

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра металлорежущих станков и инструментов

Составители  
В. А. Коротков  
В. Г. Баштанов

## **ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ**

**Методические указания к лабораторным работам**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления  
подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств  
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2026

Рецензент:

Рябов С. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

**Коротков Виталий Александрович**

**Баштанов Вячеслав Геннадьевич**

**Шлифовальные инструменты** : методические указания к лабораторным работам для обучающихся направления подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств всех форм обучения / Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кафедра металлорежущих станков и инструментов ; составители : В. А. Коротков, В. Г. Баштанов. – Кемерово : КузГТУ, 2026. – 1 файл (3325 Кб). – Текст : электронный.

Приведен теоретический и практический материал, необходимый для успешного изучения дисциплины.

Назначение издания – помощь обучающимся в получении знаний в области шлифовальных инструментов и процессов шлифования.

© Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2026

© Коротков В. А., Баштанов В. Г.,  
составление, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 «Алмазно-абразивные шлифовальные инструменты»	4
Лабораторная работа №2 «Анализ характеристик импортных алмазно-абразивных шлифовальных инструментов»	18
Лабораторная работа №3 «Оценка твердости шлифовальных кругов»	24
Лабораторная работа №4 «Оценка прочности шлифовальных кругов»	29
Лабораторная работа №5 «Контроль неуравновешенности шлифовальных кругов»	39
Лабораторная работа №6 «Оценка режущей способности шлифовальных инструментов»	57
Лабораторная работа №7 «Притирка деталей»	66
Лабораторная работа №8 «Оценка режущей способности рабочих элементов лепестковых шлифовальных кругов»	75
Лабораторная работа №9 «Оценка работоспособности шлифовальных лент»	82
Лабораторная работа №10 «Принудительная обработка деталей в абразивной массе»	86
Лабораторная работа №11 «Вибрационная абразивная обработка деталей»	99
Лабораторная работа №12 «Испытание шлифовальных кругов на разрывную динамическую прочность»	117
Лабораторная работа №13 «Исследование эксплуатационных показателей моделей шлифовальных кругов и оценка износа единичных зерен в них при шлифовании»	124
Лабораторная работа №14 «Оценка гранулометрического состава абразивного материала»	130
Лабораторная работа №15 «Оценка разновидностей форм абразивных зерен»	139
Лабораторная работа №16 «Определение передних углов у единичных зерен алмазно-абразивных шлифовальных инструментов»	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	153

## Лабораторная работа №1

### АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научить студентов правильно идентифицировать и выбирать под заданные условия обработки характеристики абразивных и алмазных шлифовальных инструментов.

#### 2. ХАРАКТЕРИСТИКА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Как известно, под характеристикой шлифовального инструмента понимают ряд параметров, которые в совокупности отражают конструкцию и внутреннее строение инструмента, а также показывают область назначения и потенциальные возможности его применения. Характеристика инструмента отражается в его маркировке, т. е. в определенном наборе условных символов и цифр, которые непосредственно наносятся на нерабочей поверхности инструмента или приводятся в его сопроводительных документах. Например, характеристика абразивных шлифовальных кругов маркируется следующим образом:

Тип 1	200×20×76	14A	F60	N	7	V	35 м/с	A	1	ЧАПО
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

где 1 – форма шлифовального круга (Тип 1 – круг прямого профиля);

2 – 200×20×76 – размеры круга в миллиметрах ( $D \times H \times d$ , где  $D$  и  $d$  соответственно наружный диаметр и диаметр посадочного отверстия, а  $H$  – высота круга);

3 – марка абразивного материала (14A – нормальный электрокорунд);

4 – зернистость, т.е. средний номинальный размер шлифовальных зерен в данном инструменте в микрометрах: (F60 – зерна имеют средний размер 250 мкм или на длине 1 дюйм находится 60 ячеек сита этой зернистости);

5 – содержание основной фракции данной зернистости (N – содержание основной фракции 45 %);

6 – твердость шлифовального круга в условных единицах (N – твердость средняя, вторая);

7 – структура шлифовального круга, показывает процентное содержание зерен в объеме инструмента (7–48 % зерен в объеме инструмента);

8 – тип связки и ее разновидность внутри данного класса (V – керамическая связка № 5);

9 – допустимая скорость работы круга, м/с;

10 – класс точности круга (A – высокий класс точности);

11 – класс неуравновешенности круга, показывает в условных единицах допустимую неуравновешенную массу круга в граммах (1 – первый класс неуравновешенности);

12 – марка завода-изготовителя данного инструмента (ЧАПО – Челябинское абразивное производственное объединение).

Более подробно существующие разновидности параметров характеристики абразивных шлифовальных кругов и их условные обозначения представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ поз.	Наименование параметра характеристики	Условное обозначение параметра и его расшифровка
1	2	3
1.	Форма шлифовального круга (ГОСТ Р 52781–2007)	Тип 1 – прямой профиль; Тип 2 – кольцевой профиль; Тип 3 – конический; Тип 4 – двусторонний конический профиль; Тип 5 – плоский с выточкой; Тип 6 – чашечный цилиндрический; Тип 7 – плоский с двусторонней выточкой; Тип 11 – чашечный конический; Тип 12, 14 – тарельчатые
2.	Размеры круга (ГОСТ Р 52781–2007)	D×H×d (расшифровка – см. ранее в примере)
3.	Марка абразивного материала	13А, 14А, 15А, 16А – нормальный электрокорунд; 22А, 23А, 24А, 25А – белый электрокорунд; 33А, 34А – хромистый электрокорунд; 37А – титанистый электрокорунд; 38А – циркониевый электрокорунд; 43А, 44А, 45А – монокорунд; 91А, 92А, 93А, 94А – хромотитанистый электрокорунд; 53С, 54С – карбид кремния черный; 63С, 64С – карбид кремния зеленый

Продолжение табл. 1

1	2	3
4.	Зернистость (ГОСТ Р 52381–2005, ГОСТ 3647–80)	F4, F5, F6, F7, F8, F10, F12, F14, F16, F20, F22, F24, F30, F36, F40, F46, F54, F60, F70, F80, F90, F100, F120, F150, F180, F220 – шлифовальные порошки (размер – см. выше); M63, M50, M40, M28, M20, M14 – микропорошки (размер – номер зернистости $\times 1$ , мкм); M10, M7, M5 – тонкие микропорошки (размер аналогично предыдущему случаю)
5.	Твердость шлифовального круга (ГОСТ Р 52587–2006)	F, G – весьма мягкий; H, I, G – мягкий; K, L – среднемягкий; M, N – средний; O, P, Q – среднетвердый; R, S – твердый; T, U – весьма твердый; V, W, X, Y, Z – чрезвычайно твердый
6.	Структура шлифовального круга	1–60 % зерен в объеме инструмента; 2–58 % зерен в объеме инструмента; 3–56 % зерен в объеме инструмента; 4–54 % зерен в объеме инструмента; 5–52 % зерен в объеме инструмента; 6–50 % зерен в объеме инструмента; 7–48 % зерен в объеме инструмента; 8–46 % зерен в объеме инструмента; 9–44 % зерен в объеме инструмента; 10–42 % зерен в объеме инструмента; 11–40 % зерен в объеме инструмента; 12–38 % зерен в объеме инструмента; 1÷4 структуры именуются плотными, 5÷8 средними, 9÷12 открытыми

Продолжение табл. 1

1	2	3
7.	Тип связки (ГОСТ Р 52781–2007)	V – керамическая; Mg – магнезиальная; C – силикатная; B, BF – бакелитовая; R, RF – вулканитовая; M – металлическая; Gf – глифталева; ПФ – поливинилформалевая эпоксидная
8.	Допустимая скорость вращения круга	В 1,5 раза меньше скорости проверки круга на разрыв
9.	Класс точности круга (ГОСТ Р 52781–2007)	АА – особо высокого качества; А – высокого качества; Б – нормального качества
10.	Класс неуравновешенности круга (ГОСТ Р 52781–2007)	1 – соответствует классу точности АА; 2 – соответствует классу точности А; 3, 4 – соответствует классу точности Б
11.	Марка завода-изготовителя	ВАЗ – Волжский абразивный завод; ПАЗ – Приволжский абразивный завод; Луга – Лужский абразивный завод; ИАЗ – Иршавский абразивный завод; МЗШИ – Московский завод шлифовального инструмента; МАЗ – Московский абразивный завод; КАЗ – Косулинский абразивный завод

Характеристика алмазных и эльборовых шлифовальных кругов (отличие от абразивных) условно обозначается следующим образом:

1A1 150×10×32×5 АСО 160/100 75 В 40 м/с ТЗАИ,  
1 2 3 4 5 6 7 8,

где 1 – форма шлифовального круга;

2 – размеры круга и толщина алмазоносного слоя;

3 – марка зерна;

4 – зернистость;

5 – концентрация алмазов (или эльбора);

6 – тип связки;

7 – марка завода-изготовителя.

Наиболее распространенные разновидности параметров характеристики алмазных и эльборовых шлифовальных кругов приведены в табл. 2.

