1. Здесь кривая фактического распределения построена по числовым значениям, содержащимся в стлб. 2 и 4 табл. 4.1, а кривая нормального распределения – по пяти основным точкам со следующими координатами:

$$X_i = 0; Y_1 = Y_{\max} = \frac{40\Delta L}{\sigma} = \frac{40 \cdot 0,01}{0,0164} = 24,39;$$

$$X_i = \pm\sigma = \pm 0,0164; Y_2 = Y_3 = \frac{24\Delta L}{\sigma} = \frac{24 \cdot 0,01}{0,0164} = 14,63;$$

$$X_i = \pm 3\sigma = \pm 3 \cdot 0,0164 = \pm 0,0492; Y_4 = Y_5 = 0.$$

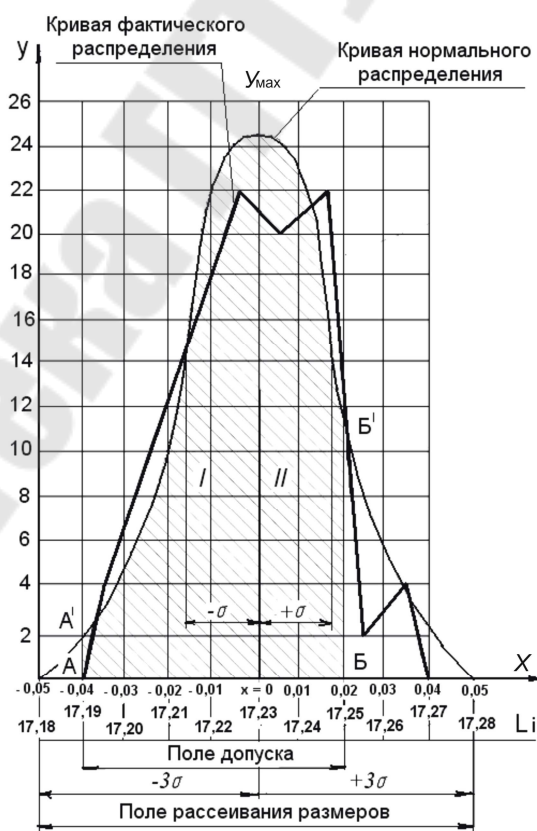


Рис. 4.4. Кривые фактического и нормального распределения

### 3. Определение процента возможного брака по площади кривой распределения

3.1. На оси абсцисс построенных графиков кривых фактического и нормального распределения откладываем поле допуска на рассматриваемый размер деталей и через точки, соответствующие минимальному (А) и максимальному (Б) допустимым размерам, проводим ординаты до пересечения с кривой нормального распределения в точках (А') и (Б') (см. рис. 4.4). Вероятность получения деталей с размерами в границах заданного допуска определяется отношением части площади, ограниченной этими координатами (АА' и ББ') и кривой нормального распределения (заштрихованная площадь) к общей площади, расположенной под этой кривой.

3.2. Площадь под кривой нормального распределения  $S$ , ограниченную ординатами предельно допустимых отклонений размеров, в практических расчетах определяют как состоящую из двух частей, расположенных перед ( $\Phi(z_1)$ ) и за ( $\Phi(z_2)$ ) осью симметрии кривой, т. е.

$$S = \Phi(z_1) + \Phi(z_2). \quad (4.12)$$

В таблице приложения приведены значения  $\Phi(z)$  в долях от единицы в зависимости от отношения

$$z = \frac{\delta}{\sigma}, \quad (4.13)$$

где  $\delta$  – максимально допустимое отклонение размера от среднего значения  $L_{\text{ср}}$ .

$$\delta_1 = L_{\text{min}} - L_{\text{ср}}; \delta_2 = L_{\text{max}} - L_{\text{ср}}, \quad (4.14)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

**Пример 3.** Определить процент возможного брака для партии деталей, рассмотренной в примерах 1 и 2.

1. Определяем минимальный и максимальный допустимые размеры деталей:

$$L_{\text{min}} = 17,20 - 0,01 = 17,19 \text{ мм};$$

$$L_{\text{max}} = 17,20 + 0,05 = 17,25 \text{ мм}.$$



2. Через точки на оси абсцисс (см. рис. 4.4), соответствующие  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$ , проводим ординаты AA' и BB' до пересечения с кривой нормального распределения.

3. По формулам (4.14) определяем значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$ :

$$\delta_1 = L_{\min} - L_{\text{cp}} = 17,19 - 17,23 = -0,04 \text{ мм};$$

$$\delta_2 = L_{\max} - L_{\text{cp}} = 17,25 - 17,23 = 0,02 \text{ мм}.$$

4. Определяем значения отношений  $z_1$  и  $z_2$  по формуле (4.13) при  $\sigma = 0,0164$ :

$$z_1 = \frac{\delta_1}{\sigma} = \frac{0,04}{0,0164} = 2,44; \quad z_2 = \frac{\delta_2}{\sigma} = \frac{0,02}{0,0164} = 1,22.$$

5. По табл. 4.3 находим значения площадей  $\Phi(z_1)$  и  $\Phi(z_2)$  в зависимости от значений  $z_1$  и  $z_2$ :

$$\Phi_{|2,44|} = 0,4926; \quad \Phi_{|1,22|} = 0,3887.$$

6. По формуле (4.12) определяем площадь под кривой нормального распределения, ограниченную ординатами предельно допустимых отклонений размеров:

$$S = \Phi_{|2,44|} + \Phi_{|1,22|} = 0,4926 + 0,3887 = 0,8813.$$

Следовательно, вероятность получения годных деталей составляет 88,13 %.

Ожидаемый общий процент брака:

$$S_1 = 100 - 88,13 = 11,87 \text{ \%}.$$

Однако брак может быть исправимым, тогда вероятность получения деталей с размерами меньшими, чем заданные (неисправимый брак  $S_1'$ ), будет составлять:

$$S' = 0,5 - \Phi_{|2,44|} = 0,5 - 0,4926 = 0,0074, \text{ или } 0,74 \text{ \%}.$$

Вероятность получения деталей с размерами большими, чем допустимые (исправимый брак), составит:

$$S'' = 0,5 - \Phi_{|1,22|} = 0,5 - 0,3887 = 0,1113, \text{ или } 11,13 \text{ \%}.$$

Таблица 4.3

**Значение величины  $\Phi(z)/2$  (половины предельных площадей под кривой нормального распределения)**

$z$	$\Phi(z)/2$	$z$	$\Phi(z)/2$	$z$	$\Phi(z)/2$	$z$	$\Phi(z)/2$
0,00	0,0000	0,90	0,3160	1,80	0,4640	2,70	0,4965
0,05	0,0200	0,95	0,3290	1,85	0,4680	2,75	0,4970
0,10	0,0400	1,00	0,3415	1,90	0,4715	2,80	0,4975
0,15	0,0595	1,05	0,3530	1,95	0,4745	2,85	0,4975
0,20	0,0795	1,10	0,3645	2,00	0,4775	2,90	0,4980
0,25	0,0985	1,15	0,3750	2,05	0,4800	2,95	0,4985
0,30	0,1180	1,20	0,3850	2,10	0,4820	3,00	0,49865
0,35	0,1370	1,25	0,3945	2,15	0,4840	3,10	0,4990
0,40	0,1555	1,30	0,4030	2,20	0,4860	3,20	0,4995
0,45	0,1735	1,35	0,4115	2,25	0,4980	3,30	0,4995
0,50	0,1915	1,40	0,4190	2,30	0,4895	3,40	0,4995
0,55	0,2090	1,45	0,4265	2,35	0,4905	3,50	0,49975
0,60	0,2255	1,50	0,4330	2,40	0,4920	3,60	0,49985
0,65	0,2420	1,55	0,4395	2,45	0,4943	3,70	0,49990
0,70	0,2580	1,60	0,4450	2,50	0,4940	3,80	0,49993
0,75	0,2735	1,65	0,4495	2,55	0,4945	3,90	0,49995
0,80	0,2880	1,70	0,4555	2,60	0,4955	4,0	0,49997
0,85	0,3025	1,75	0,4600	2,65	0,4960	5,0	0,4999997

**Контрольные вопросы**

1. Какие погрешности называются систематическими?
2. Какие погрешности называются случайными?
3. Методика построения опытным путем кривой фактического распределения.
4. Определение поля рассеивания размеров.
5. Как вычисляется относительная частота повторения размеров?
6. Наиболее часто встречающиеся в технологии машиностроения закономерности распределения погрешностей.
7. Форма графика распределения по закону равной вероятности.
8. Форма графика распределения по закону Симпсона.

9. Уравнение кривой нормального распределения (распределения по закону Гаусса).
10. Форма кривой нормального распределения и влияние на нее значения среднего квадратичного отклонения  $\sigma$ .
11. Формула для определения среднего размера партии деталей.
12. Формула для вычисления среднего квадратичного отклонения.
13. Как оценить по соотношению значений среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  и допуска на размер  $\delta$ , обеспечивается ли требуемая точность обработки?
14. Как вычисляется интервал группирования размеров  $\Delta L$ ?
15. Формулы для определения координат пяти основных точек кривой нормального распределения.
16. Как привести вычисленные значения координат кривой нормального распределения к масштабу, в котором вычерчена кривая фактического распределения?
17. Методика определения процента возможного брака по площади кривой распределения.

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЗВЕНЬЯ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ

*Цель работы:* приобретение навыков по назначению целесообразного метода достижения точности сборки в зависимости от условий производства изделия, а также по практическому расчету допусков на составляющие звенья сборочной единицы исходя из требуемой точности замыкающего звена и метода ее достижения.

*Приборы, оборудование и материалы:* штамп или штамповый блок с шариковыми направляющими узлами; микрометры рычажного типа МР по ГОСТ 4381–87, диапазон измерений 0–0,25 мм или 25–50 мм; нутромер модели 109 с диапазоном измерений 18–50 мм по ГОСТ 9244–75; микрокалькуляторы; ГОСТ 14672–83–14678–83, ГОСТ «Конструкция и размеры блоков с шариковыми направляющими».

#### *Теоретические сведения*

При выполнении сборочных работ возможны ошибки во взаимном расположении деталей и узлов, их повышенные деформации, несоблюдение в сопряжениях необходимых зазоров или натягов.

Погрешности сборки вызываются рядом причин: отклонением размеров, формы и расположения поверхностей сопрягаемых деталей; несоблюдением требований к качеству поверхностей деталей; неточной установкой и фиксацией элементов машины в процессе ее сборки; низким качеством пригонки и регулирования сопрягаемых деталей; несоблюдением режима сборочной операции, например, при затяжке резьбовых соединений или при склеивании; геометрическими неточностями сборочного оборудования и технологической оснастки; неправильной настройкой сборочного оборудования.

Многие вопросы, связанные с достижением требуемой точности сборки, решаются с использованием анализа размерных цепей собираемого изделия или его сборочных единиц (узлов).

Размерной цепью называется замкнутая цепь размеров, определяющих точность относительного расположения осей и поверхностей одной детали или нескольких деталей в сборочном соединении.

Каждая размерная цепь содержит одно звено, которое носит название исходного или замыкающего, а все остальные звенья этой цепи

называются составляющими. Требуемой точностью исходного звена размерной цепи обычно определяется точность размеров составляющих звеньев.

В сборочных размерных цепях замыкающим звеном может быть зазор, линейный или угловой размер, точность которого оговаривается в технических условиях. Если в сборочных размерных цепях встречаются звенья, образованные зазорами в соединениях типа вал–отверстие или паз–выступ, то такие звенья носят названия звеньев-зазоров.

Составляющие звенья размерной цепи делятся на увеличивающие и уменьшающие. Увеличивающим называется звено, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается, а уменьшающим – с увеличением которого замыкающее звено уменьшается. Увеличивающим звеньям присписывается знак «плюс», а уменьшающим – знак «минус».

Для изображения типа звеньев на схемах размерных цепей используются стрелками. На замыкающем и уменьшающих звеньях стрелки направляют влево, а на увеличивающих – вправо. У изделия может быть несколько размерных цепей и каждой цепи присваивается определенное обозначение. Обычно цепи с линейными размерами обозначаются прописными буквами русского алфавита, а цепи с угловыми размерами – буквами греческого алфавита. Каждому составляющему звену присписывается индекс в виде порядкового номера, отсчет которого производится от левой границы замыкающего звена.

Замыкающему звену присписывается индекс  $\Delta$ . Например:  $A_{\Delta}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и т. д. (см. рис. 5.2).

Расчет размерных цепей сводится к решению одной из двух следующих задач.

1. По заданному номинальному размеру, допуску и предельным отклонениям замыкающего звена определить номинальные размеры, допуски и предельные отклонения составляющих звеньев размерной цепи.

2. По заданным допускам, размерам и предельным отклонениям составляющих звеньев размерной цепи определить номинальный размер, допуск и предельные отклонения замыкающего звена.

Первая задача называется проектной или прямой. Решением этой задачи занимаются как конструкторы, так и технологи. Вторая задача носит название проверочной или обратной. С этой задачей чаще приходится сталкиваться технологам. При проектировании изде-

лей требуемая точность соединений (точность замыкающего звена) устанавливается из условий эксплуатации изделия и его служебного назначения, достичь необходимой точности сборки, – значит получить размер замыкающего звена размерной цепи, не выходящий за пределы допускаемых отклонений.

Требуемая точность сборки может быть обеспечена методами полной взаимозаменяемости, неполной (частичной) взаимозаменяемости, групповой взаимозаменяемости, пригонки и регулирования.

#### 1. *Метод полной взаимозаменяемости*

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается у всех объектов путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их величин. Целесообразно применять в условиях достижения высокой точности при малом числе звеньев размерной цепи в крупносерийном и массовом производстве. Основан этот метод на расчете размерных цепей по методу максимума и минимума, что обеспечивает 100%-ную взаимозаменяемость составляющих звеньев и требует высокой точности их изготовления (что приводит к увеличению трудоемкости и себестоимости изготовления деталей). Основными преимуществами этого метода являются простота процесса сборки, сводящегося к выполнению различных соединений без пригоночных и регулировочных работ, обеспечение предпосылок для организации поточной сборки и ее автоматизации, упрощение процесса снабжения запасными частями и ремонта изделий, находящихся в эксплуатации. При данном методе обеспечения точности сборки допуски на составляющие звенья размерной цепи по заданному допуску на замыкающее звено определяются следующими двумя наиболее применяемыми способами: способом пробных расчетов (способом попыток); способом единого качества.

1.1. *Способ пробных расчетов* заключается в том, что на все составляющие звенья размерной цепи назначаются допуски и предельные отклонения размеров, исходя из характера работы изделия и выбранного метода обработки деталей, а затем по соответствующим формулам рассчитываются номинальный размер, погрешность, координата середины поля рассеяния погрешности и предельные отклонения замыкающего звена, которые не должны превышать его заданного значения. Если это условие не соблюдается, то производится корректировка допусков и предельных отклонений на всех или части размеров составляющих звеньев. После этого вновь производится

проверочный расчет размерной цепи, и так поступают до тех пор, пока не будет выполнено требуемое условие.

Рассмотрим в качестве примера шариковый направляющий узел штампового блока, приведенный на рис. 5.1. Расчет размерных цепей начинается с составления схемы размерной цепи, на которой в виде отрезков любой длины изображаются звенья размерной цепи в последовательности их расположения в изделии (рис. 5.2). При этом если даже номинальный размер какого-либо звена равен нулю, все равно оно изображается на схеме в виде отрезка произвольной длины. Затем определяются типы составляющих звеньев (увеличивающее или уменьшающее) и на схеме перед параметрами увеличивающих звеньев ставится знак плюс, а перед параметрами уменьшающих звеньев – минус.

Введем следующие обозначения:  $A$  – номинальный размер;  $\delta$  – допуск на размер;  $\Delta_{\text{в}}$  – верхнее отклонение;  $\Delta_{\text{н}}$  – нижнее отклонение от номинального размера;  $\Delta_0$  – координата середины поля допуска;  $n$  – число составляющих звеньев.

Для указания звена, к которому относятся эти обозначения, воспользуемся следующими индексами:  $\Delta$  – замыкающее звено;  $i$  – любое составляющее звено;  $j$  – увеличивающее звено;  $q$  – уменьшающее звено.

Зависимость номинального размера замыкающего звена  $A$  от номинальных размеров составляющих звеньев  $A$  можно установить непосредственно по схеме размерной цепи, изображенной на рис. 5.2,

$$A_{\Delta} = A_3 - |A_2 + A_1 + A_4|$$

или в общем виде для любого количества составляющих звеньев это уравнение номинальных размеров будет иметь следующий вид:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{j=1}^{n_j} A_j - \sum_{q=1}^{n_q} A_q, \quad (5.1)$$

где  $n_j$  и  $n_q$  – число увеличивающих и число уменьшающих звеньев цепи.