Таблица 2

№	Наименование параметра характеристики	Условное обозначение, расшифровка и краткое описание
1	2	3
1.	Форма круга (ГОСТ Р 53923–2010)	1A1, 14A1, 1A8, 14U1, 6A2, 9A3, 6A2T, 1A2T – плоские; 14EE1, 1EE1, 1E1, 1E6Q, 1D1.1V1, 1R1 – угловые; 1FF1, 1F1 – радиусные; 2A2 – кольцевые; 6A9 – чашечные цилиндрические; 12A2-450, 12V5-450, 12B2, 11V9, 11A2 – чашечные конические; 12A2-20°, 12V5-200, 12D9, 12R4, 4V9, 12R9 – рельечатые
2.	Размеры круга и алмазоносного слоя (ГОСТ Р 53923–2010)	$D \times H \times d \times S$ , где D – наружный диаметр круга; H – высота круга; d – диаметр посадочного отверстия; S – толщина алмазоносного (эльборового) слоя
3.	Марка зерен ГОСТ 9206–80 ГОСТ Р 52370–2005	A – алмаз естественный; AC – алмаз синтетический (разновидности – ACO, ACB, ACP, ACK, ACC); Л – эльбор (разновидности – ЛО, ЛП)
4.	Зернистость	Согласно ГОСТ 9206–80 и ГОСТ Р 52370–2005 зернистость алмазных и эльборовых шлифовальных кругов обозначают дробью, в которой числитель соответствует максимальному размеру зерен в данной фракции (мкм), а знаменатель – минимальному размеру. ГОСТ предусматривает широкий диапазон зернистостей: 400/250, 250/160, 160/100, 100/63, 63/40; Узкий диапазон зернистостей: 630/500, 500/400, 400/315, 315/250, 250/200, 200/160, 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50, 50/40, а также зернистости для микропорошков: 60/40, 40/28, 28/20, 20/14, 14/10, 10/7, 5/3, 3/2, 2/1, 1/0
5.	Концентрация алмазов (или эльбора)	Круги делают с концентрацией алмазных зерен в единице объема алмазоносного слоя 50 %, 75 %, 100 %, 150 % (за 100 %-ную концентрацию принято содержание 0,878 мг алмазных зерен в 1 мм <sup>3</sup> алмазоносного слоя или 25 % от объема)



Продолжение табл. 2

1	2	3
6.	Тип связки	В – бакелитовая; V – керамическая; М – металлическая; R – каучуковая вулканиловая
7.	Максимально допустимая рабочая скорость	Для инструментов из алмаза и эльбора максимальная рабочая скорость обычно варьируется в диапазоне 25–50 м/с
8.	Марка завода-изготовителя	ТЗАИ – Томилинский завод алмазного инструмента; МАЗ – Московский абразивный завод

Наряду с алмазно-абразивными кругами к шлифовальным инструментам относятся и находят достаточно широкое применение такие инструменты, как головки, бруски, сегменты, шкурки, ленты.

Шлифовальные головки предназначены преимущественно для обработки внутренних, труднодоступных и сложных по конфигурации поверхностей. Они имеют металлический стержень, служащий для крепления в патроне станка, на который приклеивается или напрессовывается собственно алмазная или абразивная головка. Характеристика головок маркируется в соответствии с ГОСТ Р 56578–2015 или ГОСТ 17122–85 следующим образом:

AW 30×50 24A F60 O 6 V A 35 м/с  
1 2 3 4 5 6 7 8 9,

где 1 – форма шлифовальной головки (наиболее распространенные разновидности формы головок отражены в табл. 3);

2 – размеры головки D×H (где D – диаметр головки, H – длина головки

3 – марка абразива (см. табл. 1, поз. 3);

4 – зернистость (см. табл. 1, поз. 4);

5 – твердость головки (см. табл. 1, поз. 5);

6 – структура головки (см. табл. 1, поз. 6);

7 – тип связки (см. табл. 1, поз. 7);

8 – класс точности головки (см. табл. 1, поз. 9);

9 – допустимая рабочая скорость головки.

Таблица 3

№	Обозначение	Наименование головок
1.	AW	Цилиндрические
2.	DW	Угловые
3.	EW	Конические с углом конуса 60°
4.	KW	Конические с закругленной вершиной
5.	F-2W	Шаровые

Шлифовальные бруски предназначены для ручной обработки различных изделий, заточки столярного и хозяйственного инструмента, а также для суперфиниширования и хонингования. Их характеристика маркируется по ГОСТ 33514–2015, например, так:

5410 20×25×100 63C F220 N 7 B A  
1 2 3 4 5 6 7 8,

где 1 – форма бруска (расшифровка обозначений форм брусков приведена в табл. 4);

2 – размеры бруска (В×Н×L, где В – ширина, Н – высота, L – длина бруска, мм);

3 – марка абразива (см. табл. 1, поз. 3);

4 – зернистость и содержание основной фракции (см. табл. 1, поз. 4 и 5);

5 – твердость бруска (см. табл. 1, поз. 6);

6 – структура бруска (см. табл. 1, поз. 7);

7 – тип связки (см. табл. 1, поз. 8);

8 – класс точности (см. табл. 1, поз. 10).

Таблица 4

Разновидности форм шлифовальных брусков

№	Обозначение	Наименование брусков
1.	5410	Прямоугольные
2.	5411	Квадратные
3.	9020	Треугольные
4.	9030	Круглые
5.	9040	Полукруглые

Шлифовальные сегменты предназначены для изготовления сборных инструментов, где они крепятся в специальном корпусе и образуют составную режущую поверхность. Сегменты маркируются по ГОСТ 33534–2015 следующим образом:

3109 60×20×200 14A F46 M 6 B A  
1 2 3 4 5 6 7 8,

где 1 – форма сегмента (разновидности форм сегментов приведены в табл. 5);

2 – размеры сегмента В×Н×L, мм;

3 – марка абразива;

4 – зернистость и содержание основной фракции;

5 – твердость;

6 – номер структуры;

7 – тип связки;

8 – класс точности.

Все указанные позиции (кроме поз. 1) расшифровывается, так же как и в предыдущих случаях (см. табл. 1).

Таблица 5

## Разновидности шлифовальных сегментов

№	Обозначение	Наименование сегментов
1.	3109	Трапецевидные
2.	3110	Плоские
3.	3105	Выпукло-плоские
4.	3120	Цилиндрические
5.	3104	Выпукло-вогнутые
6.	3101	Прямоугольные

Шлифовальные шкурки предназначены для ручной, а ленты - для машинной обработки сложных криволинейных поверхностей с переменной кривизной образующих и возможным наличием произвольно расположенных выступов, впадин и пр.

Пример маркировки шкурки по ГОСТ 6456–82:

Шкурка 1Э 100×200 П2 15А Р60 М А,  
                   1                  2                  3 4                  5 6 7

где 1 – вид шкурки (неводостойкая шкурка с электростатическим способом нанесения зерен);

2 – размер шкурки В×L, мм;

3 – вид основы шкурки (бумажная основа);

4 – марка абразива (см. табл. 1, поз. 3);

5 – зернистость абразива (см. табл. 1, поз. 4);

6 – вид связки (мездровый клей);

7 – класс точности.

Пример обозначения ленты по ГОСТ 5009–82:

ЛБ 200×1000 15А Р60 А У2Г Б  
                   1                  2                  3 4                  5 6 7,

где 1 – вид ленты (бесконечная);

2 – размеры ленты В×L, мм;

3 – марка абразива (см. табл. 1, поз. 3);

4 – зернистость абразива (см. табл. 1, поз. 4);

5 – класс точности шкурки, из которой сделана лента;

6 – вид основы ленты (саржевая основа марки У2Г);

7 – класс точности ленты.

### 3. ВЫБОР ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПОД ЗАДАННЫЕ УСЛОВИЯ ОБРАБОТКИ

При выборе шлифовальных инструментов под заданные условия и требуемый результат обработки принимают во внимание следующие основные рекомендации:

1. Разновидность шлифовальных инструментов, их форму и размеры выбирают в результате анализа чертежа обрабатываемой детали и ряда соответствующих инженерных и конструктивных соображений (см. предыдущий раздел).

2. Марка алмазно-абразивного материала выбирается на основе рекомендаций, представленных в табл. 6.

Таблица 6

Рекомендации по выбору алмазно-абразивного материала

№	Абразивный материал	Примечание
1	2	3
1.	Алмаз (А, АС)	Шлифование; заточка; доводка твердых сплавов; правка шлифкругов; обработка стекла, керамики, фарфора; заточка лезвий инструментов, обработка цветных металлов и сплавов
2.	Эльбор (ЛО, ЛП, ЛКВ)	Окончательная обработка высокоточных заготовок из инструментальных и труднообрабатываемых материалов
3.	Нормальный электрокорунд (10А÷19А)	Шлифование (черновое, обдирочное) стальных заготовок кругами на органических и неорганических связках
4.	Белый электрокорунд (20А÷29А)	Шлифование (окончательное) стальных закаленных заготовок на органических и (преимущественно) неорганических связках
5.	Хромистый электрокорунд (32А, 33А, 34А)	Шлифование изделий из конструкционных и углеродистых сталей с повышенной производительностью на различных связках
6.	Титанистый электрокорунд (37А)	Скоростное шлифование стальных заготовок кругами на керамической и бакелитовой связках
7.	Циркониевый электрокорунд (38А)	Силовое, обдирочное шлифование стальных заготовок на бакелитовой связке при высоких скоростях и подачах
8.	Монокорунд (43А, 44А, 45А)	Шлифование и заточка труднообрабатываемых сталей и сплавов кругами на керамических связках

1	2	3
9.	Хромотитанистый электрокорунд (91А, 92А, 93А, 94А)	Электрокорунды 91А и 92А аналогичны применению белого электрокорунда, а 93А, 94А – нормального электрокорунда
9.	Хромотитанистый электрокорунд (91А ... 94А)	Электрокорунды 91А и 92А аналогичны применению белого электрокорунда, а 93А, 94А – нормального электрокорунда
10.	Карбид кремния черный (52С, 53С, 54С)	Обработка заготовок из чугуна, цветных металлов, твердых сплавов, гранита, мрамора шлифовальными инструментами, а также свободными абразивами
11.	Карбид кремния зеленый (62С, 63С, 64С)	Обработка титановых и твердых сплавов, чугуна, алюминия, меди, гранита, мрамора инструментами на всех связках и свободным абразивом

3. Зернистость выбирают, исходя из требований по шероховатости производительности шлифования. Чем меньшую шероховатость требуется получить на обрабатываемой поверхности, тем меньший номер зернистости следует выбирать. Производительность шлифования, наоборот, можно повысить, увеличив номер зернистости.