Допуск на размер замыкающего звена  $\delta_{\Delta}$  определяется в общем виде для любого количества составляющих звеньев по формуле

$$\delta_{\Delta} = \sum_{j=1}^{n_j} \delta_j + \sum_{q=1}^{n_q} \delta_q = \sum_{n=1}^n \delta_i. \quad (5.2)$$

Координатой середины поля допуска любого  $i$ -го звена  $\Delta 0_i$  называется расстояние от середины поля допуска размера этого звена до его номинального значения и определяется по формуле

$$\Delta 0_i = \frac{\Delta B_i + \Delta H_i}{2}. \quad (5.3)$$

Если известны  $\Delta 0_i$  и  $\delta_i$  для размеров  $A_i$ , то его предельные отклонения определяются по формулам:

$$\Delta B_i = \Delta 0_i \frac{\delta_i}{2}; \quad \Delta H_i = \Delta 0_i - \frac{\delta_i}{2}. \quad (5.4)$$

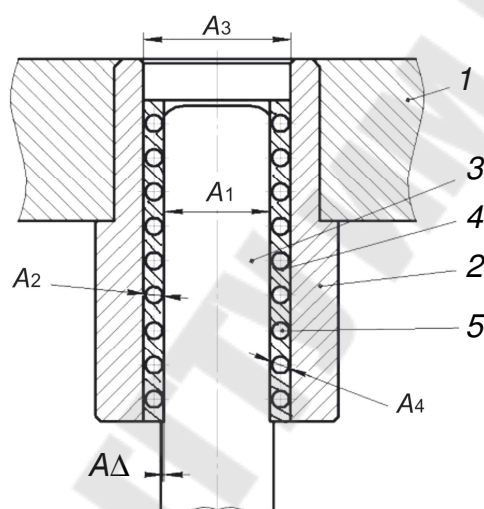


Рис. 5.1. Шариковый направляющий узел штампового блока:  
1 – верхняя плита; 2 – направляющая втулка; 3 – колонка; 4 – корпус сепаратора;  
5 – шарики сепаратора

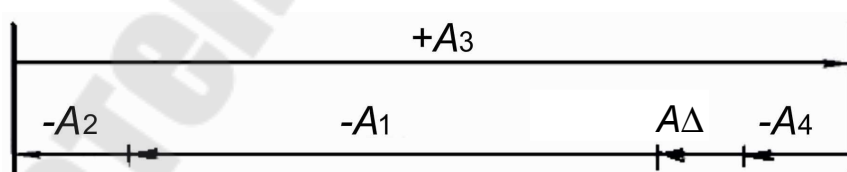


Рис. 5.2. Сборочная размерная цепь шарикового направляющего узла

Координаты середины поля допуска замыкающего звена  $\Delta 0_\Delta$  вычисляются по формуле

$$\Delta 0_\Delta = \sum_{j=1}^{n_j} \Delta 0_j - \sum_{q=1}^{n_q} \Delta 0_q. \quad (5.5)$$



Предельные отклонения размера замыкающего звена  $A_{\Delta}$  определяются по следующим формулам, аналогичным формулам (5.4):

$$\Delta B_{\Delta} = \Delta 0_{\Delta} + \frac{\delta_{\Delta}}{2}; \Delta H_{\Delta} = \Delta 0_{\Delta} - \frac{\delta_{\Delta}}{2}. \quad (5.6)$$

Рассмотренные формулы (5.1)–(5.6) позволяют вычислить по заданным параметрам составляющих звеньев все параметры замыкающего звена  $A_{\Delta}$ ,  $\delta_{\Delta}$ ,  $\Delta 0_{\Delta}$ ,  $\Delta B_{\Delta}$  и  $\Delta H_{\Delta}$ , что и требуется при способе пробных расчетов.

1.2. *Способ единого качества* заключается в том, что на все составляющие звенья размерной цепи назначаются допуски одного качества по стандарту СТ СЭВ 145–75. При этом необходимый допуск устанавливается по табл. 5.2 в зависимости от числа единиц допуска.

Допуск  $\delta_i$ , назначаемый по этому способу на размеры составляющих звеньев размерной цепи, определяется выражением

$$\delta_i = ai, \quad (5.7)$$

где  $a$  – число единиц допуска;  $i$  – единица допуска, определяемая по формуле

$$i = 0,45\sqrt[3]{D+0,001D}, \text{ мм},$$

где  $D$  – среднегеометрическое значение крайних размеров в интервале по таблице допусков СТ СЭВ 145–75, в который попадает размер составляющего звена.

Обозначим  $D+0,001D$  через  $Q_i$ , тогда:

$$i = 0,45\sqrt[3]{Q_i} \text{ и } \delta_i = a0,45\sqrt[3]{Q_i}.$$

Подставим значение  $\delta_i$  в исходное уравнение (5.2) и после преобразования получим следующее выражение для вычисления числа  $a$ :

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{0,45\sum_{i=1}^n\sqrt[3]{Q_i}}. \quad (5.8)$$

При наличии в размерной цепи стандартных деталей, допуски на размеры которых уже назначены, число  $a$  определяется по формуле

$$a = \frac{\delta_{\Delta} - \sum_{i=1}^{n_c} \delta_i}{0,45 \sum_{i=1}^{n-n_c} \sqrt[3]{Q_i}}, \quad (5.9)$$

где  $n_c$  – число звеньев, образованных из размеров стандартных деталей.

В формулах (5.8) и (5.9) значения чисел  $Q_i$  берутся в мм, а  $\delta_i$  и  $\delta_{\Delta}$  – в мкм.

Значения величины  $\sqrt[3]{Q_i}$  для всех интервалов размеров таблицы допусков приведены в табл. 5.1, а значения числа ( $a$ ) для всех квалитетов точности – в табл. 5.2.

По определенному значению числа  $a$ , пользуясь табл. 5.2, находят соответствующий ему квалитет и по данному квалитету назначают допуски на размеры составляющих звеньев размерной цепи по посадкам  $h$  и  $H$  соответственно для валов и отверстий. Если число  $a$  не совпадает точно с табличным, то допуски на составляющие звенья размерной цепи, кроме одного регулирующего звена, назначаются по ближайшему квалитету, а допуск регулирующего звена  $\delta_p$  вычисляется по формуле

$$\delta_p = \delta_{\Delta} - \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i. \quad (5.10)$$

В качестве регулирующего звена может быть принято любое составляющее звено размерной цепи.

Для определения предельных отклонений регулирующего звена необходимо предварительно вычислить его координату середины поля допуска  $\Delta 0_p$  по следующим формулам:

для увеличивающего регулирующего звена

$$\Delta 0_p = \Delta 0_{\Delta} - \sum_{j=1}^{n_j-1} \Delta 0_j + \sum_{g=1}^{n_g} \Delta 0_g; \quad (5.11)$$

для уменьшающего регулирующего звена:

$$\Delta 0_p = \sum_{j=1}^{n_j} \Delta 0_j - \sum_{g=1}^{n_g-1} \Delta 0_g - \Delta 0_{\Delta}. \quad (5.12)$$

Предельные отклонения регулирующего звена вычисляются по формулам (5.4).

**Пример 1.** Для сборочной размерной цепи шарикового направляющего узла (см. рис. 5.2) определить допуск и предельные отклонения размеров составляющих звеньев, если дано:  $A_1 = 28$  мм,  $A_2 = A_3 = 3$  мм,  $A_4 = 34$  мм и  $A_{\Delta} = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм.

Вычисляем допуск  $\delta_{\Delta}$  и координату среднего поля допуска  $\Delta 0_{\Delta}$  замыкающего звена  $\delta_{\Delta} = \Delta_{B_{\Delta}} - \Delta_{H_{\Delta}} = 0,012 - (-0,008) = 0,020$  мм,  
 $\Delta 0_{\Delta} = \frac{\Delta_{B_{\Delta}} - \Delta_{H_{\Delta}}}{2} = \frac{0,012 - 0,008}{2} = 0,002$  мм.

По формуле (5.8) определяем число  $a$ , определив по табл. 5.1, что для  $A_2 = A_4 = 3$  мм, величина  $\sqrt[3]{Q_i} = 1,22$ ;  $A_1 = 28 \rightarrow \sqrt[3]{Q_1} = 2,86$  и  $A_3 = 34 \rightarrow \sqrt[3]{Q_i} = 3,36$  мм,  $a = \frac{20}{0,45 \cdot (2 \cdot 1,22 + 2,86 + 3,36)} = 5,13$  мм.

По табл. 5.2 ближайшим к полученному значению числа  $a = 5,13$  мм будет 4-й квалитет, по которому и назначаются допуски и предельные отклонения на размеры  $A_3$  (H4),  $A_2$  и  $A_4$  (h4), приняв в качестве регулирующего звена колонку поз. 3 (см. рис. 5.1) с размером  $A_1$ :

$$A_2 = A_4 = 3_{-0,003} \text{ мм}; A_3 = 34_{-0,007}^{+0,007} \text{ мм}.$$

Вычисляем координаты среднего поля допуска для размеров  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$ :

$$\Delta 0_2 = \Delta 0_4 = \frac{0 + (-0,003)}{2} = -0,0015 \text{ мм}; \Delta 0_3 = \frac{0,007 + 0}{2} = 0,0035 \text{ мм}.$$

По формуле (5.10) определяем допуск размера  $A_1$  регулирующего звена:

$$\delta_1 = 0,020 - (0,007 + 2 \cdot 0,003) = 0,007 \text{ мм}.$$

Регулирующее звено с размером  $A_1$  является уменьшающим, следовательно, его координату поля доступа определяем по формуле (5.12):

$$\Delta 0_1 = \Delta 0_3 - (\Delta 0_2 + \Delta 0_4) - \Delta 0_\Delta = 0,0035 - 2 \cdot (-0,0015) - 0,002 = 0,0045 \text{ мм.}$$

По формуле (5.4) вычисляем предельные отклонения размера  $A_1$  регулирующего звена:

$$\Delta B_1 = \Delta 0_1 + \frac{\delta_1}{2} = 0,0045 + \frac{0,007}{2} = 0,008; \Delta H_1 = \Delta 0_1 - \frac{\delta_1}{2} = 0,0045 - \frac{0,007}{2} = 0,001. \text{ Следовательно, } A_1 = 28_{+0,001}^{+0,008} \text{ мм.}$$

Правильность произведенных вычислений проверяем по методу пробных расчетов, пользуясь формулами (5.1), (5.2), (5.5) и (5.6):

$$A_\Delta = A_3 - |A_2 + A_1 + A_4| = 34 - (28 + 3 + 3) = 0;$$

$$\delta_\Delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 0,007 + 2 \cdot 0,003 + 0,007 = 0,020 \text{ мм;}$$

$$\Delta 0_\Delta = \Delta 0_3 - (\Delta 0_1 + \Delta 0_2 + \Delta 0_4) = 0,0035 - [2 \cdot (-0,0015) + 0,0045] = 0,002 \text{ мм;}$$

$$\Delta B_\Delta = 0,002 + \frac{0,020}{2} = 0,012 \text{ мм; } \Delta H_\Delta = 0,002 - \frac{0,020}{2} = -0,008 \text{ мм.}$$

Вычисленное значение замыкающего звена  $A_\Delta = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм соответствует заданному, следовательно, предельные отклонения на составляющие звенья сборочной размерной цепи:

$A_1 = 28_{+0,001}^{+0,008}$  мм;  $A_2 = A_4 = 3_{-0,003}^{+0,003}$  мм;  $A_3 = 34_{+0,007}^{+0,007}$  мм и  $A_\Delta = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм – назначены правильно.

Следует отметить, что назначенные допуски на размеры звеньев экономическими методами обработки не обеспечиваются, следовательно, осуществлять требуемую точность сборки по методу полной взаимозаменяемости в данном случае не целесообразно.

## 2. Метод неполной (частичной) взаимозаменяемости

Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается при сборке не для всех собираемых объектов: некоторый процент объектов потребует либо замены отдельных деталей, либо их дополнительной обработки. В основе метода лежит положение теории вероятностей, согласно которому крайние значения погрешностей составляющих звеньев размерной цепи встречаются реже, чем средние значения. Достоинством этого метода является то, что использование его позволяет значитель-

но расширить допуск на составляющие звенья размерной цепи по сравнению с методом полной взаимозаменяемости и потребует дополнительной доработки.

Однако этот процент обычно не превышает 0,27 %, поэтому затраты на дополнительную доработку собираемых изделий с избытком окупаются экономией, получаемой от уменьшения трудоемкости механической обработки деталей за счет расширения допусков на их размеры. Сборка этим методом целесообразна для изделий с многозвенными размерными цепями в серийном и массовом производствах.

Определение допусков и предельных отклонений на размеры составляющих звеньев по этому методу производится теми же способами, что и для метода полной взаимозаменяемости, т. е. по способу пробных расчетов и по способу единого качества.

2.1. Расчет допусков предельных отклонений по способу пробных расчетов аналогичен рассмотренному в п.п. 1.1 за исключением формул (5.2) и (5.5) для вычисления размеров  $\delta_{\Delta}$  и  $\Delta 0_{\Delta}$ . Допуск на размер замыкающего звена  $\delta_{\Delta}$  вычисляется по формуле

$$\delta_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^{o2} \delta_i^2} \quad (5.13)$$

или

$$\delta_{\Delta} = t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda'_i \delta_i^2}, \quad (5.14)$$

где  $\lambda'_i$  и  $K_i$  – коэффициенты относительного рассеивания.

Вычисление координаты середины поля допуска замыкающего звена  $\Delta 0_{\Delta}$  производится по формуле

$$\Delta 0_{\Delta} = \sum_{j=1}^{n_j} \left( \Delta D_j + \alpha_j \frac{\delta_j}{2} \right) - \sum_{q=1}^{n_q} \left( \Delta o_q + \alpha_q \frac{\delta_q}{2} \right) = \sum_{i=1}^n \vartheta_i \left( \Delta o_i + \alpha_i \frac{\delta_i}{2} \right) \quad (5.15)$$

Для некоторых законов распределения погрешностей принимаются равными:

$\lambda' = 1/9$ ,  $\square$  – для закона нормального распределения;

$\lambda' = 1/6$ ,  $K = 1, 2$  – для закона распределения Симпсона;

$\lambda' = 1/3$ ,  $K = 1, 73$  – для закона равной вероятности;

$t$  – нормированный параметр распределения значений от принятой вероятности нахождения погрешностей любого звена в поле допуска;

$\alpha_i$  – коэффициент относительной вероятности.

Значение  $\alpha_i$  находится в пределах от 0 до  $-0,5$  и определяется опытно-статическим методом.

$\xi_i$  – коэффициент передаточного отношения, характеризующий влияние погрешностей составляющих звеньев на замыкающее звено. Для увеличивающих звеньев  $\xi_i = 1$ , для уменьшающих –  $\xi_i = -1$ .

При проектировочных расчетах, когда законы распределения составляющих звеньев неизвестны, обычно принимают:  $t = 3$ ,  $\alpha_i = 0$ ,  $\lambda' = 1/6$  и  $K = 1,2$  – для всех составляющих звеньев.

2.2. При расчете допусков и предельных отклонений по способу единого качества число единиц допуска ( $a$ ) определяется по формуле

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{0,45t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i' Q_i^{\frac{2}{3}}}}, \quad (5.16)$$

если  $t = 3$ , то удобнее пользоваться формулой

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{0,45t \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 Q_i^{\frac{2}{3}}}}. \quad (5.17)$$

При наличии стандартных деталей допуски на размеры которых уже назначены, формула (5.17) примет следующий вид:

$$a = \frac{\sqrt{\delta_{\Delta}^2 - \sum_{i=1}^{n_c} K_i^2 \delta_i^2}}{0,45 \sqrt{\sum_{i=1}^{n-n_c} K_i^2 Q_i^{\frac{2}{3}}}}, \quad (5.18)$$

где  $n_c$  – число звеньев, образованных из размеров стандартных деталей.

Значения величины  $Q_i^{\frac{2}{3}}$  для всех интервалов размеров таблицы допусков приведены в табл. 5.4.

По определенному значению числа  $a$ , пользуясь табл. 5.5, находят соответствующий ему квалитет и по этому квалитету назначают допуски на размеры составляющих звеньев так же, как при методе полной взаимозаменяемости (п. 1.2). Допуск регулирующего звена определяется по следующим формулам:

$$\delta_p = \frac{1}{t\sqrt{\lambda'_p}} \sqrt{\delta_\Delta^2 - t \sum_{i=1}^{n-1} \lambda'_i \delta_i^2}, \quad (5.19)$$

если  $t = 3$ , то

$$\delta_p = \frac{1}{K_p} \sqrt{\delta_\Delta^2 - \sum_{i=1}^{n-1} K_i^2 \delta_i^2}. \quad (5.20)$$

Координата середины поля допуска регулирующего звена вычисляется по формулам:

для увеличивающего регулирующего звена:

$$\Delta 0_p = \Delta 0_\Delta - \sum_{j=1}^{n_j-1} \left( \Delta 0_j + \alpha_j \frac{\delta_j}{2} \right) - \sum_{q=1}^{n_q} \left( \Delta 0_q + \alpha_q \frac{\delta_q}{2} \right) - \alpha_p \frac{\delta_p}{2}; \quad (5.21)$$

для уменьшающего регулирующего звена:

$$\Delta 0_p = \sum_{j=1}^{n_j} \left( \Delta 0_j + \alpha_j \frac{\delta_j}{2} \right) - \sum_{q=1}^{n_q-1} \left( \Delta 0_q + \alpha_q \frac{\delta_q}{2} \right) - \Delta 0_\Delta - \alpha_p \frac{\delta_p}{2}. \quad (5.22)$$

Предельные отклонения регулирующего звена вычисляются по формулам (5.4).

**Пример 2.** По данным примера 1 определить допуски и предельные отклонения на размеры составляющих звеньев размерной цепи, используя метод неполной взаимозаменяемости и способ единого квалитета точности.

Определяем число  $a$  по формуле (5.17), взяв по табл. 5.1 значения  $Q_i^{\frac{2}{3}}$  для размеров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$

$$a = \frac{20}{0,45 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,44 + 8,15 + 11,40}} = 7,82 \text{ мм.}$$

По табл. 5.2 ближайшим к полученному значению числа  $a = 7,82$  будет 5-й квалитет, по которому и назначаем допуски и предельные

отклонения на размеры  $A_3$  ( $H5$ ),  $A_2$  и  $A_4$  ( $h5$ ), приняв в качестве регулирующего звено с размером  $A_1$ .

$$A_2 = A_4 = 3_{-0,004} \text{ мм}; A_3 = 34^{+0,011} \text{ мм}.$$

Вычисляем координату среднего поля допуска для размеров  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$ .

$$\Delta 0_2 = \Delta 0_4 = \frac{0 + (-0,004)}{2} = -0,002 \text{ мм}; \Delta 0_3 = \frac{0,011 + 0}{2} = 0,0055 \text{ мм}.$$

Допуск регулирующего звена при  $K_1 = 1,2$  определяем по формуле (5.20):

$$\delta_1 = \frac{1}{1,2} \cdot \sqrt{0,02^2 - 1,2^2 \cdot (2 \cdot 0,004^2 + 0,011^2)} = 0,011 \text{ мм}.$$

Звено с размером  $A_1$  является уменьшающим, следовательно, его координату среднего поля допуска определяем по формуле (5.22) при  $\alpha_i = 0$ :

$$\Delta 0_1 = \Delta 0_3 - (\Delta 0_2 + \Delta 0_4) - \Delta 0_\Delta = 0,0055 - 2(-0,002) - 0,002 = 0,0075 \text{ мм}.$$

По формулам (5.4) вычисляем предельные отклонения размера  $A_1$  регулирующего звена.

$$\Delta B_1 = \Delta 0_1 + \frac{\delta_1}{2} = 0,0075 + \frac{0,011}{2} = 0,013 \text{ мм};$$

$$\Delta H_1 = \Delta 0_1 - \frac{\delta_1}{2} = 0,0075 - \frac{0,011}{2} = 0,002 \text{ мм}.$$

Следовательно,  $A_1 = 28_{+0,002}^{+0,013}$  мм.