4. Содержание основной фракции данной зернистости является показателем качества абразива. При шлифовании с повышенными требованиями к качеству обработки целесообразно выбирать инструменты с более высоким содержанием зерен основной фракции.

5. Структуру шлифовального инструмента выбирают, пользуясь следующим обобщенным правилом: чем тверже обрабатываемый материал, тем мягче должна быть твердость инструмента и наоборот.

6. Структуру инструмента выбирают, имея в виду, что чем меньше номер структуры, тем большее число зерен приходится на единицу режущей поверхности инструмента. Поэтому закрытые структуры применяют при профильном шлифовании, где необходимо сохранять заданный профиль инструмента, средние - при круглом, бесцентровом и плоском шлифовании, а открытые - при заточке инструментов.

7. Тип связки влияет на допустимую температуру, скорость, производительность и качество шлифования, а также прочность инструмента. Основные рекомендации по выбору той или иной связки отражены в табл. 7.

8. Класс точности и неуравновешенности инструментов выбирают исходя из требований по точности и качеству обработки. При этом следует помнить, что классы точности (АА, А, Б) имеют подробное описание в ГОСТ Р 52781–2007, где, в частности, для каждого из них указаны предельные отклонения для наружного диаметра, высоты, диаметра посадочного отверстия,

непараллельности, выпуклости и вогнутости торцевых поверхностей и пр. Следует также иметь в виду, что стоимость инструмента с более высоким классом точности всегда выше и ее необоснованное завышение скажется на себестоимости обработки изделий.

Класс неуравновешенности непосредственно связан с классом точности инструментов (см. табл. 1) и поэтому определяется выбором последнего.

Таблица 7

## Рекомендации по выбору связок

№	Связки	Рекомендуемая область применения
1	2	3
1.	Керамическая	Для большинства видов шлифования и разновидностей абразивных инструментов, за исключением обдирки, отрезки и прорезки узких пазов
2.	Магнезиальная и силикатная	Для инструментов, используемых в основном для шлифования труднообрабатываемых вязких сталей в тех случаях, когда требуется высокая самозатачиваемость инструмента без высоких требований к шероховатости обрабатываемой поверхности
3.	Металлическая	Используется преимущественно при производстве инструментов из алмазов и сверхтвердых материалов, т. к. высокая прочность и малая пористость этой связки не позволяют применять ее с другими, менее твердыми абразивами вследствие того, что инструмент в этом случае не самозатачивается
4.	Бакелитовая	Применяют для изготовления инструмента, предназначенного по большей части для операций обдирочного шлифования, отрезки и прорезки пазов, т. е. там, где предполагается сьем большого количества металла в единицу времени
5.	Вулканитовая	Подразделяется на эластичную и жесткую связки. Первая разновидность применяется в инструментах, используемых для полирования отделочных операций, вторая – для отрезки, прорезки пазов, бесцентрового шлифования (ведущие круги)
6.	Глифталева	По своим свойствам эта связка подобна бакелитовой, но превосходит ее по некоторым показателям. Поэтому область ее применения включает чистовое и отделочное шлифование
7.	Мездровый, казеиновый клей, жидкое стекло, синтетические смолы и лаки	Шлифовальные шкурки, ленты и полировальные диски

9. Скорость шлифования выбирают исходя из рекомендаций по выбору режимов резания для выбранной схемы шлифования и используемой разновидности шлифовального инструмента с учетом марки обрабатываемого материала. При этом следует помнить, что выбранная скорость шлифования не должна превосходить допустимую скорость вращения взятого инструмента.

Рекомендуемые диапазоны скоростей шлифования для абразивных и алмазных кругов отражены соответственно в табл. 8 и табл. 9.

Таблица 8

**Рекомендуемые диапазоны скоростей шлифования  
для абразивных кругов (на керамической связке)**

Схема шлифования	Обрабатываемый материал	Скорость шлифования, м/с
Круглое наружное	Цементуемые стали	32–50
Внутреннее	Цементуемые стали	25–35
Круглое бесцентровое	Автоматные стали	32–45
Круглое бесцентровое	Конструкционные стали	27–45
Плоское, круглое, фасонное	Быстрорежущие стали	26–35
Внутреннее	Быстрорежущие стали	15–20
Круглое, фасонное, внутреннее	Чугун	30–50
Фасонное	Жаропрочные и титановые сплавы	35–50

Таблица 9

**Рекомендуемые диапазоны скоростей шлифования  
для алмазных кругов**

Схема шлифования	Обрабатываемый материал	Связка круга	Скорость шлифования, м/с
Плоское	Твердые сплавы	Металлическая	25–35
Плоское	Твердые сплавы	Органическая	25–30
Круглое наружное	Твердые сплавы	Металлическая	25–35
Круглое наружное	Твердые сплавы	Органическая	25–30
Внутреннее	Твердые сплавы	Металлическая	15–20
Внутреннее	Твердые сплавы	Органическая	20–25
Заточка режущих инструментов	Твердые сплавы	Металлическая	15–20
Заточка режущих инструментов	Твердые сплавы	Органическая	20–25
Плоское	Легированные стали	Органическая	30–40
Круглое	Легированные стали	Органическая	30–50
Заточка	Легированные стали	Органическая	30–40

Оценка эффективности шлифования может осуществляться по различным критериям. Основными из них являются коэффициент шлифования и качество обработки. Коэффициент шлифования – это отношение массы (или объема) снятого обрабатываемого материала к массе (или объему) израсходованного рабочего слоя абразивного инструмента. В некоторых случаях вместо коэффициента шлифования (или наряду с ним) пользуются критерием режущей способности абразивного инструмента (масса или объем снятого обрабатываемого материала за определенное время обработки) и расходом или стойкостью инструмента (соответственно масса или объем израсходованного абразива за некоторое время шлифования; время работы инструмента до полного износа).

Качество шлифования оценивают по шероховатости обрабатываемой поверхности, классу точности, а также по наличию прижогов и шлифовальных трещин

#### **4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Получить у преподавателя одну из разновидностей шлифовального инструмента (круг, брусок, сегмент, шкурку) и дать полную письменную расшифровку характеристики этого инструмента, пользуясь сведениями из раздела 2.

2. Под сформулированные преподавателем условия обработки подобрать соответствующую характеристику шлифовального инструмента, опираясь на данные, приведенные в разделе 3.

#### **5. ОБОРУДОВАНИЕ**

Произвольный набор шлифовальных кругов, брусков, сегментов и лент с различными характеристиками.

#### **6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет должен содержать:

1. Эскиз шлифовального инструмента, выданного преподавателем, с поэтапной письменной расшифровкой его характеристики.

2. Подобранные компоненты характеристики шлифовального инструмента под условия обработки, сформулированные преподавателем.

#### **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Перечислить составные компоненты характеристики абразивного шлифовального круга.

2. Назвать компоненты характеристики алмазного шлифовального круга.

3. Что входит в понятие характеристики брусков и сегментов?



4. Как обозначаются характеристика шлифовальных шкурок и лент?
5. Перечислить инженерные и конструктивные соображения, на основе которых осуществляется выбор шлифовального инструмента под заданные условия обработки.

## **8. СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с характеристиками шлифовальных инструментов зарубежных фирм-производителей [1, 2] – 0,75 ч.
2. Подобрать характеристику импортного шлифовального инструмента под заданные условия обработки (по заданию преподавателя)– 0,75 ч.
3. Подготовиться к защите лабораторной работы. – 0,5 ч.

## Лабораторная работа №2

### АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПОРТНЫХ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить состав и обозначение компонентов, входящих в понятие характеристики импортных шлифовальных инструментов (на примере отрезных кругов). А именно: особенности обозначения размеров круга, разновидности марок используемых абразивных материалов, номера зернистостей (по стандарту FEPA), твердость круга, типы связок, наличие упрочняющих элементов и допустимые рабочие скорости круга. В связи с тем, что доля применения импортных шлифовальных кругов непрерывно возрастает в общем объеме используемых при металлообработке инструментов, то представляется важным и необходимым знать, что стоит в их обозначении и что следует под этим понимать. В этом случае появляется гарантия правильного и наиболее эффективного применения импортных инструментов в отечественной металлообрабатывающей промышленности.

#### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Под понятием характеристики шлифовального круга понимается перечень параметров, отражающих тип, размеры, состав, внутреннее строение и допустимые условия эксплуатации этого инструмента.

Ниже, в виде примера, представлена характеристика абразивного отрезного шлифовального круга по стандарту DIN 8589 (Германия), с расшифровкой и комментариями по ее каждому составному компоненту. В конце приведено описание маркировок характеристик алмазных отрезных кругов импортного производства.

Маркировка по стандарту DIN 8589

180×2,5×22 (7"×3/32"×7/8")	A 30 U-B F 80 m/s max Metall, Guss
<div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <span>1</span> <span>2</span> <span>3</span> <span>4</span> <span>5</span> <span>6</span> <span>7</span> <span>8</span> <span>9</span> </div>	

1 – размеры круга, мм (наружный диаметр × высота круга × диаметр посадочного отверстия);

2 – размеры круга, дюйм;

3 – марка абразивного материала: А – электрокорунд (для обработки металлов), С – карбид кремния (для обработки неметаллов), АС – смесь электрокорунда и карбида кремния (для обработки металлов и неметаллов), ЗА – циркониевый электрокорунд (для обработки легированных сталей, чугунов).