Правильность произведенных вычислений проверяем по методу пробных расчетов, пользуясь формулами (5.1), (5.13), (5.15) и (5.16).

$$\delta_\Delta = 1,2 \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = 1,2 \cdot \sqrt{0,011^2 + 2 \cdot 0,004^2 + 0,011^2} = 0,02 \text{ мм};$$

$$\Delta 0_\Delta = \Delta 0_3 - (\Delta 0_1 + \Delta 0_2 + \Delta 0_4) = 0,0055 - [0,0075 + 2 \cdot (-0,002)] = 0,002 \text{ мм};$$

$$\Delta B_\Delta = 0,002 + \frac{0,020}{2} = 0,012 \text{ мм};$$



$$\Delta H_{\Delta} = 0,002 - \frac{0,020}{2} = -0,008 \text{ мм.}$$

Вычисленное значение замыкающего звена  $A_{\Delta} = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм соответствует заданному, следовательно, предельные отклонения на составляющие звенья размерной цепи  $A_1 = 28_{+0,002}^{+0,013}$  мм,  $A_2 = A_4 = 3_{-0,004}$  мм,  $A_3 = 34^{+0,011}$  мм и  $A_{\Delta} = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм назначены правильно. Так как назначенные допуски экономическими методами обработки не обеспечиваются, то осуществлять требуемую точность сборки по методу неполной взаимозаменяемости в данном случае не целесообразно.

### 3. Метод групповой взаимозаменяемости

Сущность метода заключается в том, что при конструировании изделия требуемая точность замыкающего звена обеспечивается по методу полной взаимозаменяемости, но вследствие трудности выполнения назначенных допусков они заменяются производственными или технологическими допусками, превышающими конструкторские допуски в несколько раз. Для обеспечения требуемой точности непосредственно на сборке изделия производят сортировку сопрягаемых деталей на группы по их действительным размерам, а затем берут сопрягаемые детали из тех групп, в результате сборки которых получается допуск замыкающего звена в пределах, установленных конструктором, т. е. обеспечивается требуемая точность сборочного соединения. Сборку по этому методу называют еще селективной сборкой (сборка по методу подбора).

Для обеспечения точности по методу групповой взаимозаменяемости необходимо на размеры составляющих звеньев размерной цепи назначить допуски и предельные отклонения по методу полной взаимозаменяемости так, чтобы выполнялись требования формул (5.2) и (5.5) и следующего уравнения:

$$\sum_{j=1}^{n_j} \delta_j = \sum_{q=1}^{n_q} \delta_q. \quad (5.23)$$

Если полученные конструкторские допуски оказались труднодостижимыми, то их увеличивают в одинаковое число раз ( $m$ ) для того, чтобы они стали выполнимы экономическими методами обработки, т. е.

$$\delta_j m = \delta'_j \text{ и } \delta_q m = \delta'_q.$$

Таким образом, получаются увеличенные в  $m$  раз допуски  $\delta'_j$  и  $\delta'_q$ , которые называются производственными или технологическими, при этом допуск замыкающего звена  $\delta_\Delta$  также увеличивается в такое же число ( $m$ ) раз и превращается в производственный:

$$\delta'_\Delta = m\delta_\Delta.$$

Затем детали изготавливают по этим производственным допускам экономическими методами обработки и сортируют на такое же число ( $m$ ) групп так, чтобы в пределах каждой группы обеспечивалась требуемая точность сборки. Предельные отклонения размеров для каждой группы определяются следующим образом. Для первой группы деталей предельные отклонения размеров принимаются равными расчетным значениям, а для последующих групп к предельным отклонениям предыдущей группы прибавляют расчетные конструкторские допуски соответственно для звеньев, увеличивающих  $\delta_j$  и уменьшающих  $\delta_q$ .

Для проверки правильности вычисления допусков в каждой группе применяются следующие формулы:

$$\Delta B_\Delta = \sum_{j=1}^{n_j} \Delta B_j - \sum_{q=1}^{n_q} \Delta H_q; \quad (5.24)$$

$$\Delta H_\Delta = \sum_{j=1}^{n_j} \Delta H_j - \sum_{q=1}^{n_q} \Delta B_q; \quad (5.25)$$

$$\delta_\Delta = \Delta_{B_\Delta} - \Delta_{H_\Delta}. \quad (5.26)$$

**Пример 3.** По данным примера 1 определить производственные допуски, количество групп и предельные отклонения размеров звеньев размерной цепи для каждой группы при обеспечении точности сборки по методу групповой взаимозаменяемости.

Проверяем, удовлетворяют ли назначенные в примере 1 допуски на размеры звеньев размерной цепи уравнению (5.23):

$$\delta_3 = \delta_1 + \delta_2 + \delta_4,$$

где из примера 1:  $\delta_3 = 0,007$  мм;  $\delta_2 = \delta_4 = 0,003$  мм;  $\delta_1 = 0,007$  мм.

Подставив значение  $\delta_1$ , получаем:  $0,007 \neq 2 \cdot 0,003 + 0,007 = 0,0013$ .

Равенство не обеспечивается, следовательно, назначаем новые допуски так, чтобы они удовлетворяли формулам (5.2), (5.5) и (5.23).

Принимаем  $\delta_3 = 0,010$  мм,  $\delta_2 = \delta_4 = 0,0025$  мм и по формуле (5.2) вычисляем  $\delta_1$ , при условии, что  $\delta_\Delta = 0,020$  мм;

$$\delta_1 = \delta_\Delta - \delta_2 - \delta_4 - \delta_3 = 0,020 - 2 \cdot 0,0025 - 0,010 = 0,005 \text{ мм.}$$

Проверяем, удовлетворяют ли новые допуски уравнению (5.23):  $0,010 = 2 \cdot 0,0025 + 0,005 = 0,010$  – уравнение выполняется.

Следовательно, принимаем:

$$A_2 = A_4 = 3^{+0,0025} \text{ мм}; A_3 = 34^{+0,010} \text{ мм.}$$

При заданном значении замыкающего звена  $A_\Delta = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм.

Для вычисления предельных отклонений  $A_1$  по формуле (5.12) определяем его координату среднего поля допуска

$$\Delta 0_1 = \Delta 0_3 - (\Delta 0_2 + \Delta 0_4) - \Delta 0_\Delta,$$

$$\text{где } \Delta 0_3 = \frac{0,010 + 0}{2} = 0,005 \text{ мм};$$

$$\Delta 0_2 = \Delta 0_4 = \frac{0,0025 + 2}{2} = 0,00125 \text{ мм};$$

$$\Delta 0_\Delta = 0,005 - 2 \cdot 0,00125 - 0,002 = 0,0005 \text{ мм.}$$

Следовательно:

$$\Delta B_1 = 0,0005 + \frac{0,005}{2} = 0,003 \text{ мм};$$

$$\Delta H_1 = 0,0005 - \frac{0,005}{2} = -0,002 \text{ мм.}$$

Получаем  $A_1 = 28_{-0,002}^{+0,003}$  мм.

Экономические методы обработки начинаются с допусков, соответствующих 7–8-му квалитетам точности.

Для размеров  $A_1 = 28$  мм по таблице допусков допуск 7-го квалитета точности составляет 0,021 мм. Приняв этот допуск за производственный, определяем число  $m$ :

$$m = \frac{\delta'_1}{\delta_1} = \frac{0,021}{0,005} = 4.$$

Принимаем число групп  $m = 4$ .

Вычисляем производственные допуски на размеры составляющих звеньев размерной цепи:

$$\delta'_1 = 0,0005 \cdot 4 = 0,020 \text{ мм};$$

$$\delta'_2 = \delta'_4 = 0,0025 \cdot 4 = 0,010 \text{ мм};$$

$$\delta'_3 = 0,010 \cdot 4 = 0,040 \text{ мм}.$$

Следовательно, входящие в сборку детали изготавливаются по размерам:

$$A_1 = 28^{+0,003}_{-0,002} \text{ мм}; A_2 = A_4 = 3^{+0,010} \text{ мм}; A_3 = 34^{+0,040} \text{ мм}$$

с последующей сортировкой их на 4 группы по фактическим предельным отклонениям размеров согласно данным табл. 5.1.

Производим проверку правильности вычислений предельных отклонений размеров для деталей, например, 3 группы по формулам (5.24)–(5.26):

$$\Delta B_\Delta = 0,030 - 2 \cdot 0,005 - 0,008 = 0,012 \text{ мм};$$

$$\Delta H_\Delta = 0,020 - 2 \cdot 0,0075 - 0,013 = -0,008 \text{ мм};$$

$$\delta_\Delta = 0,012 - 0,008 = 0,020 \text{ мм}.$$

Получаем  $A_\Delta = 0^{+0,012}_{-0,008}$  мм, что соответствует  $A_\Delta$  заданному.

Следовательно, требуемая точность замыкающего звена в 3-й группе деталей обеспечивается и предельные отклонения вычислены правильно. Аналогично проверяются остальные группы.

Таблица 5.1

**Результаты расчета предельных отклонений размеров звеньев  $A_1, A_2, A_3$  и  $A_4$  сборочной размерной цепи**

Номер группы	$A_1$		$A_2 = A_4$		$A_3$		Расчетные формулы
	$\Delta B_1$	$\Delta H_1$	$\Delta B_2$	$\Delta H_2$	$\Delta B_3$	$\Delta H_3$	
1	0,003	-0,002	0,0025	0	0,010	0	$\Delta_B^1 = \Delta_{B_{\text{расч}}}$ $\Delta_H^1 = \Delta_{H_{\text{расч}}}$

Номер группы	$A_1$		$A_2 = A_4$		$A_3$		Расчетные формулы
	$\Delta B_1$	$\Delta H_1$	$\Delta B_2$	$\Delta H_2$	$\Delta B_3$	$\Delta H_3$	
2	0,008	0,003	0,0050	0,0025	0,020	0,010	$\Delta_B^2 = \Delta_{B_{расч}}^1 + \delta_{i_{расч}}$ $\Delta_H^2 = \Delta_{H_{расч}}^1 + \delta_{i_{расч}}$
3	0,013	0,008	0,0075	0,0050	0,030	0,020	$\Delta_B^3 = \Delta_{B_{расч}}^2 + \delta_{i_{расч}}$ $\Delta_H^3 = \Delta_{H_{расч}}^2 + \delta_{i_{расч}}$
4	0,018	0,013	0,0100	0,0075	0,040	0,030	$\Delta_B^4 = \Delta_{B_{расч}}^3 + \delta_{i_{расч}}$ $\Delta_H^4 = \Delta_{H_{расч}}^3 + \delta_{i_{расч}}$

#### 4. Метод пригонки

Метод заключается в том, что в сборочную размерную цепь включается дополнительное, так называемое компенсирующее, звено, при этом на все составляющие звенья размерной цепи назначаются легкодостижимые допуски, а требуемая точность замыкающего звена достигается на сборке за счет дополнительной обработки (пригонки) этого компенсирующего звена путем снятия с него слоя материала шлифованием, притиркой, шабрением, опиловкой и другими способами.

В качестве компенсатора обычно используется одна из деталей сборочного соединения или дополнительная деталь в виде прокладки, проставочного кольца или другого конструктивного элемента. Достоинство этого метода заключается в получении высокой точности сборки при расширенных допусках на составляющие звенья цепи, что снижает трудоемкость механической обработки входящих деталей, при этом трудоемкость сборки существенно повышается, а детали собранного узла можно использовать только комплектно. Сборка этим методом целесообразна в единичном и мелкосерийном производствах. Расчет размерных цепей при использовании метода пригонки целесообразно осуществлять по методу максимума и минимума.

На все составляющие звенья размерной цепи, включая и компенсатор, назначаются легкодостижимые в данных производственных условиях допуски. Затем по формуле (5.2) определяется погрешность замыкающего звена  $\delta'_\Delta$ . Величина необходимой компенсации погрешности замыкающего звена определяется по формуле

$$\delta_k = \delta'_\Delta - \delta_\Delta + \delta_{mk}, \quad (5.27)$$

где  $\delta_\Delta$  – заданная погрешность замыкающего звена;  $\delta_{mk}$  – погрешность метода компенсации, зависящая от принятого метода дополнительной обработки компенсатора (шабрение, шлифование и т. д.).

Далее на все составляющие звенья назначают предельные отклонения размеров и определяют координаты середины полей допусков этих звеньев  $\Delta 0_i$ . Затем по формуле (5.5) определяют координату середины поля рассеяния погрешности замыкающего звена  $\Delta' 0$ .

Величина необходимой компенсации координаты середины поля рассеяния погрешности замыкающего звена определяется из выражения

$$\Delta 0_k = \pm (\Delta 0_\Delta - \Delta 0'_\Delta). \quad (5.28)$$

Знак «плюс» ставится в том случае, когда компенсатор является увеличивающим звеном, а знак «минус» – уменьшающим звеном.

Предельные значения величины необходимой компенсации размера замыкающего звена равны:

$$\Delta B_k = \Delta 0_k + \frac{\delta_k}{2}; \quad \Delta H_k = \Delta 0_k - \frac{\delta_k}{2}. \quad (5.29)$$

Если  $\Delta B_k > 0$ , то это означает, что на сборке необходимо увеличить принятое значение размера компенсатора на эту величину. Если компенсирующей является одна из деталей размерной цепи, то необходимо заранее изменить ее номинальный размер  $A_k$  по рабочему чертежу на размер  $A_k^1$ , который вычисляется по формуле

$$A_k^1 = A_k + \Delta B_k. \quad (5.30)$$

Если  $\Delta B_k < 0$  и  $\Delta H_k < 0$ , то для уменьшения объема пригоночных работ следует изменить размер компенсатора, используя формулу (5.30) с учетом знака при  $\Delta B_k$ .

**Пример 4.** Для обеспечения требуемой точности сборки методом пригонки, по данным примера 1 определить предельные отклонения размеров звеньев размерной цепи, а также размер компенсирующего звена до сборки и после пригонки при следующих фактических размерах состоящих звеньев:  $A_1 = 28,1$  мм,  $A_2 = 3,005$  мм,  $A_3 = 34,01$  мм и  $A_4 = 3,01$  мм.

Принимаем в качестве компенсирующего звена колонку поз. 3 (см. рис. 5.1) с размером  $A_1$  и назначаем на звенья размерной цепи (см. рис. 5.2)  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  допуски и предельные отклонения размеров по 8-му качеству точности, достижимому экономическими методами обработки:

$$A_1 = 28_{-0,033} \text{ мм}; A_2 = A_4 = 3^{+0,014} \text{ мм}; A_3 = 34^{+0,039} \text{ мм}.$$

Определим погрешность замыкающего звена по формуле (5.2):

$$\delta'_\Delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 0,033 + 2 \cdot 0,014 + 0,039 = 0,10 \text{ мм}.$$

Величину необходимой компенсации погрешности замыкающего звена  $\delta_k$  определяем по формуле (5.27):

$$\delta_k = \delta'_\Delta - \delta_\Delta + \delta_{mk} \text{ мм},$$

где  $\delta_\Delta$  – заданная погрешность замыкающего звена;  $\delta_\Delta = 0,012 - (-0,008) = 0,020$  мм;  $\delta_{mk}$  – погрешность метода компенсации.

Для пригонки шлифованием принимаем  $\delta_{mk} = 0,1$  мм.

Координату середины поля рассеяния погрешности замыкающего звена определяем по формуле (5.5):

$$\begin{aligned} \Delta 0' &= \Delta 0_3 - (\Delta 0_1 + \Delta 0_2 + \Delta 0_4) = \frac{0,039 + 0}{2} - \frac{0 + (-0,033)}{2} + 2 \cdot \frac{0,014 + 0}{2} = \\ &= 0,022 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Так как колонка, принятая в качестве компенсирующего звена, является уменьшающим звеном, то при вычислении величины необходимой компенсации координаты середины поля рассеяния погрешности замыкающего звена  $\Delta 0_k$  по формуле (5.23) ставим в ней знак «минус»:

$$\Delta 0_k = -(\Delta 0_\Delta - \Delta 0'_\Delta) = -(0,002 - 0,022) = 0,020 \text{ мм}.$$

Вычисляем предельные значения величины необходимой компенсации размера замыкающего звена по формулам (5.29):

$$\Delta B_k = 0,020 + \frac{0,18}{2} = 0,11 \text{ мм}; \Delta H_k = 0,020 - \frac{0,18}{2} = -0,07 \text{ мм}.$$

Вычисляем номинальный размер компенсирующего звена  $A_k^1$  по формуле (5.30):

$$A_k^1 = 28 + 0,11 = 28,11 \text{ мм.}$$

Вычисляем размер замыкающего звена по заданным фактическим размерам составляющих звеньев:

$$A_\Delta^1 = 34,01 - 3,01 - 3,005 - 28,1 = -0,105 \text{ мм.}$$

Следовательно, для обеспечения заданной точности замыкающего звена  $A_\Delta = 0_{-0,008}^{+0,012}$  мм необходимо с компенсирующего звена при пригонке сошлифовать припуск величиной 0,105 мм и выполнить колонку с номинальным размером  $A_1^k = 27,995_{-0,008}^{+0,012}$  мм и заданными предельными отклонениями.

Таким образом, колонка должна быть пригнана в размер  $A_1^k = 27,995_{-0,008}^{+0,012}$  мм.