Следует отметить, что ряд фирм пользуются не общепринятыми, а своими обозначениями марок абразивных материалов. Некоторые из обозначений, используемых ведущими фирмами, представлены в табл. 1 [1, с. 355].

Таблица 1

**Обозначения абразивных материалов по ГОСТ  
и некоторыми зарубежными фирмами**

Назначение	Нормальный электрокорунд	Белый электрокорунд	Хромистый электрокорунд	Хромотитанистый электрокорунд	Циркониевый электрокорунд	Карбид кремния черный	Карбид кремния зеленый
Обозначение							
1	2	3	4	5	6	7	8
по ГОСТ	13А–15А	24А, 25А	34А, 37А	91А–34А	38А	53С–55С	62С–64С
Norton (США)	А, 44А, 57А	38А	25А	–	68А, 66А, ZS, ZF, NZ	37С	39С
National (США)	А	SA, PA, AA, BA	–	–	4А, 5А, 6А	С	6С
AVCO (США)	А	9А, 3А, 7А	5А	–	FA, TA, 15А	С	1С
Universal Grinding wheel Co (Англия)	А	WA	–	–	–	BC	С
Meulex Rex (Франция)	А	44А	–	–	–	55С	66С
Durrschmidt (Франция)	А	99А	–	50А	–	С	4С
Efesis (Германия)	11, 13, 14, 22	21, 22	–	26	16	32	31
Feldmuhle (Германия)	NK	EK <sub>w</sub>	–	SK2	SK21	SC <sub>s</sub>	SC <sub>g</sub>
МАВ (Италия)	А, 5А	9А, 11А	–	–	–	4С	6С, 8С
SIMAT (Италия)	А	WA	–	–	–	С	CW
Tyrolit (Австрия)	А, 10А	89А	–	–	14А, 22А, 115А	1С	С

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Duchateau (Австрия)	A	WA, SA	–	26A	5A	C	CV
Kure (Япония)	A	WA	–	PW	–	C	GC
Toho (Япония)	A	WA	–	–	–	C	GC
Showa (Япония)	A-40, TA	WA	–	–	–	C	GC
Slip Naxos (Швеция)	21A	41A, 43A	–	–	–	11C	15C

4 – зернистость (по стандарту FEPA 32GB 1971).

FEPA – Европейская организация изготовителей абразивов.

Для отрезных кругов чаще всего используют следующие номера зернистостей по FEPA: 16, 24, 30, 35, 46, 60.

Соответствие номеров зернистостей по FEPA и ГОСТ 3647–80 приведено в табл. 2.

Таблица 2

Соответствие номеров зернистостей по FEPA и ГОСТ 3647–80

Номер зернистости по ГОСТ	Размер зерен по ГОСТ, мкм	Номер зернистости по FEPA	Размер зерен по FEPA, мкм
200	2000–2500	10	2000–2360
160	1600–2000	12	1700–2000
125	1250–1600	16	1180–1400
100	1000–1250	20	1000–1180
80	800–1000	22	850–1000
63	630–800	24	710–850
50	500–630	36	500–600
40	400–500	40	425–500
32	315–400	54	300–355
25	250–315	60	250–300
20	200–250	70	212–250
16	160–200	80	180–212
12	125–160	100	125–150
10	100–125	120	106–125
8	80–100	150	75–106

5 – твердость круга.

Твердость обозначается буквенными индексами от A до Z со следующей их трактовкой (табл. 3).

Таблица 3

Обозначения твердостей по DIN 8589

Буквенный индекс	Расшифровка
A, B, C, D	чрезвычайно мягкий
E, F, G	очень мягкий
H, I, J, K	мягкий
L, M, N, O	средний
P, Q, R, S	твердый
T, U, V, W	очень твердый
X, Y, Z	чрезвычайно твердый

Соответствие твердостей по DIN и ГОСТ приведено в табл. 4 [1, с. 354].

Таблица 4

Взаимосвязь обозначений степеней твердости по DIN и ГОСТ

Обозначение степени твердости по DIN 8589 и ГОСТ Р 52587–2006	Обозначение степени твердости по ГОСТ 3647–80
<b>1</b>	<b>2</b>
F	BM1
G	BM2
H	M1
I	M2
J	M3
K	CM1
L	CM2
M	C1
N	C2
O	CT1
P	CT2
Q	CT3
R	T1
S	T2
T, U	BT
V, W, Y, Z	CT

Наиболее распространенными степенями твердости импортных абразивных отрезных кругов является: N, P, Q, R, S, T, U, V.

б – тип связки.

В соответствии с DIN 8589 для шлифовальных кругов используют следующие связки: V – керамические, B – бакелитовые, M – металлические, G – гальванические, R – вулканитовые.

Для отрезных абразивных кругов используют два типа связок – бакелитовые (В) и вулканитовые (R).

7 – наличие упрочняющих элементов.

Буква «F» означает наличие армирующей стеклосетки.

8 – допустимая рабочая скорость круга.

Она обозначается не только цифрами, но и цветными полосами, которые по стандарту DIN имеют более расширенную цветовую гамму, чем по ГОСТ (см. табл. 5).

Таблица 5

Обозначение допустимой рабочей скорости  
отрезного круга цветными полосами

Допустимая рабочая скорость, м/с	Цвет полос на круге
1	2
50	голубая
63	желтая
80	красная
100	зеленая
125	зеленая и голубая
140	зеленая и желтая
160	зеленая и красная

9 – рекомендации по виду обрабатываемых материалов (металл, чугун, камень).

Маркировка характеристик алмазных отрезных кругов  
инострannого производства

Явно выраженного единообразия в маркировке иностранных алмазных отрезных кругов не наблюдается. Каждая фирма, как правило, использует свои варианты маркировки. Так, например, фирма «Rottluff» применяет для алмазных отрезных кругов следующую маркировку:

- «Blue cut 6» – круги для бетонных блоков и труб, песчаника, кирпича;
- «Turbo 4» – для резки бетонных блоков, клинкера, керамики;
- «GR-3 Profi» – для резки гранита и керамики;
- «Marmor GV8» – для резки мрамора;
- «Stabil-Runner» – для резки бетона, гранита, клинкера (с наклонными прорезями между сегментами);
- «LD-Laser» – сегментный круг для резки бетона, искусственного камня, гранита;
- «LN 7 AS/2» – сегментный круг для резки асфальта.

Полную характеристику для таких кругов следует искать в проспектах и сопроводительных документах той или иной конкретной фирмы.

### **3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что входит в понятие характеристики шлифовального круга?
2. Какие размерности приняты для обозначения размеров импортных шлифовальных инструментов?
3. Как обозначаются нормальные (белые, хромистые, циркониевые) электрокорунды, изготовленные различными иностранными производителями?
4. Как обозначается (и чему равна) зернистость по стандарту FEPA?
5. Как обозначается твердость по стандарту DIN 8589?
6. Как обозначаются типы связок импортных кругов?
7. Какими цветными полосами маркируется допустимая рабочая скорость круга?
8. В чем состоят особенности маркировки алмазных шлифовальных кругов импортного производства?

## Лабораторная работа №3

# ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- ознакомление с понятием твердости абразивных инструментов;
- изучение методик оценки твердости абразивных инструментов;
- изучение критериев выбора твердости абразивных инструментов;
- приобретение навыков измерения твердости абразивных инструментов.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 2.1. Методы измерения твердости

Твердость шлифовальных инструментов является важной характеристикой абразивного инструмента. Под твердостью шлифовального инструмента понимают свойство связки оказывать сопротивление проникновению в него другого тела. Установлено семь классов твердости – мягкий, средне-мягкий, средний, средне-твердый, твердый, весьма твердый, чрезвычайно-твердый (табл. 1 приложения).

Степень твердости шлифовального круга характеризует прочность удержания зерна в теле круга. Она практически не зависит от твердости абразивного зерна. Чем легче абразивное зерно выкрашивается из инструмента, тем он мягче, и наоборот. Показателем твердости абразивного инструмента является глубина лунки на поверхности круга (при использовании пескоструйного метода измерения твердости по ГОСТ Р 52587-2006) или показания шкалы прибора Роквелла (при использовании метода вдавливания шарика). Первый метод определения твердости применяют для инструментов на всех видах связок, зернистостью 50 и менее и при высоте круга 8 мм и более, второй – на керамической и бакелитовой связках, зернистостью 12 мм и менее и при высоте круга не более 8 мм.

В ряде случаев для повышения твердости кругов последние изготавливают из смеси зерен двух или трех номеров зернистости и за счет этого достигают более плотной укладки зерен при прессовании. Круги чрезвычайно твердые, например идущие на обработку деталей шарикоподшипников, изготавливают из смеси зерен корундовых и карбидокремниевых материалов.

После изготовления круги проверяют на точность размеров и степень уравновешенности. Далее, в соответствии со стандартом (ГОСТ Р 52588–2011), их испытывают на механическую прочность путем вращения на специальных испытательных станках, а затем проверяют на твердость. Крупнозернистые круги испытывают на пескоструйных приборах мод. 909 и 910 завода «Калибр», мелкозернистые – на твердомерах ТК-2.



В табл. 1, 2, 3 приложения приведены условные обозначения и показатели твердости абразивных кругов.

## **2.2. Критерии выбора твердости шлифовальных инструментов**

При выборе твердости шлифовальных инструментов учитывают физико-механические свойства обрабатываемого материала, требования к точности и качеству поверхности. В абразивных инструментах класса А регламентируется равномерность твердости в пределах одной степени твердости, а для класса Б – в пределах двух степеней твердости.

Твердость шлифовальных инструментов в значительной степени влияет на производительность процесса обработки и качество обработанной детали. При выборе твердости круга необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

1. При обработке твердых материалов абразивные зерна быстрее истираются и затупляются; удаление затупившихся зерен легче происходит в сравнительно мягких кругах, поэтому для обработки твердых материалов следует применять мягкие и среднемягкие абразивные инструменты, а для обработки материалов невысокой твердости – более твердые; исключение составляют медь, алюминий, свинец, нержавеющая и жаропрочная сталь, которые обрабатывают мягким инструментом.

2. С увеличением площади контакта между кругом и деталью давление на единицу площади круга уменьшается и, следовательно, обновление круга затрудняется; в этом случае следует применять более мягкий инструмент.

3. С повышением окружной скорости круга при прочих постоянных условиях следует уменьшать твердость применяемого инструмента; при интенсификации шлифования за счет повышения скорости обрабатываемой детали или поперечной подачи применяют более твердые круги.

4. Для предварительных операций шлифования применяют более твердые круги, чем для чистовых операций.

5. При шлифовании без охлаждения следует использовать менее твердые круги, чем при работе с охлаждением.

6. При шлифовании неровных, прерывистых поверхностей необходимо применять более твердые инструменты, чем при шлифовании ровных поверхностей.

7. На автоматических станках с повышенной жесткостью шпинделя применяют более мягкие круги, чем на станках с ручной подачей.

8. Мелкозернистый инструмент должен иметь относительно меньшую твердость, чем крупнозернистый.

9. При заточке режущих кромок закаленного инструмента, при шлифовании и заточке пластинок из твердых сплавов, при обработке тонких деталей и деталей, плохо отводящих тепло, применяют мягкие шлифовальные круги.

10. При одинаковых условиях шлифования абразивный инструмент на бакелитовой связке должен быть на две степени тверже инструмента на керамической связке.

11. Мягкие круги в среднем экономичнее твердых, так как их реже правят и при их использовании можно вести обработку с более интенсивными режимами, однако твердость их не должна быть столь низкой, при которой круги быстро изнашиваются и теряют форму.

12. Для правки абразивного инструмента, обработки деталей часовых механизмов, шлифования шариков шарикоподшипников применяют наиболее твердые абразивные круги.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Получить у преподавателя образцы абразивных инструментов различных типоразмеров, структуры, зернистости.

2. Произвести измерение твердости полученных образцов на приборе Роквелла.

3. Полученные результаты свести в таблицу (табл. 4 приложения).

### **4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ**

1. Образцы абразивных инструментов.

2. Прибор Роквелла для измерения твердости.

### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что понимают под твердостью абразивного инструмента?

2. Какие методы используют при определении твердости абразивных инструментов?

3. Какими критериями руководствуются на практике при выборе твердости абразивных инструментов?

### **6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

Изучить методики измерения твердости абразивных инструментов, применяемых за рубежом. (Коротков, А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов : монография / А. Н. Коротков. – Кемерово, 2006. – 232 с.; гл. 4) (2 часа).

Таблица 1

Условные обозначения и показатели твердости твердотельных абразивных инструментов определяемые пескоструйным методом и при давлении воздуха в камере  $p = 1,5 \text{ кгс/см}^2$

Твердость		Глубина лунки (мм) при зернистости						
		50	40–32	25–16	12–8	6–M40	M28–M20	≥M14
Мягкий	J	–	–	–	–	–	–	5,0–4,6
Средне- мягкий	K	–	–	–	–	–	5,05–4,55	4,6–4,2
	L	4,0–3,4	4,9–4,2	5,6–4,9	5,3–4,6	5,1–4,6	4,55–4,1	4,2–3,8
Средний	M	3,4–2,85	4,2–3,6	4,9–4,3	4,8–4,3	4,6–4,1	4,1–3,6	3,8–3,4
	N	2,85–,35	3,6–3,05	4,3–3,7	4,3–3,9	4,1–3,6	3,6–3,2	3,4–3,1
Средне- твердый	O	2,35–2,0	3,05–2,55	3,7–3,15	3,9–3,5	3,6–3,1	3,2–2,9	3,1–2,8
	P	2,0–1,7	2,55–2,2	3,15–2,75	3,5–3,1	3,1–2,8	2,9–2,6	2,8–2,5
	Q	1,7–1,45	2,2–1,9	2,75–2,35	3,1–2,8	2,8–2,5	2,6–2,3	2,5–2,2
Твердый	R	1,45–1,25	1,9–1,6	2,35–2,1	2,8–2,5	2,5–2,2	2,3–2,05	2,2–2,8
	S	1,25–1,1	1,6–1,45	2,1–1,85	2,5–2,2	2,22–,05	2,05–1,9	2,5–2,2
Весьма твердый	T, U	1,1–0,9	1,45–1,2	1,85–1,6	–	–	–	–
Чрезвы- чайно твердый	V, W, X, Y, Z	0,9–0,75	1,2–1,1	1,6–1,4	–	–	–	–

Таблица 2

Условные обозначения и показатели твердости твердотельных абразивных инструментов определяемые пескоструйным методом и при давлении воздуха в камере  $p = 0,5 \text{ кгс/см}^2$

Твердость		Глубина лунки (мм) при зернистости					
		50	40–16	12–8	6–M40	M28– M20	≥M14
Мягкий	H I J	4,3–3,4	5,6–4,6	6,1–5,55	6,1–5,20	4,65–	2,6–2,2
		3,4–2,4	4,6–3,4	5,55–	5,2–4,3	4,05	2,2–1,8
		2,4–1,55	3,4–2,3	4,85	4,3–3,7	4,65–	–
				4,85–		3,45	
Среднемягкий	K			4,15		3,45–	
						2,85	
Среднемягкий	K	1,55–1,0	2,3–1,45	4,15–	3,7–3,1	–	–
				3,35			

Таблица 3

Условные обозначения и показатель твердости абразивных кругов, определяемые по методу Роквелла (шкала В)

Степень твердости круга	Обозначение степени твердости	Показатель твердости при зернистости		
		12–8	6–5	4 и менее
Мягкий	H	6–6	2–10	19–27
	I	6–27	10–19	27–36
	J	27–37	19–27	36–45
Средне-мягкий	K	4–13	27–36	45–55
	L	13–24	36–45	55–65
Средний	M	24–35	45–55	65–73
	N	35–44	55–65	73–81
Средне-твердый	O	44–54	65–73	81–87
	P	54–63	73–82	87–96
	Q	63–72	82–89	96–102
Твердый	R	72–80	89–96	102–106
	S	80–88	96–102	106–110

*Примечание.* Этот метод применяют при высоте круга не более 8 мм.

Таблица 4

Результаты измерений

Характеристики абразивного инструмента				Показания шкалы прибора Роквелла
Марка абразива	Зернистость	Тип связки	№ структуры	

## Лабораторная работа №4

# ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- изучение методов оценки прочности абразивных инструментов;
- изучение путей повышения прочности шлифовальных кругов.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 2.1. Общие сведения о прочности

Прочность является одним из наиболее важных эксплуатационных показателей абразивных материалов (испытания кругов на механическую прочность регламентированы в ГОСТ Р 52588–2011 и ГОСТ 30513–97). Она во многом предопределяет работоспособность шлифовальных инструментов и эффективность процесса шлифования.

Абразивным материалам свойственно хрупкое разрушение, теоретическое описание протекания которого достаточно затруднено, поскольку такой процесс характеризуется большой нестабильностью. В настоящее время существует ряд теорий, связывающих предельное напряженное состояние в теле с его хрупким разрушением.

Все теории основываются на эмпирических данных, поскольку внутренний механизм разрушения хрупких объектов пока точно не известен. Поэтому та или иная теория достаточно достоверно может описывать какую-то часть всего многообразия процессов разрушения хрупких тел и быть совершенно непригодной для оценки целой группы других результатов.

Неуклонное повышение скоростей шлифования предъявляет высокие требования к прочности шлифовальных кругов – они должны вращаться без разрыва на скоростях 60–80 и более метров в секунду. Решение этой проблемы тормозится тем обстоятельством, что пока точно не известен механизм разрушения многокомпонентных композитов, к которым относится и шлифовальный круг, состоящий из зерен, связки и пор.

Практика показывает, что существует значительное расхождение между расчетными и экспериментальными данными при определении напряжений в шлифовальных кругах. Причина здесь в том, что шлифовальный круг представляет собой композит, состоящий из нескольких компонентов (зерна, связка, поры), для которого пока не разработана общая теория разрушения.

Расчетные варианты определения напряжений в шлифовальных кругах, хотя и обладают большими потенциальными возможностями и позволяют вычислять напряжения в любой требуемой точке, не дают высокой точности конечных результатов.

Понятие характеристики шлифовального круга, как известно, включает в себя ряд таких параметров, как марка шлифовальных зерен, тип связки,

зернистость, твердость, структура. Число возможных сочетаний этих параметров в шлифовальных инструментах весьма велико, и каждая конкретная комбинация компонентов характеристики определенным образом сказывается на прочностных показателях инструментов.

Для обеспечения требуемой прочности круга важно знать качественные и количественные закономерности влияния элементов характеристики на уровень и характер распределения напряжений в инструменте.

### **2.1.1. Влияние связки на прочность инструмента**

Абразивные инструменты на разных связках по-разному сопротивляются механическим усилиям. Общим для инструментов на всех связках является, во-первых, то, что их сопротивляемость сжатию значительно больше, чем растяжению и изгибу, причем для каждой связки временные сопротивления на растяжения и на изгиб по величине довольно близки друг другу (на изгиб в 1–2 раза больше, чем на растяжение).

Временное сопротивление на сжатие больше, чем на растяжение, у инструментов на керамической связке примерно в 6–8 раз, на бакелитовой связке примерно в 3–4 раза, а на вулканитовой несколько меньше.