#### *5. Метод регулирования*

Метод заключается в том, что в конструкцию изделия вводится специальная деталь, называемая подвижным компенсатором. В качестве подвижного компенсатора используют: винтовую пару, клин, набор прокладок, зазор в сопряжении типа вал–отверстие и т. п. На все звенья размерной цепи назначаются легко выполнимые допуски, а требуемая точность замыкающего звена достигается на сборке за счет перемещения подвижного компенсатора на необходимую величину. Преимущества этого метода заключаются в том, что: отпадает необходимость в повторной сборке и разборке, а также в подгонке компенсатора механической обработкой; в процессе эксплуатации изделия и износа его звеньев можно восстановить требуемую точность замыкающего звена; создаются условия для организации поточной сборки. К недостаткам метода следует отнести увеличение числа деталей в изделии, что усложняет его конструкцию и технологию сборки.

Расчет размерной цепи при использовании метода регулирования сводится по существу к расчету подвижного компенсатора, при этом величина необходимой компенсации рассчитывается по формулам (5.27)–(5.29).

#### *6. Выбор метода достижения точности*

Выбор метода достижения точности замыкающего звена зависит от величины допуска, установленного на размер замыкающего звена,



и от числа составляющих звеньев размерной цепи. Кроме этого, при выборе необходимо учитывать реальные возможности предприятия по обеспечению проектируемой точности размеров.

Если число составляющих звеньев размерной цепи  $n \leq 4$ , то расчет цепи выполняют по методу максимума и минимума; используют вероятностный метод (метод неполной взаимозаменяемости).

Для предварительного выбора метода рекомендуется следующий способ. По номинальным размерам составляющих звеньев размерной цепи определяется их среднее значение по формуле

$$A_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i|}{n}, \quad (5.31)$$

где  $A_i$  – номинальный размер  $i$ -го составляющего звена;  $n$  – число составляющих звеньев в размерной цепи.

Затем по установленному допуску на размер замыкающего звена и числу составляющих звеньев цепи определяется среднее значение допуска для каждого звена по следующим формулам: при расчете на максимум-минимум:

$$\delta_{\text{cp}} = \frac{\delta_{\Delta}}{n}; \quad (5.32)$$

при расчете вероятностным методом:

$$\delta_{\text{cp}} = \frac{\delta_{\Delta}}{k_i \sqrt{n}} = \frac{\delta_{\Delta}}{1,2 \sqrt{n}}. \quad (5.33)$$

По полученным значениям  $A_{\text{cp}}$  и  $\delta_{\text{cp}}$  определяют по таблице допусков ближайший квалитет точности.

Если расчет размерной цепи выполняется по методу максимума и минимума и величина  $\delta_{\text{cp}}$  (по формуле (5.32)) соответствует 9-му квалитету и грубее, то следует использовать метод полной взаимозаменяемости. При малом числе звеньев метод полной взаимозаменяемости иногда можно использовать и при  $\delta_{\text{cp}}$ , соответствующем 6–8-му квалитету точности, так как снижение трудоемкости сборки окупит превышение требований к точности изготовления нескольких деталей. Если расчет выполняется по вероятностному методу и величина  $\delta_{\text{cp}}$  (по формуле (5.33)) соответствует 10-му квалитету и грубее,

то следует использовать метод неполной взаимозаменяемости. Если  $\delta_{\text{ср}}$  превышает по точности приведенные выше качества, то при крупносерийном и массовом производствах следует применять метод регулирования или групповой взаимозаменяемости, а при единичной и мелкосерийном производствах – метод пригонки или регулирования.

**Пример 5.** По данным примера 1 определить рациональный метод обеспечения точности сборки шарикового направляющего узла (см. рис. 5.1).

Определяем средний размер деталей по формуле (5.31):

$$A_{\text{ср}} = \frac{28 + 2 \cdot 3 + 34}{4} = 17 \text{ мм.}$$

По формуле (5.33) определяем среднее значение допуска, если:

$$\delta_{\Delta} = 0,012 - (-0,008) = 0,020 \text{ мм;}$$

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{0,020}{1,2 \cdot \sqrt{4}} = 0,0083 = 8,3 \text{ мкм.}$$

По таблице допусков  $\delta_{\text{ср}} = 8,3$  мкм соответствует 5-му качеству точности с допуском равным 8 мкм.

Следовательно, сборку рассматриваемого узла целесообразно обеспечивать следующими методами: при серийном и массовом производствах – методом групповой взаимозаменяемости; при единичном и мелкосерийном производствах – методом пригонки.

### ***Порядок проведения работы***

1. По ГОСТ 14672–83–14678–83 ознакомиться с назначением и конструкцией блоков, шариковых направляющих и входящих деталей, а также техническими требованиями на изготовление и сборку этих изделий.

2. Ознакомиться с устройством и принципом действия шарикового направляющего узла на действующем штампе.

3. Снять с колонок верхнюю половину штампа и шариковые сепараторы и измерить фактические размеры  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  (см. рис. 5.1) сборочной размерной цепи на каждой шариковой направляющей блока. Для определения размеров  $A_2$  и  $A_4$  измерить диаметры 4–6-ти шариков сепаратора и применять их среднее значение.

4. Пользуясь фактическими размерами составляющих звеньев размерной цепи по формуле (5.1), вычислить фактический размер замыкающего звена  $A_{\Delta}$  для каждой шариковой направляющей блока. Результаты измерений и расчетов свести в табл. 5.3.

5. Определить по ГОСТ 14676–83 заданные размеры замыкающего звена  $A_{\Delta}$  шарикового направляющего узла и сравнить их с фактическими. Сделать выводы и заключение.

6. Рассчитать по приведенной в п. 2 методике допуски и предельные отклонения размеров  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  на составляющие звенья сборочной размерной цепи шарикового направляющего узла по заданной точности замыкающего звена  $A_{\Delta}$ , при обеспечении точности сборки методами: полной взаимозаменяемости, неполной взаимозаменяемости, групповой взаимозаменяемости и пригонки. Результаты вычислений свести в табл. 5.3. Исходные данные для расчетов взять по указанному преподавателем варианту из табл. 5.2.

7. Проанализировать результаты расчетов и, учитывая заданный тип производства, выбрать для своего варианта оптимальный метод обеспечения точности сборки шарикового направляющего узла.

8. Данные измерений и результаты расчетов, полученные при выполнении работы, свести в табл. 5.3, выполненную по приведенной форме.

9. Сделать выводы по работе, где: указать, соответствуют ли фактические размеры замыкающего звена измеренных шариковых направляющих узлов требованиям ГОСТ; привести оптимальный метод обеспечения точности сборки для выполняемого варианта с его обоснованием и т. д.

### *Содержание отчета*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Перечень используемого оборудования, оснастки и материалов.
4. Раздел «Выполнение работы», в котором приводятся: краткое описание назначения и конструкции шарикового направляющего узла, его чертеж (рис. 5.1) и схема сборочной размерной цепи (рис. 5.2); краткое описание методики построения размерных цепей; наименование методов обеспечения точности сборки с краткой характеристикой; краткое описание хода выполнения работы; исходные данные для расчетов по заданному варианту; результаты измерений; расчет-

ные формулы с расшифровкой входящих обозначений; результаты измерений и расчетов, сведенные в табл. 5.3.

### 5. Выводы по работе.

Таблица 5.2

#### Исходные данные для расчета сборочной размерной цепи шарикового направляющего узла

Номер варианта	Размеры, мм				Фактические размеры для метода пригонки, мм				Тип производства
	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> = A <sub>4</sub>	A <sub>Δ</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>4</sub>	
1	20	26	3	-0,016 -0,015	20,10	26,005	3,005	3,005	Крупно-серийное
2	25	31	3	+0,002 -0,016	25,12	31,030	3,0	3,002	Единичное
3	32	38	3	+0,01 -0,01	32,13	38,025	3,004	3,002	Мелко-серийное
4	36	44	4	+0,008 -0,012	36,1	44,0	4,01	4,009	Серийное
5	40	48	4	+0,012 -0,008	40,08	48,039	4,012	4,012	Крупно-серийное
6	45	58	4	+0,01 -0,012	45,06	58,045	4,004	4,002	Единичное

#### Контрольные вопросы

1. Причины, вызывающие погрешности сборки.
2. Дать определение размерной цепи сборочного соединения.
3. Какие звенья размерной цепи являются составляющими, исходными или замыкающими; увеличивающими и уменьшающими?
4. Правила построения схем размерных цепей и обозначения звеньев.
5. Какие задачи решаются при расчете размерных цепей?
6. Назовите методы обеспечения точности сборки.
7. Сущность метода полной взаимозаменяемости.
8. Сущность способа расчета размерных цепей на максимум и минимум.
9. Сущность способа пробных расчетов размерных цепей.
10. Сущность расчета размерных цепей способом единого качества.

11. Как определяется координата середины поля допуска размера?
12. Формулы для вычисления предельных отклонений размеров.
13. Как определить число единиц допуска ( $a$ ) при расчете размерных цепей по методу полной взаимозаменяемости?
14. Какое звено называют регулирующим при расчете размерных цепей?
15. Формулы для вычисления  $\delta_p$  и  $\Delta o_p$  регулирующего звена размерной цепи по методу полной взаимозаменяемости.
16. Сущность метода неполной (частичной) взаимозаменяемости.
17. Формулы для вычисления числа единиц допуска ( $a$ ) по методу неполной взаимозаменяемости.
18. Формулы для вычисления  $\delta_p$  и  $\Delta o_p$  регулирующего звена размерной цепи по методу неполной взаимозаменяемости.
19. Сущность метода групповой взаимозаменяемости.
20. Как определяется число групп ( $m$ ) сортировки деталей при обеспечении точности сборки методом групповой взаимозаменяемости?
21. Методика расчета предельных отклонений на размеры по группам сортировки деталей.
22. Формулы для проверки правильности расчета допусков на размеры звеньев по группам сортировки деталей.
23. Сущность метода пригонки.
24. Формула для вычисления величины необходимой компенсации погрешности замыкающего звена в методе пригонки.
25. Сущность метода регулирования.
26. Устройство микрометра типа МР и методика измерений с его помощью.
27. Устройство нутромера модели 109 и методика измерений с его помощью.
28. Методика выбора оптимального метода обеспечения точности сборки в зависимости от программы выпуска изделий, количества звеньев размерной цепи и требуемой точности замыкающего звена.

Таблица 5.3

## Результаты измерений и вычислений

Исходные данные, мм		$A_1$	$A_3$	$A_2, A_4$				$A_\Delta$					
		28	34	3				$0^{+0,012}_{-0,008}$					
Направляющие узлы	1												
	2												
Методы обеспечения точности сборки:		Расчетные допуски и предельные отклонения в мм											
		$\delta_1$	$\Delta_{в1}$	$\Delta_{н1}$	$\delta_3$	$\Delta_{в3}$	$\Delta_{н3}$	$\delta_2$	$\Delta_{в3}$	$\Delta_{н2}$	$\Delta_{в\Delta}$	$\Delta_{н\Delta}$	
полной взаимозаменяемости		0,007	0,008	0,001	0,007	0,007	0,0	0,003	0,0	-0,003	+0,012	-0,008	
неполной взаимозаменяемости		0,011	0,013	0,002	0,011	0,011	0,0	0,004	0,0	-0,004	$\delta_\Delta$		
групповой взаимозаменяемости	производственные	0,02	0,018	-0,002	0,04	0,04	0,0	0,01	0,01	0,0	0,02		
	по группам	1	0,005	0,003	-0,002	0,01	0,01	0,0	0,0025	0,0025	0,0	$\Delta_{0\Delta}$	
		2	0,005	0,008	0,003	0,01	0,02	0,01	0,0025	0,005	0,0025	0,002	
		3	0,005	0,013	0,008	0,01	0,03	0,02	0,0025	0,0075	0,005	$A'_1$	
		4	0,005	0,018	0,013	0,01	0,04	0,03	0,0025	0,01	0,0075	$28,11_{-0,033}$	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$A'_\Delta$			
пригонки		$A'_1 = 27,995$		0,039	0,039	0,0	0,014	0,014	0,0	-0,105			

Таблица 5.4

Таблица значений  $\sqrt[3]{Q_i}$  и  $\sqrt[3]{Q_i^2}$ 

Интервалы размеров, мм	$Q_i = D_i +$ $+ 0,001D_i$	$\sqrt[3]{Q_i}$	$\sqrt[3]{Q_i^2}$	Интервалы размеров, мм	$Q_i = D_i +$ $+ 0,001D_i$	$\sqrt[3]{Q_i}$	$\sqrt[3]{Q_i^2}$
До 3	1,73	1,22	1,44	80–120	97,98	4,60	21,30
3–6	4,24	1,62	2,62	120–180	146,97	5,30	27,50
6–10	7,75	1,98	3,90	180–250	212,13	5,90	35,50
10–18	13,42	2,36	5,60	250–315	280,50	6,60	42,50
18–30	23,24	2,86	8,15	315–400	346,40	7,00	49,00
30–50	38,73	3,36	11,40	400–500	477,20	7,70	58,00
50–80	63,24	3,96	16,20				

Таблица 5.5

Число единиц допуска ( $a$ ) для квалитетов точности (СТ СЭВ 145–75)

Ква- ли- тет	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$a$	–	–	–	2	3	5	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000	1600

## Лабораторная работа № 6

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССА ОКСИДИРОВАНИЯ

*Цель работы:* ознакомиться с видами оксидирования стали, цветных металлов и сплавов; узнать назначение оксидных пленок класса шпинели; провести процесс оксидирования стали.

*Приборы, оборудование и материалы:* стальные образцы, спирт, 20-процентный раствор серной кислоты, наждачная бумага, муфельная печь, машинное масло, клещи, ветошь.

#### *Теоретические сведения*

При окислении железа и сталей на поверхности образуются оксиды различных типов. Нагрев при температурах выше  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к образованию рыхлого и непрочного оксида  $\text{FeO}$ . Образование этого оксида не создает защитной от дальнейшего окисления пленки. Кислород продолжает поступать к неокисленной поверхности железа и, окисляя его, может превратить его частично или полностью в окалину.

При низких температурах нагрева (ниже  $300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на поверхности появляются цвета побежалости. Цвета изменяются при повышении температуры в районе  $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$  от соломенно-желтого до синего. Специальная обработка при  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  называется воронением. Образующиеся при этом пленки оксида  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  плотно прилегают к поверхности железа или стали и являются хорошей защитой против окисления во влажной атмосфере. Различие цветов пленки является результатом интерференции лучей видимого света, меняющегося при различной толщине оксидной пленки. При этом всегда образуется пленка оксида  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  класса шпинели, кристаллическое строение которого показано на рис. 6.1. С помощью электроннографического исследования выявлено, что при образовании оксидных пленок класса шпинели соблюдено ориентационное и размерное соответствие, так как работа деформации кристаллической решетки меньше работы образования зародышей нового типа. Этот эффект использован для защиты от окисления при высоких температурах железа, стали и других сплавов. При этом повышение жаростойкости достигается введением легирующих элементов, в результате окисления которых образуются оксиды класса шпинели (типа  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Оксиды с подобной кристаллической решеткой дают хром, алюминий и кремний ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ).



Оксидные пленки на стали, цветных металлах и сплавах могут быть получены тремя различными способами: термическим, химическим и электрохимическим.

Термический способ заключается в нагреве деталей на воздухе или среде водяного пара. При этом на поверхности металла образуется пленка толщиной до 3 мкм, которая в зависимости от состава металла и режима оксидирования имеет различную окраску. Этот способ оксидирования применяется для обработки инструмента и некоторых мелких деталей. Для получения на углеродистой стали защитно-декоративных пленок черного цвета образцы, нагретые до 450–470 °С, охлаждают в масле, повторяя эту операцию несколько раз.

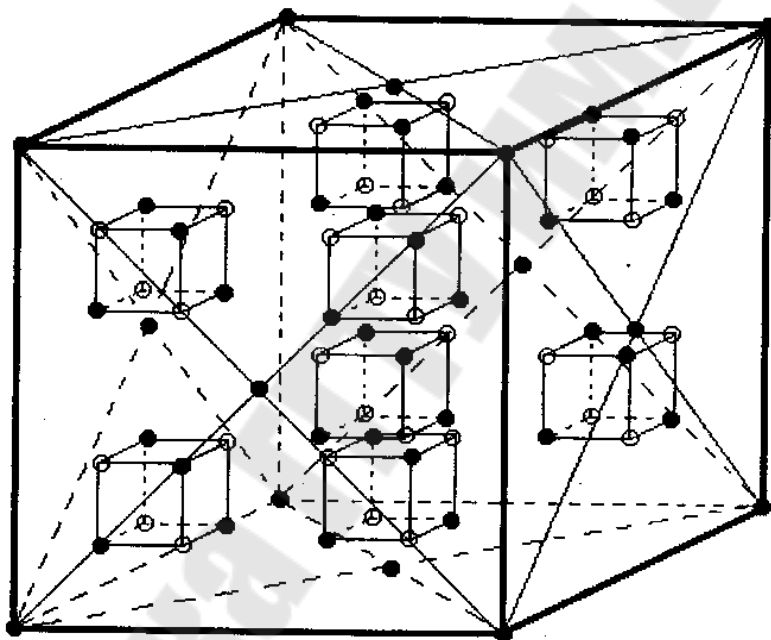


Рис. 6.1. Кристаллическое строение оксида  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Для получения защитно-декоративных пленок наиболее широко используется химический способ оксидирования в щелочных и безщелочных растворах. В первом случае обработка металла производится в горячем концентрированном растворе щелочи, содержащем окислители. Во втором случае рабочий раствор содержит фосфорную кислоту и окислители – азотистые соли кальция или бария.

Электрохимическое оксидирование производится обработкой изделий на аноде, в щелочном растворе. Процесс идет при более низкой температуре и требует меньшего расхода химикатов, чем при химическом оксидировании. Пленки получаются черного цвета с синим

оттенком, более стойкие против коррозии. Малое практическое применение электрохимического способа оксидирования связано с тем, что для его осуществления требуются дополнительные затраты на питание ванн постоянным током. Низкая рассеивающая способность электролитов затрудняет обработку деталей сложного профиля.

Химическому и электрохимическому оксидированию подвергают в основном такие металлы как алюминий, магний, цинк, кадмий, хром, титан и серебро.

### ***Порядок проведения работы***

1. Провести процесс термического оксидирования стальных образцов при различных термических режимах с последующим охлаждением в масле и на воздухе.

2. Определить влияние температуры и среды охлаждения при оксидировании на толщину и цвет оксидной пленки.