Вторым общим свойством для всех связок является увеличение временного сопротивления при всех видах деформации с повышением твердости инструмента и с уменьшением размера зерен абразивного материала. Третье общее свойство заключается в отсутствии заметной разницы в прочности инструментов, изготовленных на одной и той же связке, но из различных абразивных материалов.

Инструменты на керамической связке практически являются хрупкими телами, т. е. до момента разрушения остаточных (пластических) деформаций в них не возникает. Пропорциональность между величиной деформации и нагрузкой сохраняется все время.

Бакелитовая связка на растяжение (и изгиб) прочнее керамической. Вместе с тем для инструментов на бакелитовой связке имеет значение время выдерживания под нагрузкой, так как у них при каждой нагрузке деформация несколько увеличивается с течением времени.

Вулканитовая связка более прочна на изгиб и растяжение, чем бакелитовая и, тем более, керамическая, и переносит более значительные упругие деформации.

Другие связки менее прочны, чем аналогичные им из вышерассмотренных трех, имеющих наибольшее промышленное применение. Так, например, магнезиальная и силикатовая связки, сходные с керамической по хрупкости, менее прочны.

### 2.1.2. Напряжения от усилий резания

В процессе работы абразивный инструмент должен быть прижат к обрабатываемому изделию и оба должны перемещаться один относительно другого. Таким образом, во время работы инструмент оказывает на изделие, во-первых, давление, направленное по нормали к их соприкасающейся поверхности, и, во-вторых, давление в направлении их движения друг относительно друга и, в свою очередь, испытывает со стороны изделия равные, противоположно направленные усилия (реактивные). Первое из них называется нормальным усилием шлифования, второе – касательным (тангенциальным), а их равнодействующая – усилием шлифования.

Схематическое изображение усилий, действующих на инструмент, представлено на рис. 1.

Во взаимодействии с изделием находится определенный участок поверхности инструмента. Взаимодействие вызывает со стороны изделия на зерна участка инструмента нормальное давление  $P_y$  и тангенциальное давление  $P_z$ , которые складываются в общую равнодействующую  $R$ .

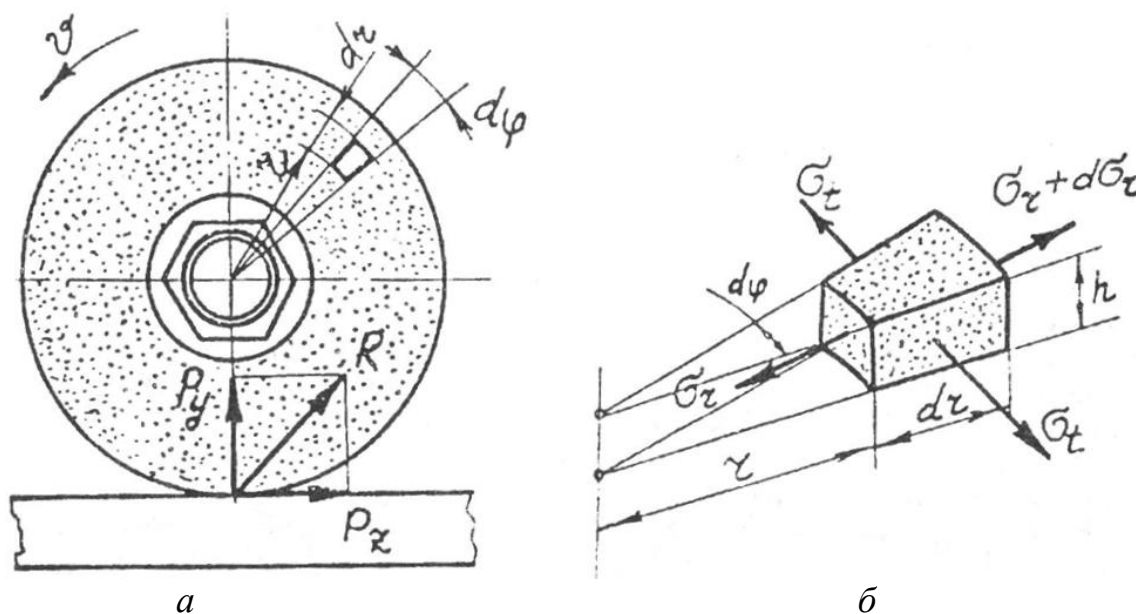


Рис. 1. Силы резания (а) в процессе обработки и напряжения в элементарном участке (б) шлифовального круга

Специально проведенные исследования показали, что даже при таких высоких усилиях, при которых происходит не износ, а быстрое разрушение поверхности круга, напряжения от усилий шлифования не опасны для прочности круга.

Обычно размеры инструментов таковы, что силы  $P_y$  и  $P_z$  вызывают в теле инструмента ничтожные напряжения по сравнению с величинами их временного сопротивления на сжатие, растяжение и изгиб.

### 2.1.3. Напряжения в кругах от центробежных сил

Во вращающемся круге возникают центробежные силы, пропорциональные квадрату скорости. Именно эти силы вызывают в круге напряжения, опасные для его прочности, так как при тех скоростях вращения кругов, которые допускаются в настоящее время, они довольно близки к временному сопротивлению материала круга.

Анализ теоретических исследований для определения рода и величины вызываемых центробежными силами напряжений, в зависимости от скорости круга, его геометрических размеров и физических характеристик, показывает, что наибольшим напряжением во вращающемся круге является напряжение на растяжение на стенке отверстия круга. Это растяжение пропорционально массе единицы объема круга и квадрату его окружной скорости и зависит от соотношения радиуса круга и его отверстия  $R/r$  таким образом, что по мере уменьшения этого соотношения, т. е. при увеличении диаметра отверстия, напряжение увеличивается.

Таким образом, выражением наибольшего напряжения в теле вращающегося круга является

$$\sigma = 0,1C \frac{\gamma}{g} v^2, \quad (1)$$

где 0,1 – коэффициент для перевода размерностей, кг/см<sup>2</sup>;  $\gamma$  – объемный вес круга, г/см<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести (9,81 м/с<sup>2</sup>);  $v$  – окружная скорость круга, м/с;  $C$  – константа, равная

$$C = f(R/r), \quad (2)$$

где  $R$  – радиус круга и  $r$  – радиус его отверстия.

Эксперименты показывают, что материал кругов неоднороден, так как в одном и том же круге есть места, значительно разнящиеся между собой по прочности.

Центробежная сила возникает в шлифовальном круге в результате его вращения и приводит к появлению радиальных и окружных напряжений, действующих на элементарном участке шлифовального круга, как показано на рис. 1, б.

Ориентировочные численные значения радиальных и окружных напряжений в любой точке шлифовального круга можно определить на основе следующих формул:

$$\sigma_r = \gamma \frac{\omega^2}{8g} (3 + \mu) (b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2}); \quad (3)$$



$$\sigma_t = \gamma \frac{\omega^2}{8g} (3 + \mu)(b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r^2), \quad (4)$$

где  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  – соответственно радиальное и тангенциальное напряжения в некоторой точке круга;  $\gamma$  – удельный вес шлифовального круга;  $\omega$  – угловая скорость вращения круга;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu$  – коэффициент Пуассона шлифовального круга ( $\mu$  для кругов на керамической связке равен 0,2–0,3);  $b$ ,  $a$  – радиус круга и посадочного отверстия;  $r$  – текущий радиус.

## 2.2. Методы оценки прочности абразивных инструментов

Как отмечалось выше, расчетные методы определения напряжений в шлифовальных кругах и соответственно их прочности дают недостаточную сходимость результатов с экспериментальными данными, поэтому в тех случаях, когда требуется иметь достоверный результат (например, при контроле прочности изготовленных инструментов), более предпочтительны экспериментальные методы. К наиболее распространенным и общепринятым методам такого рода относится проверка прочности шлифовальных кругов на разрыв. Из вышесказанного ясно, что единственно надежным способом испытания прочности кругов, обеспечивающим безопасные условия работы, является испытание их вращением со скоростью, превышающей рабочую. Получающийся при таком испытании гарантированный коэффициент запаса прочности  $n$  зависит от того, насколько испытательная скорость превышает рабочую. Для напряжения  $\sigma_{исп}$ , возникшего при испытании на скорости  $v_{исп}$ :

$$\sigma_{исп} = C \frac{\gamma}{g} v_{исп}^2, \quad (5)$$

и для напряжения  $\sigma_{раб}$ , возникающего при работе на скорости  $v_{раб}$ :

$$\sigma_{раб} = C \frac{\gamma}{g} v_{раб}^2, \quad (6)$$

следовательно, гарантированный коэффициент запаса прочности:

$$n = \sigma_{исп} / \sigma_{раб} = v_{исп}^2 / v_{раб}^2. \quad (7)$$

Так как даже значительное повышение обычных на практике давлений шлифования не вызывает в круге значительного увеличения напряжений, то достаточно иметь  $n = 2$ . Этому, с некоторым запасом в сторону увеличения  $n$ ,

соответствует превышению испытательной скорости  $v_{\text{исп}}$  над рабочей  $v_{\text{раб}}$  на 50 %, т. е.  $v_{\text{исп}} = 1,5 v_{\text{раб}}$ .

Тогда

$$n = v_{\text{исп}}^2 / v_{\text{раб}}^2 = (1,5 v_{\text{раб}})^2 / v_{\text{раб}}^2 = 1,5^2 = 2,25. \quad (8)$$

Для реализации метода проверки прочности кругов на разрыв используются специальные станки (типа СИП, АИП и др.). Они имеют высокоскоростной привод, с помощью которого испытуемый шлифовальный круг постепенно разгоняется до скоростей, в 1,5 раза превосходящих его рабочую скорость (при контроле прочности), или до скоростей, при которых он разрывается на части (при определении прочности). Скорость вращения, при которой круг разрывается, и служит опосредованным показателем прочности или же ее пересчитывают в значения разрывной прочности.