### ***Содержание отчета***

1. Цель работы.
2. Приборы и материалы, используемые в работе.
3. Основные теоретические сведения о процессах оксидирования.
4. Таблица экспериментальных результатов оксидирования.
5. Выводы по работе.

## Лабораторная работа № 7

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССА АЛИТИРОВАНИЯ В ВАННАХ С РАСПЛАВЛЕННЫМ АЛЮМИНИЕМ

*Цель работы:* ознакомиться с технологическим процессом алитирования в ваннах с расплавленным алюминием и исследовать некоторые его закономерности и особенности.

*Оборудование и материалы:* электропечь, стальной тигель, алюминий, стальные образцы с содержанием углерода менее 25 %, шлифовальный и войлочные круги, щипцы, секундомер, микроскоп, 60-процентный раствор соляной кислоты, травитель для микрошлифа, фильтровальная бумага, технический спирт.

#### *Теоретические сведения*

Алитированием называется диффузионное насыщение поверхностного слоя алюминием. Назначением этого процесса является повышение жаростойкости (сопротивление окислению при высоких температурах) и коррозионной устойчивости металлов и сплавов. Насыщающий элемент – алюминий, является легкоплавким металлом и сам по себе не может быть защитой против окисления при высоких температурах и атмосферной коррозии. Однако в результате легкого окисления он образует оксид  $Al_2O_3$ , который находится в хорошем структурном и ориентационном соответствии с железом и его сплавами. Слой  $Al_2O_3$  образует оксиды типа шпинели, кристаллическая решетка которой связана с кристаллической решеткой сплава железа. Температура плавления этого оксида около 2000 °С. Поэтому при нагреве плотный и тугоплавкий слой  $Al_2O_3$  представляет механическую преграду между кислородом атмосферы и сплавом. В связи с этим при нагреве до самых высоких температур окисления защищаемого сплава не происходит.

Сущность процесса заключается в выдержке изделий в ванне с расплавленным алюминием или его сплавами при температуре 700–850 °С. Время выдержки в зависимости от вида изделий можно изменять от нескольких секунд до десятков минут. Обладая преимуществом кратковременности насыщения и сравнительно низкой температурой, этот метод характеризуется и рядом недостатков: низкой стойкостью стальных тиглей, налипанием расплава и окисных пленок на поверхность обрабатываемых изделий, образованием хрупких интерметаллидных фаз.

Жидкий алюминий обладает высокой реакционной способностью и разрушает не только большинство металлов, но и ряд неметаллических материалов. Поэтому материал для ванн должен иметь высокую стойкость в расплавленном алюминии, а также высокую механическую прочность, хорошую теплопроводность, теплоустойчивость и другие свойства. Материалов, в полной мере удовлетворяющих этим свойствам, в настоящее время нет. Использование для ванн коррозионно- и жаростойких сталей и сплавов не дало положительных результатов. В результате избирательного растворения легирующих элементов эти стали нередко разрушаются быстрее, чем низкоуглеродистые (например, сталь 20).

Для насыщения используют расплав, содержащий алюминий и до 12 % железа. Его (железо) рекомендуют для предупреждения сильного разъедания изделий при алитировании расплавленным алюминием, снижая тем самым реакционную способность алюминия. При увеличении в ванне для алитирования до 4,6 % железа толщина диффузионного слоя возрастает, а качество его снижается вследствие появления пористости и большой неравномерности.

При содержании в ванне более 5 % железа образуются тусклые, неравномерные по толщине и пористости покрытия. Максимально допустимое содержание железа в расплаве 3–4 %. При большей концентрации железа расплав алюминия необходимо заменить новым или осаждают железо путем понижения температуры расплава до 670–680 °С. В этом случае железо в виде соединения  $FeAl_3$  выпадает на дно, откуда его удаляют.

Нежелательные примеси в расплаве – медь и цинк.

Хорошие результаты дает предварительная обработка изделий в 60-процентном растворе азотной кислоты в течение 30 с. В этом случае покрытие получается гладким, без наплывов, имеет хорошее сцепление с основным металлом. Качественные покрытия получают при пассивации изделий в течение 30–60 с, в 1–3 % растворе хромового ангидрида. Применение хромового ангидрида в промышленных условиях более целесообразно, чем применение азотной кислоты.

### ***Порядок проведения работы***

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями.
2. В муфельной печи приготавливается ванна с расплавленным алюминием. Температура нагрева 800 °С.
3. Готовятся 3–4 стальных образца из низкоуглеродистой стали согласно требованиям химико-термической обработки.

4. Образцы погружаются в ванну с расплавленным алюминием. С интервалом в 10 мин образцы поочередно извлекают.

5. Из полученных образцов готовятся микрошлифы и исследуются под микроскопом.

6. Сделать выводы о работе.

### *Содержание отчета*

1. Цель работы.

2. Оборудование, приборы и материалы.

3. Краткая характеристика процесса и основные теоретические сведения.

4. Результаты исследований.

5. Выводы по работе.

## Лабораторная работа № 8

### ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОГО ХРОМИРОВАНИЯ В ПОРОШКАХ ХРОМА

*Цель работы:* ознакомление с процессом диффузионного хромирования стали и сплавов; изучение микроструктуры диффузионного хромированного слоя.

*Приборы и материалы:* образцы порошковых смесей, применяемых для диффузионного хромирования, микрошлифы хромированных стальных образцов, микроскоп.

#### *Теоретические сведения*

Хромирование – это процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стали и сплавов хромом.

Хромированию подвергают изделия, работающие:

- в условиях износа и эрозии при низких и высоких температурах;
- под напряжением (или без него) при высоких криогенных температурах в средах, вызывающих химическую коррозию;
- под напряжением (или без него) в средах, вызывающих электрохимическую коррозию;
- на усталость – механическую, термическую, коррозионную;
- в условиях действия магнитных и электрических полей.

В зависимости от физико-химических характеристик активной фазы (или среды), содержащей хром, различают четыре вида диффузионного хромирования: твердый, из паровой фазы, газовый и жидкий.

Твердый метод применяют тогда, когда упругость паров насыщаемого металла при температуре процесса меньше, чем у хрома.

Этот метод осуществляется при контакте твердых кусочков (или порошка) хрома с поверхностью изделия. Поступление элемента на поверхность изделия происходит через места контактирования взаимодействующих металлов.

Хромирование из паровой фазы проводят двумя способами: контактным и неконтактным. Благодаря возможности передачи вещества через паровую фазу неконтактный способ целесообразнее, так как при этом образуется более качественное покрытие, хотя глубина насыщения меньше. Наличие вакуума в данном случае необязательно. Роль вакуума сводится лишь к облегчению испарения и переноса хрома к обрабатываемой поверхности.

Газовый метод хромирования основан на взаимодействии газовой фазы, которая содержит хром. В качестве активной газовой фазы служат различные галогениды хрома ( $\text{CrCl}_2$ ,  $\text{CrF}_2$ ,  $\text{CrI}_2$  и др.). Газовый метод осуществляют контактным и бесконтактным способами. При контактном способе газовая фаза, генерируясь в непосредственной близости от поверхности изделия, возникает в результате взаимодействия твердых фракций порошкообразного хрома с одним из галогидных газов ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HI}$ ,  $\text{HBr}$  и др.). При неконтактном способе изделия находятся в окружении одной только газовой фазы, содержащей галогенид хрома.

При жидком методе хромирования активной фазой, участвующей в передаче хрома к обрабатываемой поверхности, является расплав соли, содержащей хром, или расплав хрома. В первом случае на границе раздела металл – расплав соли происходит электрохимическая реакция, благодаря которой оказывается возможным процесс насыщения; во втором – насыщение осуществляется непосредственно из расплава жидкого металла.

Наибольшее распространение получили методы хромирования из паровой фазы (неконтактный) и газовый.

Хромирование из паровой фазы основано на явлении сублимации хрома при повышенных температурах. При  $917^\circ\text{C}$  хром испаряется, а при  $1157^\circ\text{C}$  он уже легко перегоняется.

Из-за малой упругости паров хрома процесс хромирования в паровой фазе протекает медленно. При проведении процесса в вакууме скорость его увеличивается. Вакуум не только предотвращает окисление изделий, но и способствует понижению температуры испарения хрома. В результате в рабочем пространстве повышается давление паров хрома, что интенсифицирует процесс хромирования. Значительное преимущество вакуумного способа – возможность хромирования легкоокисляющихся металлов, например титана, молибдена, вольфрама и др.

Метод хромирования из паровой фазы (за исключением вакуумного варианта) – наиболее простой и дешевый. Однако большая продолжительность и температура процесса, а также плохое качество поверхности, особенно после хромирования контактным способом, не позволяют рекомендовать его для хромирования ответственных изделий. Значительно успешнее этот метод можно использовать для хромирования тугоплавких сплавов, так как качество покрытия в этом случае оказывается высоким.

При вакуумном способе хромирования экономическая эффективность ниже (необходимо специальное оборудование), но поверхность получается более высокого качества. Преимуществом вакуумного способа является отсутствие необходимости в специальной хромирующей смеси, которая требуется, например, при газовом хромировании контактным способом. Однако вакуумный способ хромирования имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение: высокую температуру процесса, малую производительность, трудность обработки крупногабаритных и полых деталей, неравномерность прогрева и др.

При контактном способе газового хромирования обрабатываемые изделия помещают в специальные контейнеры, заполняемые газообразными соединениями хрома. Необходимую для хромирования газовую среду можно создавать или в специальных форкамерах-контейнерах, или в непосредственной близости от обрабатываемых изделий. При контактном способе обрабатываемые изделия помещают в контейнер с порошкообразной смесью, способной при нагреве генерировать газообразные соединения хрома.

На основе этих двух способов разработаны различные способы газового хромирования.

На практике наиболее применим контактный способ хромирования. Смесь при данном способе состоит из носителей хрома (хром, феррохром, хромистая руда, окись хрома и др.), веществ, предотвращающих спекание хромсодержащих частиц и прилипание их к поверхности изделий (окись алюминия, каолин, окись магния, песок, огнеупорная глина и др.), и солей, генерирующих при разложении и взаимодействии с хромсодержащими веществами активную газовую среду ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{Br}$ ,  $\text{NH}_4\text{I}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$  и др.).

Порошок хрома, феррохрома или другого хромирующего вещества должен иметь зернистость 16-12. В качестве хромирующего состава можно использовать смесь 50 % ( $\text{Fe} + 43\%$ ) + ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 70\%$ ) + ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). Процесс ведут при  $1050\text{ }^\circ\text{C}$  и выдержке 6 ч. В результате толщина хромированного слоя составляет в среднем на армко-железе 0,1 мм и на стали, содержащей 0,8 % С, 0,025–0,03 мм.

Благодаря хорошему качеству изделий после хромирования, отсутствию технических трудностей при проведении процесса, его экономичности, возможности использования печного оборудования описанный способ хромирования нашел наибольшее широкое распространение в промышленности.



### ***Порядок выполнения работы***

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями по вопросу диффузионного хромирования.
2. Изучить составы порошковых смесей, применяемых для диффузионного хромирования.
3. Используя готовый микрошлиф, изучить микроструктуру хромированного слоя.
4. Оформить отчет.

### ***Содержание отчета***

1. Цель работы.
2. Приборы и материалы.
3. Теоретические сведения.
4. Практическая часть.
5. Выводы по работе.

## Лабораторная работа № 9

### ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПОРОШКОВ

*Цель работы:* ознакомление с методикой определения свойств порошков; экспериментальное определение формы и размеров частиц порошка, изучение их геометрии.

*Приборы, оборудование и материалы:* порошки алюминия, олова, свинца, меди, железа, титана, цинка, никеля, кобальта, вольфрама, бронзы, латуни; микроскоп (металлографический или от микротвердомера ПМТ-3) с разрешающей способностью, обеспечивающей измерение габаритных размеров частиц порошка и изучение их формы.

#### *Теоретические сведения*

Металлические порошки получают путем механического измельчения (размола) твердого или распыления жидкого металла; физико-химическими методами, к которым относятся: восстановление окислов металлов газами или твердым восстановителем, электролизом водных растворов солей, карбонильным методом и др.

Металлические порошки характеризуются химическим составом, физическими и технологическими свойствами.

Химический состав порошков определяется содержанием в них основного элемента, легирующих веществ, примесей и газов в адсорбированном или растворенном состоянии и устанавливается стандартами, техническими условиями или подбирается в соответствии с требованиями, предъявляемыми к деталям и материалам.

Содержание основного металла или металлов (для сплавов) в порошках бывает, как правило, 98–99 %.

Содержание кислорода в пределах от 0,1 до 1 % в порошках железа, никеля, кобальта, меди, бронзы, молибдена, вольфрама, легированной стали, олова, свинца приблизительно определяют по потере массы при прокаливании в водороде по ГОСТ 18897–73. Содержание кислорода в железном порошке определяют также по ГОСТ 16412.6–80.

Потери массы при прокаливании в водороде вычисляют по формуле

$$x = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} 100\%, \quad (9.1)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  – соответственно масса лодочки, прокаленной до постоянной массы, с порошком перед испытанием и с порошком после испытания, г.

При содержании кислорода менее 0,2 % для определения его количества используют метод восстановления в потоке газа-носителя. Анализ производится, например, на приборах фирм «Леко», «Лейбольд-Хераус» (ФРГ) и некоторых других. В нашей стране для определения малых количеств кислорода разработан метод вакуумной экстракции. Указанные методы оценки содержания кислорода в порошковых материалах целесообразно применять при наличии трудно восстанавливаемых в водороде оксидов (например, хрома, алюминия, вольфрама и др.). При этом следует пользоваться рекомендациями предприятий – разработчиков и изготовителей соответствующих приборов, так как стандартные методики проведения такого рода анализов отсутствуют.

Влажность порошка при минимальном содержании влаги до 0,1 % определяют высушиванием навески порошка до установления постоянной массы в электрическом сушильном шкафу. Навеску порошка массой 10 г с погрешностью не более 0,002 г помещают в стаканчик для взвешивания, который предварительно высушивается до постоянной массы, закрывается крышкой и взвешивается. Порошок в стаканчике высушивают при температуре 100–105 °С в течение 2 ч при закрытой крышке, охлаждают и снова взвешивают. Затем сушку повторяют в течение 0,5 ч с целью контроля ее качества. Содержание влаги определяют по формуле

$$x = \frac{(m_1 - m_2)}{m_3}, \%, \quad (9.2)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – масса стаканчика с порошком соответственно до и после испытаний, г;  $m_3$  – масса навески порошка, г.

Полученное значение округляют до 0,01 %.

Содержание в металлических порошках влаги при ее количестве от 0,05 до 0,5 % определяют по СТ СЭВ 1560–79 методом электромет-

рического титрования. Метод основан на взаимодействии воды, отгоняемой инертным газом при температуре 200 °С из металлических порошков, с реактивом К. Фишера при электрометрическом титровании.

Физические свойства порошков – форма, размер и распределение частиц по фракциям (гранулометрический состав), удельная поверхность, пикнометрическая плотность, микротвердость. Как правило, они указываются в стандартах и технических условиях.

Форма частиц порошка, как правило, зависит от методов получения и обработки порошков. При следующих методах получения порошка она в большинстве случаев бывает:

- сферическая при распылении расплава с кристаллизацией частиц в свободном полете;
- губчатая при восстановлении оксидов;
- осколочная при измельчении в шаровой вращающейся мельнице;
- дендритная при электролизе водных растворов и расплавов солей;
- пластинчатая (чешуйчатая) при распылении расплава с кристаллизацией частиц на охлаждаемых поверхностях; разлом в вихревой мельнице;
- игольчатая при экстракции из расплава; конденсация из паровой фазы.

Форму частиц порошка определяют методами оптической и электронно-лучевой микроскопии при оценке проекций частиц.

Навеску порошка (5–7 г) с добавлением 1–2 капель диспергирующей жидкости (воды, парафинового масла, кедрового масла) помещают на предметное стекло и исследуют под микроскопом при соответствующем увеличении. Обычно определяют два фактора формы: фактор неравноосности частиц – отношение максимального и минимального наблюдаемых размеров частицы; фактор развитости поверхности – отношение квадрата наблюдаемого периметра частицы к занимаемой ею площади.

Оценку и сопоставление факторов для различных партий порошка проводят на основе классификации частотных распределений полученных значений.

Форма частиц порошка оказывает определяющее влияние на технологические свойства, а также на многие свойства порошковых материалов: плотность, проницаемость, прочность, однородность свойств и т. д.

Размер частиц порошка в сочетании с его другими свойствами определяет удельное давление при прессовании, необходимое для

достижения заданной пористости, усадку при спекании и механические свойства спеченных материалов.

Величина частиц порошков от 1 до 100 мкм определяется по ГОСТ 23402–78 (СТ СЭВ РС 5105–75) с помощью оптического микроскопа, форма частиц – по ГОСТ 25849–83, отбор и подготовка проб – в соответствии с требованиями ГОСТ 9721–79.

Прочную прессовку, сохраняющую заданную пористость после спекания, получают из порошка с определенными размерами частиц и набором их по крупности.

Порошок состоит из частиц с различными размерами. Для определения относительного содержания фракций порошка, различающихся по размерам частиц, проводят гранулометрический анализ с помощью набора сит (ситовый), разделением частиц порошка по массе при их осаждении в жидкости (седиментационный) или с помощью микроскопа.

Гранулометрический состав (количественное содержание частиц в определенных фракциях по отношению к общему количеству порошка) грубых и средних порошков определяют ситовым анализом в специальном приборе. Например, доля порошка, оставшаяся на сите с номером сетки 01 (плюсовая фракция), но прошедшая через более крупное сито 0125 (минусовая фракция), обозначается 0125+01. Номер сита указывает на размер его ячейки в долях мм, например, для номера сита 01 размер ячейки 0,1 мм.

Металлические порошки состоят из большого количества частиц размером от 0,5 до 500 мкм. Порошки с размерами частиц свыше 500 мкм называются гранулами. В зависимости от размера частиц порошки разделяются на ультратонкие (до 0,5 мкм), весьма тонкие (0,5–10 мкм), тонкие (10–40 мкм), средние (40–150 мкм) и грубые (150–500 мкм). Частицы могут быть плотными или пористыми. Окислы и поры в частицах снижают плотность металла, а газы, адсорбированные частицами, отрицательно влияют на качество готовых изделий.