Отличительной особенностью таких станков является наличие у них стальных защитных кожухов с толщиной стенок, достигающей до десятков миллиметров, предотвращающих разлет осколков при разрыве круга.

Получение данных о прочности кругов путем испытания их на разрыв является довольно трудоемкой и дорогостоящей операцией, поэтому для такой цели часто находят применение образцы типа «восьмерок», изготавливаемые из той же смеси, что и шлифовальный круг. Образцы разрушаются растягивающими усилиями на разрывных машинах, а получаемый результат экстраполируется на разрывную прочность круга. Но при сопоставлении опытных данных было обнаружено расхождение между прочностью образцов и прочностью круга в 1,25–2,25 раза.

Аналогичным образом для оценки прочности круга используются результаты прочности на изгиб образцов типа брусков. При этом выявилось еще большее расхождение между прочностью круга и прочностью образцов-брусков. С целью перехода от прочности на изгиб к прочности на растяжение был введен коэффициент, равный отношению величин этих прочностей. Однако, как показала практика, значение этого коэффициента не постоянно, а колеблется, например, для кругов на керамической связке в пределах 2,3–2,9.

Несмотря на эти недостатки, испытания на образцах широко распространены и продолжают поиски более точной взаимосвязи между прочностью всего инструмента и прочностью образцов.

Проанализировав описанные методы определения прочности шлифовальных кругов, можно прийти к выводу, что, в плане точности и достоверности получаемых результатов, приоритет следовало бы отдать испытаниям, основанным на вращении круга до разрыва. Но реализация этих испытаний сопряжена как с преодолением технических трудностей (необходимо иметь привод с бесступенчатым регулированием скорости вращения, верхняя граница которой должна заходить в область десятков и сотен тысяч оборотов в минуту), так и с повышенной опасностью, связанной с разрушением круга и разлетом осколков.

По этим причинам желателен другой подход к решению задачи по определению прочности кругов, который, при сохранении достоинств прежнего способа, был бы проще в исполнении и безопаснее в получении опытных данных.

Стандартные методики оценки прочности, основанные на использовании специальных образцов – «восьмерок» (испытание на растяжение) и прямоугольных образцов (испытание на изгиб), представлены ниже. Внешний вид и размеры таких образцов изображены на рис. 2, а, б.

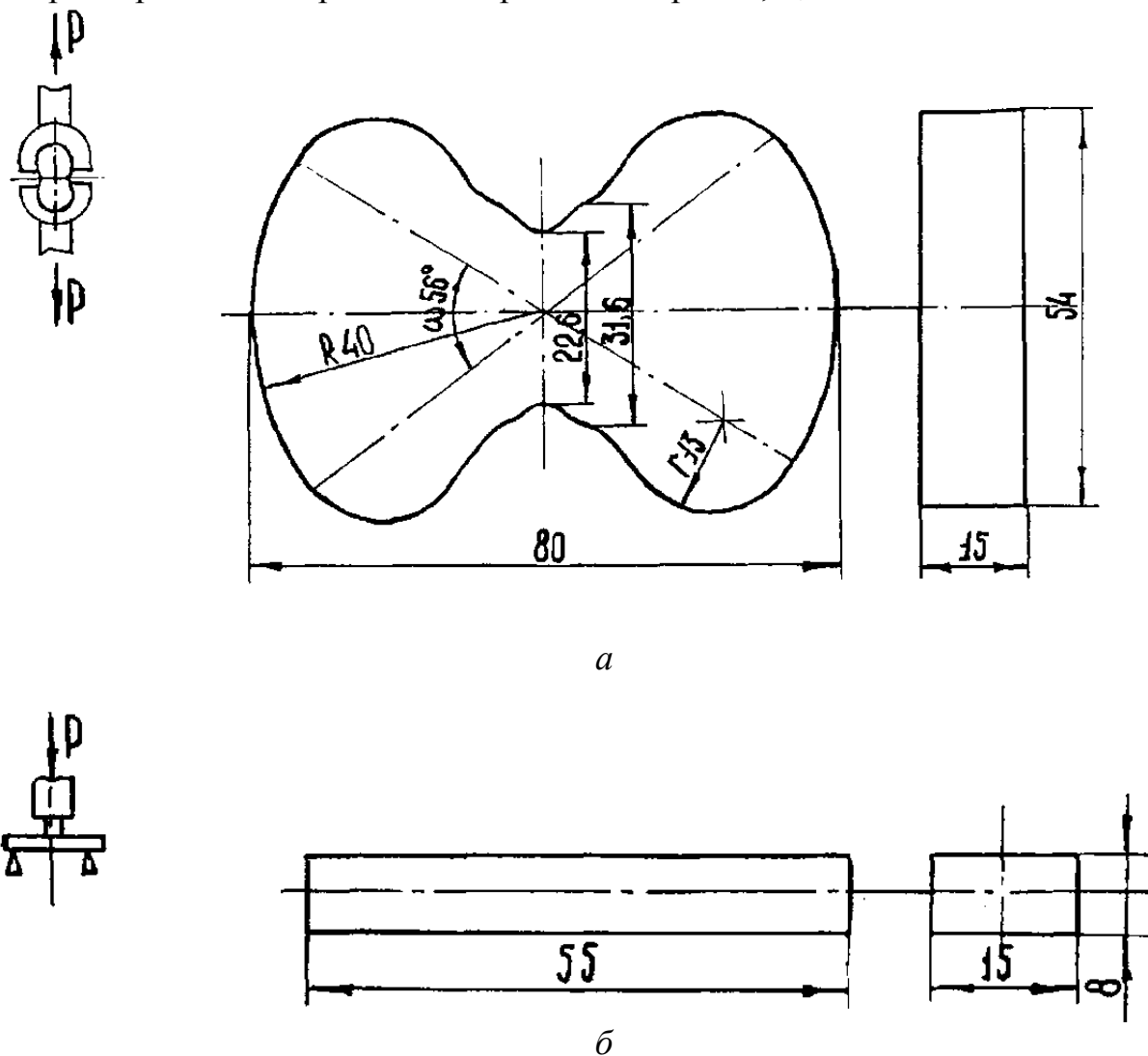


Рис. 2. Вид и размеры образцов для определения прочности на растяжение (а) и изгиб (б)

Можно проводить также испытания на образцах-дисках (на сжатие), которые должны давать наиболее точный и обоснованный результат по прочности для хрупких материалов. Это объясняется тем, что при сжатии таких образцов их разрушение начнется изнутри от напряжений растяжения. Поэтому устраняются многие недостатки, сопутствующие испытаниям на растяжение и изгиб (неточность изготовления и установки образцов, наличие поверхностных дефектов и пр.).

Внешний вид этих образцов и устройство для их испытания показаны на рис. 3.

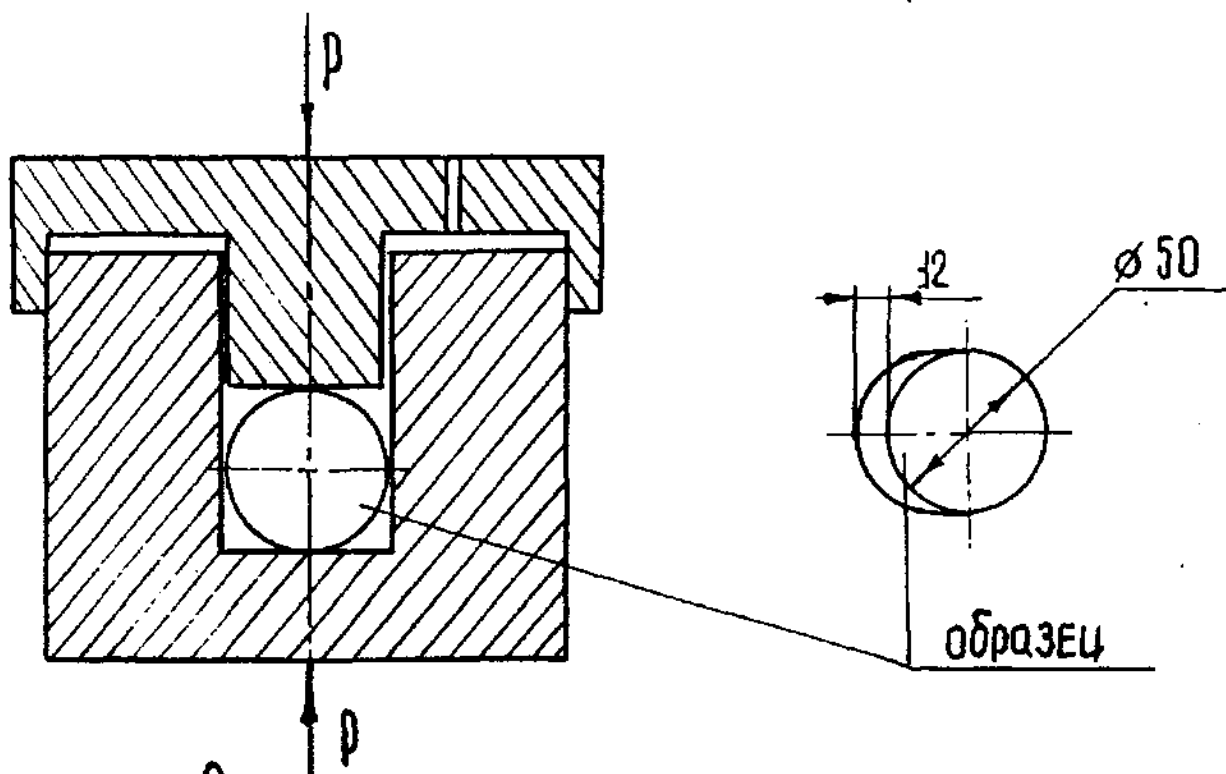


Рис. 3. Схема устройства для испытания образцов на сжатие

### 2.3. Пути повышения прочности шлифовальных кругов

К числу известных способов повышения прочности шлифовальных кругов относятся (рис. 4):

- уменьшение соотношения между размерами посадочного отверстия и размерами наружного диаметра круга;
- создание кругов вообще без центрального (посадочного) отверстия;
- увеличение высоты круга по мере приближения от периферии к посадочному отверстию;
- изготовление кругов с зернами мелких зернистостей (либо всего инструмента, либо его части вблизи посадочного отверстия);
- применение высокопрочных связок и зерен, повышение их адгезионного взаимодействия;
- повышение прочности зерен и композитов зерно-связка путем их покрытия металлическими пленками;
- применение армирующих элементов различных конструкций (бандажи, сетки, спирали, кольца, втулки);
- импрегнирование посадочного отверстия круга клеями и другие способы.