Гранулометрический состав порошка определяется по ГОСТ 18318–73 методом просеивания пробы через набор сит, взвешивания отдельных фракций и расчета их процентного содержания. Используется комплект сит с сетками по ГОСТ 3584–73, устанавливаемый на встряхивающее устройство. Масса пробы порошка при насыпной плотности более  $1,5 \text{ г/см}^3$  составляет 100 г, менее  $1,5 \text{ г/см}^3$  – 50 г.

Содержание отдельной фракции рассчитывают с погрешностью не более 0,1 % по соотношению

$$x = \left( \frac{m_n}{m} \right) 100 \%, \quad (9.3)$$

где  $m_n$  – масса данной фракции, г;  $m$  – масса испытываемой пробы, г.

Результаты испытаний оформляются в виде таблицы или графика. Для каждого порошка испытания проводят не менее 2 раз.

Гранулометрический состав порошков с размером частиц от 0,5 до 40 мкм определяют по ГОСТ 22662–77 весовым методом седиментации и методом фотоседиментации.

По методу седиментации гранулометрический состав порошка оценивается по времени оседания частиц. Время оседания частицы в жидкости в соответствии с уравнением Стокса составляет:

$$t = \frac{18\eta h}{g(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}})^2 d}, \text{ с}, \quad (9.4)$$

где  $\eta$  – вязкость жидкости, г/см · с;  $h$  – высота оседания, см;  $g$  – ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{п}}$  – пикнометрическая (истинная) плотность порошка, определяемая при помощи мерных сосудов-пикнометров, см/с<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, см/с<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр частицы, см.

При фотоседиментационном методе скорость оседания частиц определяют по скорости изменения оптической плотности суспензии порошка, которую оценивают по фото-ЭДС или фототоку, возникающему в фотоэлементе от светового потока, прошедшего через суспензию.

Удельная поверхность порошка представляет собой суммарную поверхность всех частиц, составляющих его единицу массы или объема.

Удельная поверхность порошков определяется по ГОСТ 23401–78 по тепловой десорбции аргона или азота путем установления их количества, адсорбируемого из потока аргоно- или азотогелиевой смеси заданной концентрации при температуре жидкого азота и последующей десорбции их в ту же смесь при повышении температуры до  $20 \pm 5$  °С.

Значения удельной поверхности для различных порошков составляют от 0,01 до 10–20 м<sup>2</sup>/г. Величина удельной поверхности – одна из важнейших характеристик металлических порошков, определяющая активность протекания физико-химических процессов, происходящих при компактировании частиц, их спекании и др.

Удельная поверхность порошка определяется дисперсностью, формой и состоянием поверхности его частиц.

Микротвердость порошков характеризует их прессуемость и устанавливается по стандартной методике при небольших нагрузках (0,5–200 г).

Технологические свойства порошков характеризуются насыпной плотностью, текучестью, уплотняемостью, формуемостью и прессуемостью. Также к этим свойствам относят угол естественного откоса, образованный поверхностью конуса свободно насыпанного порошка и горизонтальной плоскостью в его основании, и плотность утряски, определяемая отношением массы порошка к величине его объема после утряски.

Насыпная плотность представляет собой массу единицы объема свободно насыпанного порошка. Она зависит от плотности укладки частиц порошка и обуславливается, в основном, размером частиц и их распределением по фракциям, а также формой частиц. Насыпная плотность определяется по ГОСТ 19440–74 с помощью волюмометра или воронки с калиброванным отверстием. Порошок засыпают в волюмометр сверху через воронку, под выходной воронкой устанавливают стакан объемом 25 см<sup>3</sup>. Насыпная плотность порошков, обладающих хорошей текучестью и самопроизвольно истекающих через отверстие заданного диаметра, может быть определена с помощью воронки с калиброванным отверстием диаметром 5 мм и стакана емкостью 25 см<sup>3</sup>. Насыпную плотность рассчитывают по формуле

$$\rho_n = \frac{(m_2 - m_1)}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (9.5)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – масса соответственно пустого стакана и стакана с порошком, г;  $V$  – объем стакана, см<sup>3</sup>.

Порошки с разветвленной формой частиц обладают меньшей насыпной плотностью. Для ее увеличения порошок подвергают обработке в шаровой мельнице или отжигу, в результате чего его частицы приобретают форму, близкую к сферической. Регулировать величину насыпной плотности можно также изменением режимов изготовления порошка, т. е. изменением температуры и длительности восстановления, продолжительности размола, параметров электролиза и т. д.

Плотность металлических порошков после утряски в мерном цилиндре определяется по ГОСТ 25279–82 (СТ СЭВ 2284–80). Утряска производится на приборе, обеспечивающем амплитуду вибрации 3,0 + 0,2 мм и частоту вибрации от 1,5 до 5 с<sup>-1</sup> (от 100 до 300 ударов в минуту) до тех пор, пока не прекратится изменение объема порошка. Плотность после утряски вычисляется по формуле

$$\rho_t = \frac{m}{V}, \quad (9.6)$$

где  $m$  – масса навески порошка, г;  $V$  – объем, занимаемый порошком после утряски, см<sup>3</sup>.

Испытание проводится 3 раза, затем подсчитывается среднее арифметическое, которое округляется до первого знака после запятой.

Насыпная плотность – важная характеристика порошка. Чем она меньше, тем больший объем порошка нужен для изготовления детали определенной величины. Объем и масса утряски являются другой объемной характеристикой порошка. Для определения объема утряски мензурку небольшого диаметра заполняют навеской порошка (20–50 г) и легким постукиванием ее о стол производят утряску до установления постоянного объема порошка. Определение объема утряски производится по делениям мензурки. Объем утряски является величиной, обратной массе утряски порошка.

Текучесть порошка – способность порошка к пересыпанию, которая зависит от трения, формы и размера частиц, влажности и содержания поглощения газа. Плохая текучесть замедляет и затрудняет равномерное заполнение пресс-формы порошком. Текучесть порошка  $\tau$  определяется массой порошка, вытекающего из отверстия за 1 с:

$$\tau = \frac{G}{t}, \quad (9.7)$$

где  $G$  – масса порции порошка, г;  $t$  – время вытекания порошка, с.

Текучесть определяется временем истечения из воронки порошка, самопроизвольно просыпающегося через калиброванное отверстие. Текучесть влияет на скорость и равномерность заполнения пресс-формы, т. е. на производительность и качество процесса прессования. Она зависит, главным образом, от размера частиц, их формы, состояния поверхности и внутреннего трения. Содержание в порошке большого количества мелких фракций, поглощение газа, а также высокая влажность ухудшают текучесть порошка. Для ее определения по ГОСТ 20899–75 порция порошка (50 г) засыпается в конусную воронку с углом 60° и диаметром отверстия 2,5 мм, которая открывается после заполнения. Текучесть порошка рассчитывается по формуле

$$\tau = kt, \quad (9.8)$$

где  $k$  – корректирующий коэффициент;  $t$  – время истечения порошка, с.



Корректирующий коэффициент воронки равен частному от деления величины 25,3 на число, указанное на клейме воронки, и может быть больше или меньше 1.

Повышают текучесть порошков теми же методами, что и насыпную плотность – применением отжига или изменением технологических режимов изготовления порошков.

Уплотняемость порошков показывает их способность к уменьшению занимаемого объема под воздействием давления или вибрации.

Уплотняемость и формуемость металлических порошков определяются по ГОСТ 25280–82 (СТ СЭВ 2286–80). Уплотняемость оценивается путем изучения плотности прессовок, изготовленных при заданных давлениях прессования в цилиндрической пресс-форме. Масса пробы порошка для испытаний – 300 г, диаметр рабочей полости пресс-формы – 11,3 мм. В качестве смазывающего вещества используется раствор стеариновокислого цинка в ацетоне (100 г стеариновокислого цинка на 1000 см<sup>3</sup> ацетона).

Массу навески порошка вычисляют по формуле

$$m = V\rho_k, \quad (9.9)$$

где  $V$  – объем прессовки, равный 1 см<sup>3</sup>;  $\rho_k$  – плотность материала порошка, г/см<sup>3</sup>.

Прессовки получают двухсторонним прессованием при давлениях 200, 400, 500, 600, 700, 800 МПа. При каждом давлении изготавливают три прессовки, плотность которых

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (9.10)$$

где  $m$  – масса прессовки, г;  $V$  – объем прессовки, см<sup>3</sup>.

За результат измерения принимают среднее арифметическое значение данных трех испытаний, округленное до второго десятичного знака. Уплотняемость порошка представляется в виде таблицы или диаграммы зависимости плотности прессовок от давления прессования.

Формуемость – способность порошка (прессовки) сохранять заданную форму после уплотнения при минимальном давлении. Она зависит в основном от формы и состояния поверхности частиц. Формуемость порошков оценивается интервалом значений плотности, при которых прессовки после извлечения из пресс-форм не осыпаются и не имеют расщелин. Масса пробы порошка для испытаний – не менее 200 г. Образцы прессуются в специальной пресс-форме, прессовки из которой

извлекаются после выталкивания матрицы из обоймы. Массу навески порошка для прессования образца вычисляют по формуле

$$m = 2,56\rho_k, \text{ г.} \quad (9.11)$$

Изготавливают три образца, которые подвергают осмотру с помощью лупы с двухкратным увеличением по ГОСТ 25706–83. Измеряют расстояние от торца прессовки меньшей высоты до ближайшего места, в котором наблюдается осыпание кромок или расслойные трещины. Определяют значения пористости по номограмме, при которых прессовка не осыпается ( $\Pi_1$ ) и не имеет расслойных трещин ( $\Pi_2$ ), а соответствующие значения плотности, округленные до первого знака после запятой, составляют:

$$\rho_1 = \rho_k (1 - \Pi_1); \quad (9.12)$$

$$\rho_2 = \rho_k (1 - \Pi_2). \quad (9.13)$$

Прессуемость порошка – способность образовывать под действием давления тело, имеющее заданные размеры, форму и плотность. Эта характеристика дает качественную оценку свойств порошка, комплексно связанную с уплотняемостью и формуемостью.

### ***Порядок проведения работы***

1. Пробы порошков до 2 г тщательно перемешивают, посыпают очень тонким слоем на бумагу и помещают на предметный стол микроскопа, или порошок вводят в одну-две капли воды на предметном стекле микроскопа. (Количество исследуемых порошков распределяется между студентами подгруппы.)

2. Исследуя порошки под микроскопом, визуально определяют частицы максимальных и минимальных размеров, из числа которых выбирают по пять частиц.

При наблюдении частиц определяются два габаритных размера для каждой частицы и эскизируется форма или контуры частиц.

### ***Содержание отчета***

1. Название и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты эскизирования формы частиц с габаритными размерами для каждой частицы.
4. Выводы.

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ПРЕССОВКИ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ

*Цель работы:* изучение методики теоретического определения зависимости между плотностью прессовки и давлением прессования.

*Оборудование, материалы, инструмент:* гидравлический пресс, пресс-форма, порошки меди или железа, микрометр, технические весы.

#### *Теоретические сведения*

В области теории прессования металлических порошков при выводе основного уравнения прессования, связывающего давление и плотность, существуют два основных направления.

Первое из них характеризуется введением целого ряда упрощающих допущений, которые позволяют решать ту или иную задачу элементарным путем, предлагая во многих случаях достаточно простые уравнения, описывающие рассматриваемый процесс с удовлетворяющей нужды практики степенью точности. Сюда входят теории прессования, основанные на использовании гипотезы сплошности, которая предполагает отсутствие разрывов в уплотняемой среде, т. е. ее непрерывность, что в целом противоречит представлениям о дискретном строении порошковых тел.

Второе направление характеризуется большей математической точностью и физической обоснованностью решения. Оно предлагает для описания процессов уплотнения весьма сложные зависимости и далеко не всегда приводит к результатам, которые могут быть использованы в инженерной практике. К этому направлению относятся теории, основанные на изучении контактных явлений, имеющих место при взаимодействии частиц.

Четко разграничить эти направления нельзя, так как они зачастую взаимно дополняют друг друга.

Первая, оказавшаяся весьма плодотворной, попытка разработки количественной зависимости плотности прессовки от давления прессования принадлежит М. Ю. Бальшину. Им были выведены уравнения:

$$\lg p = -L(\beta - 1) + \lg p_{\max}; \quad (10.1)$$

$$\text{или } \lg p = -m \lg \beta + \lg p_{\max}; \quad (10.2)$$

$$\text{или } \lg p = m \lg \vartheta + \lg p_{\max}, \quad (10.3)$$

где  $p$  – приложенное давление прессования;  $p_{\max}$  – давление прессования, обеспечивающее получение беспористой прессовки;  $L$  и  $m$  – постоянные, учитывающие природу прессуемого материала и называемые, соответственно, фактором и показателем прессования;  $\vartheta$  и  $\beta$  – соответственно относительная плотность и относительный объем прессовки.

$$\vartheta = \frac{\gamma}{\gamma_k}; \quad \beta = \frac{\gamma_k}{\gamma},$$

где  $\gamma$  – плотность прессовки;  $\gamma_k$  – плотность компактного материала прессовки.

Были сделаны следующие допущения:

1. Упрочнение при пластических деформациях материала в окрестностях контактной зоны отсутствует, что обуславливает постоянство контактного давления  $\sigma_k$ .

2. Закон Гука, выражающий зависимость между упругой деформацией и растягивающим или сжимающим нормальным напряжением в компактном металле, согласно которому бесконечно малое приращение деформации пропорционально бесконечно малому приращению напряжения, справедлив и для пластической деформации.

3. Материал частицы в зоне контакта постоянно находится в напряженном состоянии, близком к одноосному сжатию.

4. Деформирование компактного и порошкового материалов происходит идентично, что предполагает отсутствие межчастичной (структурной) деформации.

Фактор прессования  $L$  связан с величиной контактного давления  $\sigma_k$  зависимостью

$$L = 0,434 \left( \frac{K'}{\sigma_k} \right) \left( \frac{h_k}{h_0} \right),$$

где  $K'$  – постоянный коэффициент;  $h_k$  – приведенная высота прессовки, т. е. высота прессовки при плотности 100 %;  $h_0$  – первоначальная высота порошка в пресс-форме.

Следовательно, фактор прессования  $L$  может быть постоянным только при  $\sigma_k = \text{const}$ , так как  $h_k$  и  $h_0$  для взятой навески порошка

есть величины постоянные. На самом деле  $\sigma_k \neq \text{const}$  и растёт как за счет упрочнения материала в процессе прессования, так и вследствие изменения схемы напряженного состояния материала в окрестностях зоны контакта.

Предложив уравнение прессования, М. Ю. Бальшин отметил, что значения фактора прессования  $L$  существенно изменяются даже в не очень больших интервалах давления, в связи с чем попытки дать уравнение прессования с постоянными коэффициентами для всех порошков и во всем интервале давлений обречены на неудачу. Однако в ряде случаев можно получить уравнения с коэффициентами, более или менее постоянными в достаточно широком интервале давлений.

Для идеального процесса прессования при отсутствии внешнего трения формулы (10.2) и (10.3) примут вид:

$$\frac{P}{\beta^m} = p_{\max} = p_k = \text{const}^0; \quad (10.4)$$

$$\frac{P}{\vartheta^m} = p_{\max} = p_k = \text{const}, \quad (10.5)$$

где  $p_k$  – максимальное (критическое) давление прессования, соответствующее максимальному уплотнению и равное по величине давлению истечения, т. е. напряжению, при котором цилиндрический пуансон быстро погружается в испытуемый металлический образец; численно – это твердость материала при максимальной степени его упрочнения.

Величина показателя прессования характеризует свойства порошка и может быть определена опытным путем или ориентировочно по формуле

$$m = 2 + \frac{\vartheta}{\Delta\vartheta}, \quad (10.6)$$

где  $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$  – относительная плотность исходного порошкового тела до приложения нагрузки к нему, равная  $\vartheta_0 = \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\gamma_k}$ , где  $\gamma_{\text{нас}}$  – насыпная плотность порошка.

Для многих порошков железа и меди величины показателя прессования сохраняют примерно постоянное значение в довольно большом интервале давлений.

Для порошков олова электролитического, вольфрама восстановленного и некоторых других величина показателя прессования изменяется, возрастая с увеличением насыпной плотности порошка  $\gamma_{\text{нас}}$  и твердости исходного металла. Для любых металлических порошков  $m \geq 3$ .

Наиболее приемлемым для анализа поведения порошков при прессовании является уравнение (10.2), вывод которого может быть обоснован различными способами. В графической форме (когда  $\sigma_k = \text{const}$ ) оно дает прямую линию. Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс численно равен показателю прессования  $m$ , а отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, равен логарифму максимального давления прессования ( $p_{\text{max}}$ ) или в идеальном случае, т. е. при отсутствии потерь на трение в пресс-форме, он равен логарифму максимального критического давления  $p_k$ .

При прессовании различных материалов часто наблюдается отклонение от прямолинейной зависимости  $\lg \beta$  по  $\lg p$ . Если кривая имеет выпуклость вниз ( $\lg p$  растет быстрее, чем это соответствовало прямой линии), то следовательно в процессе прессования величина  $\sigma_k$  не остается постоянной. Она увеличивается с повышением  $p$  вследствие повышения твердости контактных участков в результате упрочнения и увеличения эффекта трения между частицами (в связи с увеличением размеров контактных участков), а также из-за усиления объемных напряжений, накапливающихся в частицах по мере их деформации. Когда наружные слои частиц порошка оказываются более твердыми, чем внутренние (из-за окисленности или по другим причинам), кривая  $\lg \beta$  по  $\lg p$  имеет выпуклость вверх (наблюдается замедление в росте  $\lg p$ ).

Давления для получения прессовок небольшой плотности из порошков с большой насыпной плотностью меньше, чем из более легких порошков. При увеличении степени уплотнения это различие уменьшается и при 100%-ной плотности ( $\beta = 1$ ) давления для одинаковых по химическому составу порошков с различной насыпной плотностью приблизительно одинаковы и равны давлению истечения соответствующего металла. Следовательно, такие физические характеристики, как величина и форма частиц, насыпная плотность, наклеп не оказывают прямого влияния на максимальное давление прессования, необходимое для получения прессовок 100%-ной плотности.