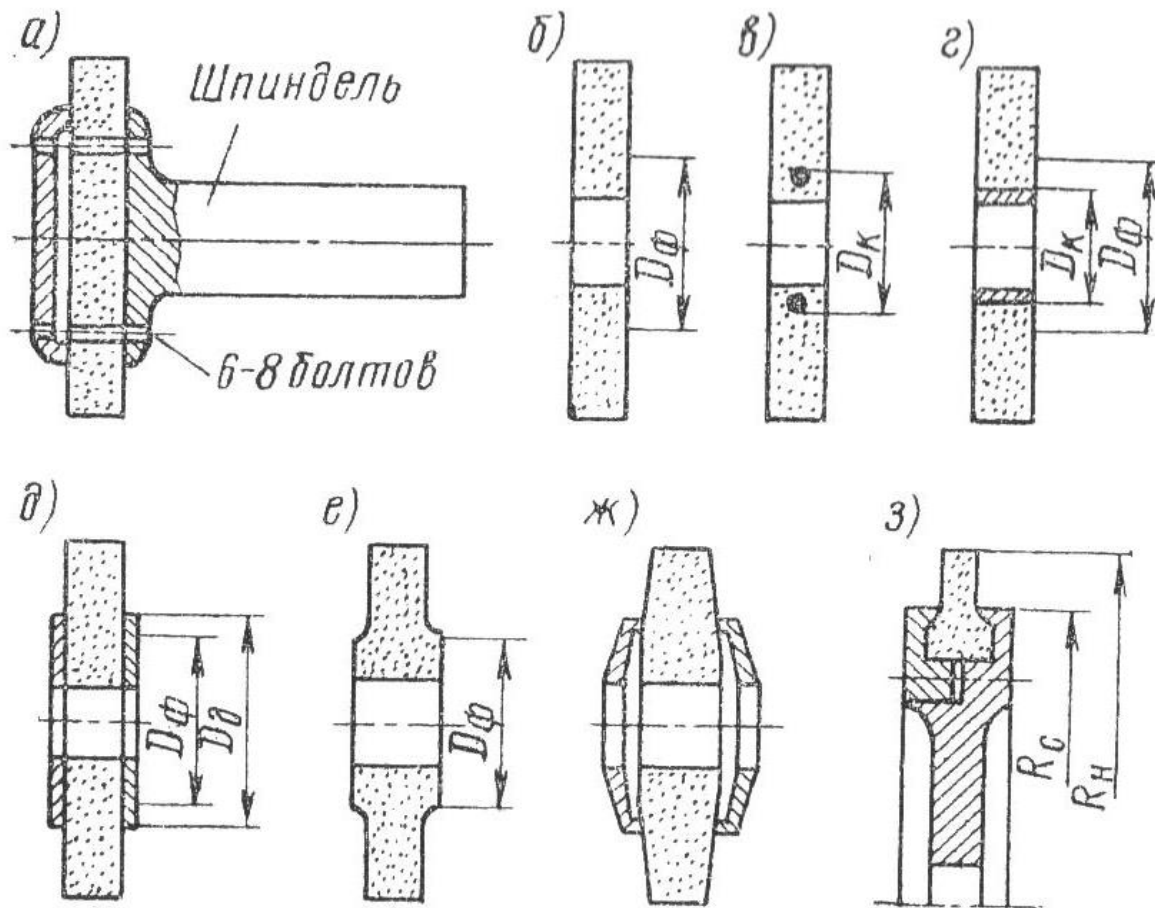


Рис. 4. Высокоскоростные шлифовальные круги

На рисунке 4 позициями обозначены круги: *а* – без центрального отверстия; *б* – с мелкозернистой упрочненной серединой диаметром  $D_{\phi}$ ; *в* – с армированным металлическим кольцом диаметром  $D_{\kappa}$ ; *г* – с армированной металлической втулкой в отверстии диаметром  $D_{\kappa}$ ; *д* – упрочненный металлическими дисками диаметром  $D_{\phi}$ , наклеенными на торцы круга; *е* – с утолщенной ступицей диаметром  $D_{\phi}$ ; *ж* – со специальными разгружающими фланцами; *з* – сборный сегментный ( $R_{\text{н}}$  – наружный радиус сегментов,  $R_{\text{с}}$  – радиус планшайбы).

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя вариант задания (см. приложение).
2. Согласно полученному варианту по формулам (3)–(4) произвести расчет значений радиальных и окружных напряжений шлифовального круга.
3. Оценить, достаточна ли прочность круга для данных условий его эксплуатации.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под прочностью абразивного инструмента?
2. Что оказывает влияние на прочность круга?
3. Какие методы используют при определении прочности абразивных инструментов?
4. Какие существуют пути повышения прочности шлифовальных кругов?

#### 5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

1. Ознакомиться с теориями разрушения хрупких материалов (к числу которых относятся абразивные зерна) (Коротков А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов : монография. – Кемерово, 2006. – 232 с.; гл. 2) (1 час).

2. Изучить методики измерения прочности единичных шлифовальных зерен различных марок и зернистостей (Коротков А. Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов : монография. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 122 с.; гл. 1) (1 час).

#### Приложение

##### Варианты заданий

№ вар.	<i>b</i> , мм	<i>a</i> , мм	$\omega$ , м/с	$\mu$	<i>r</i> , мм	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	<i>g</i> , м/с <sup>2</sup>
1	125	25,5	42	0,25	120	2,0	9,81
2	150	38	44		140	2,0	
3	150	16	46		145	2,3	
4	200	63,5	48		196	2,7	
5	225	101,5	50		215	2,5	
6	225	63,5	52		222	2,1	
7	250	101,5	54		243	2,0	
8	250	152,5	56		246	2,4	
9	300	101,5	58		291	2,6	
10	375	152,5	60		370	2,9	
11	375	152,5	62		368	2,2	
12	450	152,5	64		445	2,3	
13	450	152,5	66		439	2,5	
14	530	152,5	68		526	2,6	
15	530	152,5	70		519	2,3	

## Лабораторная работа №5

### КОНТРОЛЬ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- ознакомление с одним из показателей качества шлифовальных кругов – уравниваемостью;
- изучение причин, вызывающих неуравновешенность шлифовальных кругов;
- изучение методик оценки неуравновешенности кругов;
- изучение методов балансировки шлифовальных кругов;
- изучение методов правки кругов и видов правящего инструмента;
- расчет численных значений частных неуравновешенных масс и суммарной неуравновешенности круга.

#### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

##### 2.1. Причины неуравновешенности кругов

Уравновешенность является одним из основных комплексных показателей качества абразивных кругов. При шлифовании возникают автоколебания, вызываемые неуравновешенностью шпинделя, электродвигателя, ременной передачи и других частей шлифовального станка. Однако наибольшие колебания обусловлены неуравновешенностью шлифовального круга, которая приводит к вибрациям системы станка, возрастанию напряжений в круге, ухудшению качества шлифованных поверхностей и появлению на них прижогов, повышенному износу круга и увеличению расхода правящих средств, преждевременному выходу из строя шпиндельного и других узлов станка. Большое значение имеет степень уравниваемости кругов в связи с все более широким внедрением в практику скоростного и сверхскоростного шлифования. Дисбалансом называют произведение неуравновешенной массы  $G$  на ее эксцентриситет  $S$  относительно оси вращения. Согласно ГОСТ Р 52781–2007 и ГОСТ Р 58583-2019, установлены четыре класса неуравновешенности шлифовальных кругов, а допустимые неуравновешенные массы определены в зависимости от массы кругов, изготавливаемых на керамической, бакелитовой, вулканитовой и специальных органических связках. В табл. 1 приложения даны допустимые неуравновешенные массы абразивных кругов. Абразивные круги общего назначения изготавливают трех классов точности: АА, А и Б – в порядке снижения точности. Для кругов точности АА класс неуравновешенности должен быть первым, для кругов точности А – первым или вторым, для кругов точности Б – вторым или третьим.

Основные причины, вызывающие появление неуравновешенности у шлифовальных кругов:

- 1) погрешность геометрической формы круга;
- 2) эксцентричность посадочного отверстия круга относительно его наружной поверхности;
- 3) неравномерность (неравноплотность) структуры круга;
- 4) смещение центра круга относительно оси его вращения вследствие зазора, образующегося между посадочным отверстием круга и планшайбой (оправкой, патроном);
- 5) неравномерное поглощение кругом влаги, пыли, отходов шлифования;
- 6) неравномерный износ круга в процессе шлифования.

Теоретические расчеты и практика показывают, что наибольшее влияние на неуровненность кругов оказывают четыре первые причины.

## 2.2. Оценка неуровненности кругов