Однако на прессуемость физические характеристики порошка оказывают весьма сильное влияние. Для получения прессовки заданной плотности необходимое давление увеличивается вместе с дисперсностью порошка.

Уравнения прессования М. Ю. Бальшина не имеют физического смысла в начальный момент прессования и справедливы лишь для области средних и относительно высоких значений давлений прессования. Н. Ф. Кунин и Б. Д. Юрченко на основании опытных данных показали возможность описания процесса уплотнения через коэффициент прессования  $k$  :

$$k = \frac{d\gamma}{dp} = k_0 e^{-\alpha p}, \quad (10.7)$$

где  $k_0$  – начальный коэффициент прессования (при  $p = 0$ );  $\alpha$  – коэффициент потери сжимаемости, характеризующий относительное уменьшение при возрастании давления  $p$  на единицу.

Интегрирование уравнения (10.7) приводит к уравнению прессования вида:

$$\gamma = \gamma_{\text{пр}} - \left( \frac{k_0}{\alpha} \right) e^{-\alpha p}, \quad (10.8)$$

где  $\gamma_{\text{пр}}$  – условная предельная плотность материала при весьма большом давлении прессования, причем эта условная плотность выше теоретической плотности прессуемого материала.

Все три константы  $k_0$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma_{\text{пр}}$  характеризуют прессуемый порошок и должны быть найдены экспериментальным путем.

А. Н. Николаев, используя предположение, что при достаточно больших давлениях уплотнение материала происходит за счет истечения его в поры, предложил, по аналогии с известным уравнением, описывающим при обработке металла давлением процесс выдавливания из конического отверстия, следующую зависимость:

$$p = C \sigma_T \vartheta \lg \left( \frac{\vartheta}{1 - \vartheta} \right), \quad (10.9)$$

где  $C$  – коэффициент, определяемый экспериментально.

Уравнение (10.9) не имеет физического смысла при начальном и критическом краевых условиях прессования, так как  $p = 0$  лишь при

$\vartheta = 0,5$ , тогда как для большей части металлических порошков  $\vartheta \leq 0,5$ , а при  $\vartheta \rightarrow 1$  величина  $p \rightarrow \infty$ , тогда как в действительности  $p \rightarrow p_k$ .

Г. М. Жданович теоретически и экспериментально доказал, что простой и достаточно точной интерполяционной формулой уравнения прессования идеального процесса уплотнения (без учета влияния внешнего трения) может быть:

$$p = \frac{p_k (\vartheta^n - \vartheta_0^n)}{1 - \vartheta_0^n} = \frac{p_k (\beta_0^n - \beta^n)}{\beta^n (\beta_0^n - 1)}. \quad (10.10)$$

Величина показателя степени зависит от всех основных факторов (механических свойств материала порошка  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $p_k$ , коэффициента межчастичного трения, относительной плотности насыпки порошка  $\vartheta_0$ ), определяющих характер и особенности процесса прессования металлических порошков, а его среднее «интегральное» значение ориентировочно составляет:

$$n = 1 + \frac{2}{\Pi_0}, \quad \Pi_0 = 1 - \vartheta_0, \quad (10.11)$$

где  $\Pi_0$  – пористость порошка в состоянии насыпки.

Г. М. Жданович полагает, что между давлением идеального и реального процессов прессования существует зависимость вида:

– при одностороннем прессовании

$$p = p_0 (1 + 0,5A\beta); \quad (10.12)$$

– при двухстороннем прессовании равными давлениями

$$p = p_0 (1 + 0,25A\beta). \quad (10.13)$$

В выражениях (10.12) и (10.13)  $A$  – постоянная величина:

$$A = \frac{\xi f (L_h + L_b) h_k}{S_h}, \quad (10.14)$$

где  $L_h$ ,  $L_b$  – величины длин периметров или контуров соответственно наружной и внутренней (если прессовка с отверстиями) боковых поверхностей прессовки;  $f$  – коэффициент внешнего трения частиц по-



рошка о стенки пресс-формы (для медного порошка  $f = 0,24$ , для железного порошка  $f = 0,30$ );  $\xi$  – коэффициент бокового давления;  $h_k$  – приведенная высота прессовки, т. е. высота прессовки при условии ее прессования до компактного состояния;  $S_h$  – величина номинального сечения прессовки (в направлении прессования).

Величина  $h_k$  определяется по формуле

$$h_k = \frac{h_0 \cdot \gamma_{\text{нас}}}{\gamma_k}. \quad (10.15)$$

Величина  $\xi$  изменяется в пределах 0,2–0,5. Чем пластичнее металл, тем эта величина выше. Коэффициент  $\xi$  для некоторых металлов равен: для W – 0,2; для Fe – 0,39; для Sn – 0,49; для Cu – 0,54; для Pb – 0,79.

Коэффициент  $\xi$  не постоянен и растет с увеличением плотности, особенно для пластичных материалов. Он количественно определяется по формуле

$$\xi = \frac{\nu}{1 - \nu},$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

### ***Порядок проведения работы***

1. Определить насыпную плотность порошка  $\gamma_{\text{нас}}$  путем взвешивания свободно насыпанного порошка и определить его объем.

2. Провести прессование порошка в пресс-форме с фиксацией усилия прессования при максимальном нагружении  $p$ , уровня высоты засыпки порошка  $h_0$ . Определить плотность и относительную плотность прессовки. Определить показатель прессования  $m$  по формуле (10.6). Определить максимальное давление прессования  $p_k$  по формуле (10.4) или (10.5). Для меди  $\gamma_k = 8940$  кг/м<sup>3</sup>; для железа  $\gamma_k = 7870$  кг/м<sup>3</sup>.

3. Используя формулу (10.12), определить теоретическое значение давления прессования с использованием формул (10.10), (10.11), (10.14), (10.15), значение плотности прессовки из п. 2 и сравнить полученное значение  $p$  с экспериментальным, зафиксированным в п. 2.

4. Задаться двумя значениями давлений прессования меньшими, чем применяемое в п. 2, и провести расчет соответствующих плотностей прессовки по формуле (10.12), которые теоретически должны быть получены при прессовании с заданными усилиями.

5. Провести процесс прессования с заданными усилиями в п. 4. Определить полученную экспериментально плотность прессовки и сравнить с теоретическими значениями.

6. Сделать вывод о причине возникновения отклонений в величинах теоретических и экспериментальных значений.

### *Содержание отчета*

1. Назначение и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Порядок выполнения работы с результатами теоретических расчетов и экспериментальных измерений.
4. Выводы.

## Лабораторная работа № 11

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

*Цель работы:* ознакомление с технологическим процессом изготовления композиционного материала методом порошковой металлургии и исследование некоторых его закономерностей.

*Оборудование, инструмент, материалы:* гидравлический пресс, пресс-форма, печь для спекания, тигель для спекания, карбюризатор, мерные пробирки, технические весы, микрометр, порошки алюминия, меди, олова и графита.

#### *Теоретические сведения*

Порошковая металлургия – область техники, охватывающая совокупность методов изготовления порошков металлов и металлоподобных соединений, а также изделий из них путем компактирования и спекания без расплавления основного компонента.

Производство порошков и спеченных материалов из них начало развиваться в связи с необходимостью получения тугоплавких металлов (W, Mo, Ta и др.) и изготовления материалов и изделий со специфическими свойствами из смеси нескольких материалов, сплав которых нельзя получить обычной металлургией. Примерами таких изделий могут служить щетки электрических машин (Cu + графит), электроконтактные материалы (W + Cu, W + Ag), твердые спеченные сплавы на основе карбидов, керметы, состоящие из тугоплавких соединений и металлов при содержании тугоплавкой фазы более 50 % по объему, и другие материалы.

Порошковая металлургия является единственным методом изготовления металлических фильтров, пористых подшипников, контактных материалов на основе тугоплавких металлов и других изделий. Важным преимуществом метода порошковой металлургии является резкое снижение потерь металла при изготовлении изделий. Если при обычном изготовлении деталей методом литья с последующей станочной обработкой потери металла составляют 60 % и более, то при использовании данного метода потери не превышают 7–10 %.

Широкое применение порошковая металлургия нашла при изготовлении автомобильных деталей (шестерен, втулок, валиков и др.),

фасонных и других изделий из обычных материалов (Fe, Cu) и с достижением обычных свойств, но с более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с производством аналогичных деталей.

Особый интерес представляют антифрикционные порошковые композиционные материалы, из которых изготавливаются подшипники скольжения для работы в различных условиях трения. К таким материалам на металлической матрице относятся материалы на основе железа, меди, никеля, кобальта, алюминия. Матрица может состоять из комбинации данных основных материалов и иметь наполнители из других материалов, повышающих антифрикционные и прочностные характеристики композита. В частности, для трения со смазкой применяется композит со следующими компонентами в весовых процентах: Cu – 69,5 %, Pb – 29 %, Sn – 1 %, C – 0,5 %. Коэффициент трения такого материала со смазкой составляет 0,005 при хороших прочностных характеристиках. Для трения без смазки, т. е. в условиях самосмазывания можно отметить антифрикционный материал со следующими компонентами в объемных процентах: Al – 60 %, Cu – 10 %, Sn – 10 %, C – 1 %. Данный материал предложен в Японии и впервые упомянут в японском патенте № 7819. Трудностью, ограничивающей в известной степени масштабы производства, является сравнительно высокая стоимость исходных порошков и прессового инструмента.

Технология порошковой металлургии включает получение порошков, смешивание их (подготовка шихты), формование путем прессования (прокатки, экструзии,ковки), спекание и в некоторых случаях дополнительную обработку (пропитка маслами или металлами, химико-термическая, механическая обработка и др.) для придания изделиям специальных свойств.

Некоторые свойства порошков указаны в табл. 11.1.

*Подготовка порошков и расчет шихты.* Формованию заготовок деталей из порошка предшествует процесс подготовки, который заключается в классификации порошков по размерам, их смешивании и предварительной обработке. Предварительная обработка порошков (механическая, термическая и др.) производится с целью повышения пластичности, прессуемости и спекаемости порошков.

После просеивания на ситах или воздушной сепарации (для более мелких частиц) составляется смесь порошков нужного гранулометрического и химического состава. Полученную смесь (шихту) для получения однородного состава подвергают тщательному перемешиванию.

ванию в специальных барабанах, мельницах и других устройствах. Добавка к шихте спирта или дистиллированной воды (мокрое смешивание) способствует лучшему перемешиванию компонентов шихты.

Таблица 11.1

**Свойства некоторых порошков**

Порошки	Температура плавления, °С	Плотность компактного материала $\gamma_k$ , г/см <sup>3</sup>	Насыпная масса, г/см <sup>3</sup>
Оловянный	232	7,3	4,5
Алюминиевый	660	2,5–2,7	0,7–1,0
Вольфрамовый	3400	19,1	5,0–10,0
Графитовый	–	2,22	0,3–0,5
Железный	1530	7,8–7,85	1,5–2,5
Медный	1083	8,3–8,9	1,5–1,8
Никелевый	1450	8,8–8,9	1,8
Свинцовый	327	11,3–11,4	5,4–5,7

В процессе смешивания иногда вводят технологические присадки-пластификаторы, облегчающие процесс прессования (парафин, стеарин, глицерин, олеиновая кислота и др.), легкоплавкие присадки, активизирующие процесс спекания и летучие вещества, способствующие получению изделий с гарантированной пористостью. Полученную таким образом шихту дозируют по массе или объему. Дозу шихты, предназначенную для прессования, вычисляют по формулам:

$$G_n = \gamma_k V_d \left( 1 - \frac{\Pi}{100} \right) \mathfrak{R} \quad (11.1)$$

или

$$V_n = \frac{\gamma_k}{\gamma_n} V_d \left( 1 - \frac{\Pi}{100} \right) \mathfrak{R}, \quad (11.2)$$

где  $G_n$  – масса навески шихты, г;  $\gamma_k$  – плотность шихты в компактном состоянии, г/см<sup>3</sup>:

$$\gamma_k = \frac{1}{\frac{G_1}{\gamma_1} + \frac{G_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{G_n}{\gamma_n}}, \quad (11.3)$$

$G_i$  – весовое содержание компонентов в долях единицы;  $\gamma_i$  – плотность компонентов, г/см<sup>3</sup>;  $V_d$  – объем готовой детали, см<sup>3</sup>;  $\Pi$  – заданная пористость готовой детали, %;  $\mathfrak{K}$  – коэффициент потерь при прессовании и спекании ( $\mathfrak{K} = 1,04$ );  $V_n$  – насыпной объем, см<sup>3</sup>;  $\gamma_n$  – насыпная плотность шихты, г/см<sup>3</sup>.

*Прессование.* Заготовкам из порошка или волокна при помощи формования придают форму, размеры, плотность и механическую прочность, необходимые для последующего изготовления изделий.

Применение того или иного метода формования зависит от прессуемости порошков данного металла, формы и размеров получаемого изделия. Для изготовления, например, крупных заготовок (труб, стержней) из порошков тугоплавких металлов применяют гидростатический метод. Прокаткой порошков получают листы, полосы и ленты. Мелкие детали прессуют в стальных пресс-формах на гидравлических или механических прессах.

Процесс прессования производится следующим образом: сборка пресс-формы, дозировка и засыпка порошка в полость (матрицу) пресс-формы, прессование до заданной плотности и удаление спрессованного брикета из пресс-формы.

Сущность процесса прессования заключается в деформировании объема порошка обжатием, при котором происходит уменьшение первоначального объема. При прессовании большинства порошков наблюдается трехкратная степень обжатия.

Процесс деформирования сыпучего тела (порошка) сопровождается уменьшением первоначального объема, чем существенно отличается от процесса деформирования компактного материала, при котором его объем остается постоянным (изменяется только форма). На графике (рис. 11.1) показана кривая, выражающая зависимость относительной плотности в процентах от давления прессования. Как видно из графика, на первой стадии процесса (участок *а*) происходит интенсивное уплотнение порошка за счет перераспределения (свободного перемещения) частиц и более плотной их упаковки под действием внешних сил. По окончании первой стадии процесса получается максимально плотная упаковка частиц. При дальнейшем увеличении давления (участок *б*) порошок некоторое время не уплотняется, так как плотно упакованные частицы оказывают сопротивление сжатию. На третьей стадии процесса (участок *в*) давление прессования превышает сопротивление частиц сжатию, и уплотнение происходит за счет деформации частиц.

На практике наблюдается деформация отдельных частиц в начале процесса прессования, а скольжение некоторых частиц – при высоких давлениях (в конце уплотнения), т. е. стадии уплотнения как бы накладываются и протекают одновременно. В результате прессования металлического порошка в пресс-форме резко увеличивается контакт между частицами порошка и уменьшается пористость. Прочность полученной прессовки зависит от давления прессования формы, размера, состояния поверхности и пластичности частиц.

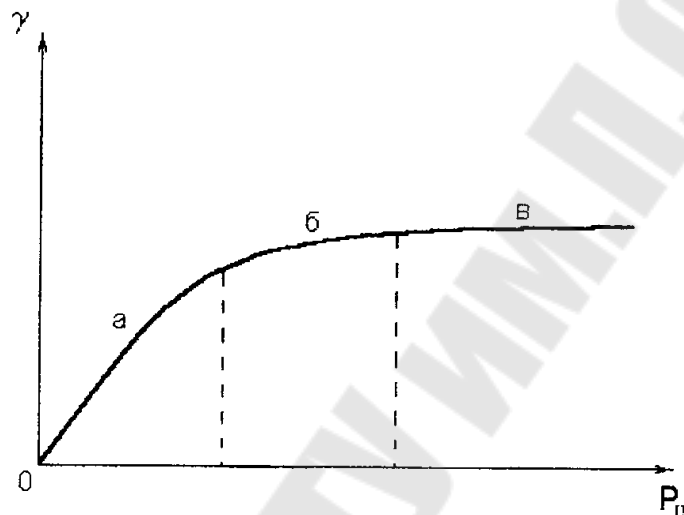


Рис. 11.1. Кривая процесса уплотнения порошка

Высоту матрицы пресс-формы принимают в зависимости от степени обжатия (отношение насыпного объема порошка к объему заготовки). Обычно высота матрицы в 3–3,5 раза больше высоты заготовки. Внутренний диаметр матрицы  $D$  равен внешнему диаметру заготовки  $D_n$  с учетом припуска на обработку (калибрование)  $k$ , допуска на размер изделия  $A$ , усадки при спекании  $\Delta p$  и упругого последействия  $S_d$ :

$$D = D_n \pm \frac{A}{2} - S_d + \Delta p + k, \text{ мм.} \quad (11.4)$$

Внешний диаметр матрицы пресс-формы рассчитывают в зависимости от давления прессования и прочности материала матрицы. Давление прессования колеблется в пределах 200–1000 МПа в зависимости от требуемой плотности заготовки, твердости порошка и других факторов. Давление прессования значительно снижается при вибрационном прессовании. Усилие пресса определяется по формуле

$$P = Fp, \quad (11.5)$$

где  $F$  – площадь пуансона,  $\text{см}^2$ ;  $P$  – давление прессования, МПа.

Усилие прессования контролируется по манометру гидравлического пресса. При прессовании частицы порошка находятся в условиях неравномерного объемного сжатия. Силы трения, возникающие между стенками пресс-формы и частицами порошка, способствуют уменьшению осевого давления, вследствие этого возникает неравномерное распределение плотности по высоте прессовки (уменьшается при одностороннем прессовании по направлению от верхнего пуансона к нижнему). Для уменьшения неравномерности распределения плотности применяют двухстороннее прессование, смазку стенок матрицы и пуансона и пр.

Силы трения порошка о стенки пресс-формы определяют усилие выпрессовывания прессовки из матрицы. Увеличение размеров прессовки происходит под воздействием упругих сил, освободившихся после снятия давления прессования. Такое расширение, называемое упругим последствием, учитывается при конструировании пресс-форм. Упругое последствие возрастает с повышением давления прессования, увеличением насыпной массы шихты, количества окислов и твердости частиц порошка (составляет 3 % по диаметру и 5–6 % по высоте прессовки).

Величина упругого последствия  $S_d$  определяется по формуле

$$S_d = \frac{d_1 - d_0}{d_0} 100, \%, \quad (11.6)$$

где  $d_0$  – первоначальный диаметр прессовки (в пресс-форме), мм;  $d_1$  – диаметр прессовки после извлечения ее из пресс-формы, мм.

Для определения относительной плотности и пористости полученной прессовки при помощи микрометра измеряют диаметр и высоту, а затем находят ее объем. Прессовка взвешивается на технических весах с точностью до 0,02 г и определяется ее плотность  $\lambda$ . Относительная плотность  $\vartheta$  и пористость  $\Pi$  вычисляются по формулам

$$\vartheta = \frac{\gamma}{\gamma_k}; \quad \Pi = (1 - \vartheta) 100 \%, \quad (11.7)$$

где  $\gamma_k$  – плотность компактного материала,  $\text{г}/\text{см}^3$  (см. формулу (11.3)).



Под пористостью понимают отношение объема пор к полному объему пористого тела.

*Спекание.* Это процесс развития межчастичного сцепления и формирования свойств материала, полученного нагревом сформированного или свободно насыпанного порошка или волокна без расплавления основного компонента. В процессе спекания происходит диффузия, рекристаллизация, восстановление окислов и другие процессы, между частицами образуются прочные межмолекулярные связи. В результате прессовка превращается в прочное твердое тело заданной плотности. Спекание проводят в инертной среде (аргон, гелий, вакуум) во избежание окисления металла или в присутствии восстановителей (водород, природный газ и др.) для устранения поверхностной оксидной пленки. Интервал температур спекания находится в пределах от 0,6 до 0,9 абсолютной температуры плавления  $t$  °С основного металла. Длительность спекания обычно не превышает 1–2 часов, но может колебаться в широких пределах.

При спекании обычно происходит повышение плотности прессовок и их усадка (уменьшение размеров по высоте и диаметру). Подбором гранулометрического состава порошка можно частично устранить усадочные явления. Ускорить процесс спекания можно различными методами – применением слегка окисленных прессовок, воздействием на них во время спекания ультразвуком, магнитным полем, введением в состав шихты легкоплавких добавок и др.

Спекание многокомпонентных систем (смесей порошков двух и более металлов) возможно без образования жидкой фазы (ни один из компонентов смеси не расплавляется) или с образованием ее. В последнем случае один или несколько компонентов расплавляется при спекании, но основа остается в твердом состоянии. Увеличение температуры и длительности процесса как при твердофазном, так и жидкофазном спекании приводит к уменьшению пористости, увеличению плотности и твердости, повышению механических свойств изделия.

Для спекания изделий применяются электрические печи сопротивления, индукционный нагрев или нагрев электрическим током, пропускаемым непосредственно через спекаемый порошок. Пористость спеченных прессовок определяется по формуле (11.7), где  $\gamma$  принимается для спеченного тела.

*Дополнительная обработка.* После спекания изделия часто подвергаются дополнительной обработке с целью дальнейшего повышения их физико-механических свойств. Наиболее часто применяется

допрессовывание с последующим спеканием для получения изделий с более высокой плотностью, прочностью и пластичностью. Пропитка смазками пористых изделий производится для улучшения антифрикционных свойств, так как присутствие масла в порах позволяет деталям «самосмазываться». Термическая (закалка, отжиг и др.) и химико-термическая (науглероживание, сульфидирование и др.) обработка применяется для улучшения физико-механических свойств и защиты от коррозии.

Точность размеров спеченных изделий достигает 5–7 классов точности и шероховатость поверхности до 4–5 классов чистоты. Калиброванием в специальных пресс-формах повышается точность размеров до 3–4 класса точности при шероховатости поверхности, достигающей 6–7 класса чистоты.

### ***Порядок проведения работы***

1. Приготовление компонентов порошковой шихты антифрикционного композиционного материала Al – 60 %, Cu – 10 %, Sn – 10 %, C – 20 % по объемным долям. Общий объем шихты указывает преподаватель.

2. Определение весовых долей компонентов шихты и их смешивание.

3. Прессование шихты в пресс-формах круглого или квадратного профиля с полным заполнением шихтой уровня насыпки матрицы пресс-формы с различными усилиями прессования.

4. Взвешивание полученных прессовок и определение их плотности  $\gamma$ .

5. Определение плотности компактного материала шихты  $\gamma_k$  по формуле (11.3). При этом используется деление по весовому содержанию компонентов шихты, а значения плотности компактных материалов компонентов шихты принимаются из табл. 11.1.

6. Определение пористости  $\Pi$  для полученных прессовок по формуле (11.7) с использованием полученных значений  $\gamma$  и  $\gamma_k$ .

7. Определение упругого последействия  $S_d$  по формуле (11.6) для каждой прессовки.

8. Построение графика зависимости пористости прессовки и упругого последействия от давления прессования  $p$ , определяемого по формуле (11.5).

9. Спекание прессовок в специальных тиглях под слоем карбюризатора, создающего защитную среду (углекислый газ) в печи при

температуре спекания 0,85 температуры плавления основного компонента шихты, продолжительностью 30 мин.

10. Определение усадки при спекании  $\Pi_D$  по зависимости

$$\Pi_D = \frac{\Delta V}{V_d} = \frac{V_d - V_c}{V_d},$$

где  $V_c$  – объем спеченной прессовки.

Определение пористости спеченных прессовок.

11. Построение графика зависимости усадки спекания от плотности неспеченной прессовки  $\Pi_D = f(\gamma)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Порядок проведения работы с результатами экспериментальных измерений и проведенных теоретических расчетов.
4. Оформление табл. 11.2 с исходными, расчетными и измеряемыми данными.
5. Построение требуемых графиков.
6. Выводы.

Таблица 11.2

### Результаты измерений

Но- мер опыта	Хими- ческий состав компо- зита, %	Давление прессова- ния $p$ , МПа	Упругое последейст- вие $S_d$ , %	Пористость образца $\Pi$ , %	Темпера- тура спекания, °С	Усадка при спе- кании $\Pi_D$
1						
2						
...						

## Лабораторная работа № 12

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО МАТЕРИАЛА

*Цель работы:* ознакомление с методикой изготовления твердого сплава ВК-ЗМ с изучением обрабатываемого материала на каждой стадии технологического процесса изготовления.

*Приборы и материалы:* порошковая шихта твердого сплава ВК-ЗМ, гранулированная смесь твердого сплава ВК-ЗМ, прессованная волока-заготовка из ВК-ЗМ, спеченная волока-заготовка из ВК-ЗМ, микроскоп, микрометр, твердомер НРС<sub>Э</sub>.

#### *Теоретические сведения*

Одним из важнейших и широко распространенных материалов, получаемых методом порошковой металлургии, является твердый сплав – гетерогенный керамико-металлический материал, характеризующийся комплексом высоких физико-механических свойств, особенно износостойкостью и высокой упругостью материала, и нашедший широкое применение в промышленности в качестве режущего инструмента. При получении твердых сплавов реализуются такие преимущества метода порошковой металлургии, как возможность получать композиционные материалы из компонентов с резко различной температурой плавления, возможность достижения уникального комплекса физико-механических свойств материала, а также применение безотходной технологии производства и повышение коэффициента использования металла.

#### *Назначение твердых сплавов*

Твердые сплавы (ТС) – керамико-металлические материалы, состоящие из карбидов тугоплавких металлов и пластичного связующего (металла и сплава) при содержании тугоплавкой фазы >50 % (объемн.). Современные ТС получают из высших карбидов тугоплавких металлов и металлов железной группы (железа, никеля, кобальта) спеканием в присутствии жидкой фазы.

Различают карбидовольфрамовые (WC–Co), титановольфрамовые (WC–TiC–Co), титанотанталовольфрамовые (WC–TiC–TaC–Co) и безвольфрамовые твердые сплавы.

В государственных стандартах вольфрамовые (вольфрамокобальтовые) сплавы обозначаются буквами ВК с прибавлением цифры,

обозначающей содержание кобальта, например ВК6. Титановольфрамовые твердые сплавы обозначаются буквами ТК. Марки сплавов в пределах группы также характеризуют содержание компонентов. Так, марка Т15К6 обозначает титановольфрамый сплав типа WC–TiC–Co, содержащий 15 % TiC, 6 % Co, остальное WC. В обозначение титанотанталовольфрамовых сплавов входят три буквы: ТТК, в остальном обозначение аналогично обозначению титановольфрамовых сплавов, например, ТТ17К12. Перечень всех марок, выпускающихся в настоящее время, можно найти в ГОСТ 3882–74.

Большая часть имеющихся твердых сплавов предназначена для обработки резанием нескольких тысяч видов материалов, в том числе: разнообразных чугунов, легированных, высоколегированных, коррозионностойких (нержавеющих), жаропрочных и специальных сталей и сплавов, цветных металлов и сплавов (латуни, бронзы, алюминиевых, магниевых, титановых сплавов), неметаллических сплавов, неметаллических материалов (пластмассы, фарфора, древесины) и композиций металл–пластмасса и металл–керамика.

Вольфрамкобальтовые твердые сплавы используются также для изготовления волок (фильер) – инструмента для волочения металлической проволоки, для изготовления различных направляющих элементов с высокой износостойкостью.

#### *Производство твердых сплавов*

Все технологические операции производства твердых сплавов характерны для порошковой металлургии. Порошки карбидов и кобальта смешивают при размоле в шаровых мельницах или в мельнице-мешалке (аттриторе). При этом добавляют соответствующие жидкости (воду, бензин, спирт) и пластификатор для гранулирования. Измельченную порошковую смесь карбидов (0,5–8 мкм) с кобальтом (1–3 мкм) либо предварительно прессуют, а затем гранулируют обкаткой в барабанах, либо подвергают распылительной сушке, в процессе которой образуются гранулы. Окончательное формование и спекание изделия осуществляют по трем вариантам.

1. *Обычная технология.* Гранулированный порошок прессуют и спрессованные изделия спекают в среде защитного газа или в вакууме. Температура спекания твердых сплавов WC–Co ниже температуры плавления Co. Квазибинарная диаграмма WC–Co системы W–C–Co имеет эвтектику. При температуре спекания (1400 °C) Co растворяет WC и образует жидкую фазу, которая способствует уплотнению (усадке) при спекании. Благодаря растворению в расплаве и осаждению происходит также рост зерен.

На Белорусском металлургическом заводе имеется производство твердосплавных волок из сплава ВК-ЗМ, служащих инструментом для волоочильного производства.

Технологический процесс изготовления твердосплавных волок включает следующие основные этапы:

- изготовление гранулированной смеси твердого сплава для лучшей прессуемости, заключающееся в смешивании раствора каучука на «нефрасе» с порошком смеси ВК-ЗМ, поставляемой в готовом виде для получения гранул сферической формы диаметром от 0,5 до 1,5 мм;

- прессование гранулированной смеси в пресс-форме с получением прессовки в виде «сырой» волоки-заготовки на специальном прессе в автоматическом режиме;

- предварительное спекание волок-заготовок в вакуумной печи с температурным режимом, обеспечивающим определенную закономерность нагрева до 800 °С, выдержку и охлаждение для удаления связующих примесей из твердого сплава;

- окончательное спекание волок-заготовок в вакуумной печи с температурным режимом, обеспечивающим определенную закономерность нагрева до температуры около 1370 °С, выдержку и охлаждение для проведения фазовых превращений и диффузионных процессов в твердом сплаве и получения его требуемых свойств;

- механическую обработку специальными процессами шлифования рабочей поверхности волоки, впрессованной в обойму, и получение готовой продукции.

2. *Другие варианты формования.* Порошок прессуют в заготовки и предварительно спекают при пониженной температуре, составляющей 60 % от температуры окончательного спекания. Полученные при этом полуфабрикаты можно механически обрабатывать (резать, шлифовать, сверлить) и изготавливать детали сложной формы. В заключение проводят чистовое спекание, аналогичное первому варианту обработки. Для изготовления крупногабаритных изделий из твердых сплавов (например, валков калибровочных, проволочных и штрипсовых станков) применяют изостатическое прессование. Такие изделия спекают в специальных вакуумных муфельных печах. Плотность изделий из твердых сплавов сложной формы с неблагоприятным отношением длины к диаметру после обычного прессования неравномерна. Этот недостаток устраняется в результате изостатического прессования. При этом исключается введение связок типа па-

рафина и гранулирование твердосплавного порошка. После изостатического прессования прочность заготовки достаточна для последующей обработки. В этом случае надобность в предварительном спекании отпадает. Нет необходимости также в удалении паров технологических связок.

*Горячее прессование.* Порошок твердого сплава прессуют в графитовых формах, которые одновременно нагревают до температуры спекания (при непосредственном прохождении тока или индукционным методом). Способ очень дорогой, его применяют только в случае, когда заготовка не должна иметь пор. Пористость готовых деталей можно уменьшить с помощью последующего горячего изостатического прессования, особенно когда речь идет о крупногабаритных фасонных деталях.

При изготовлении карбида вольфрама необходимо обращать внимание на безукоризненный баланс углерода в связи с относительно узкими границами стехиометрического состава, поскольку при спекании может выделяться хрупкая  $\eta$ -фаза ( $W_3Co_3C$ ), чем ухудшается качество твердого сплава.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Определение формы и среднего размера частиц, входящих в порошок ВК-ЗМ с помощью микроскопа.
2. Определение среднего размера и формы гранул порошка ВК-ЗМ, полученного путем смешивания порошка с раствором синтетического каучука на «нефрасе».
3. Определение объема и веса волокни-заготовки, спрессованной из гранул в пресс-форме.
4. Определение объема и веса волокни-заготовки, спеченной в вакууме при 1370 °С.
5. Расчет усадки при спекании  $P_D$ .
6. Определение твердости  $HRC_3$  спеченной заготовки волокни.

### ***Содержание отчета***

1. Название и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Порядок проведения работы с результатами измерений и расчетов.
4. Выводы.

## Литература

1. Балабанов, А. Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя / А. Н. Балабанов. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 464 с.
2. Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования перерабатывающих отраслей АПК : справочник / А. Н. Батищев [и др.]. – М. : Информагротех, 1997. – 288 с.
3. Белькевич, Б. А. Справочное пособие технолога машиностроительного завода / Б. А. Белькевич. – Минск : Беларусь, 1972. – 640 с.
4. Блантер, М. Е. Теория термической обработки : учеб. для вузов / М. Е. Блантер. – М. : Metallургия, 1984. – 328 с.
5. Болховитинов, Н. Ф. Metalловедение и термическая обработка стали / Н. Ф. Болховитинов. – М. : Машиностроение, 1965. – 500 с.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенок [и др.]. – М. : Metallургия, 1981. – 525 с.
7. Витязь, Л. А. Пористые порошковые материалы / Л. А. Витязь. – Минск : Высш. шк., 1987. – 265 с.
8. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов : учебник / И. И. Новиков. – 2-е изд. – М. : Metallургия, 1974. – 400 с.
9. Ворошнин, Л. Г. Боририрование промышленных сталей и чугунов : справоч. пособие / Л. Г. Ворошнин. – Минск : Беларусь, 1981. – 205 с.
10. Геллер, Ю. А. Metalловедение / Ю. А. Геллер. – М. : Metallургия, 1984. – 212 с.
11. Елютин, В. П. Высокотемпературные материалы / В. П. Елютин. – М. : Metallургия, 1972. – 264 с.
12. Ковшов, А. Н. Технология машиностроения / А. Н. Ковшов. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.
13. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
14. Композиционные материалы : в 8 т. / под ред. А. Браутмана, Р. Крок. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 2. – 364 с.
15. Ляхович, Л. С. Специальные стали : учеб. пособие / Л. С. Ляхович. – Минск : Высш. шк., 1985. – 206 с.
16. Махаринский, Е. И. Основы технологии машиностроения : учебник / Е. И. Махаринский. – Минск : Высшэйш. шк., 1997. – 423 с.
17. Metalловедение и термическая обработка стали : справочник : в 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна. – М. : Metallургия, 1991. – 460 с.



18. Мосталыгин, Г. П. Технология машиностроения / Г. П. Мосталыгин. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.

19. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1985. – 656 с.

20. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. / под ред. Дж. Любина ; пер. с англ. А. Б. Геллера [и др.] ; под ред. Б. Э. Геллера. – М. : Машиностроение, 1988. – 448 с.

21. Роман, О. В. Справочник по порошковой металлургии: порошки, материалы, процессы / О. В. Роман. – Минск : Беларусь, 1988. – 175 с.

## Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Определение точности механической обработки .....</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Определение количества проходов при обработке элементарных поверхностей .....</i>	<i>15</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование качества поверхности деталей машин .....</i>	<i>22</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Статистические методы исследования точности обработки .....</i>	<i>38</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Определение допусков на составляющие звенья сборочных единиц при различных методах достижения точности сборки .....</i>	<i>52</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Технология процесса оксидирования .....</i>	<i>80</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Технология процесса алитирования в ваннах с расплавленным алюминием .....</i>	<i>83</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Технология диффузионного хромирования в порошках хрома .....</i>	<i>86</i>
<i>Лабораторная работа № 9. Изучение геометрических характеристик, используемых в композиционных материалах порошков .....</i>	<i>90</i>
<i>Лабораторная работа № 10. Исследование зависимости плотности прессовки от давления прессования .....</i>	<i>99</i>
<i>Лабораторная работа № 11. Изучение процесса получения порошковых композиционных материалов на металлической матрице .....</i>	<i>107</i>
<i>Лабораторная работа № 12. Изучение процесса получения порошкового композиционного твердосплавного материала .....</i>	<i>116</i>
<i>Литература .....</i>	<i>120</i>

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Урбанович Александр Маркович**  
**Сарело Станислав Брониславович**  
**Швецов Александр Николаевич**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ ПРОКАТНОГО И ВОЛОЧИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Практикум**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**для студентов специальности 1-42 01 01**  
**«Металлургическое производство**  
**и материалобработка (по направлениям)»**  
**дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *И. П. Минина*

Подписано в печать 19.06.2018.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 7,21. Уч.-изд. л. 6,27.  
Изд. № 3.  
<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель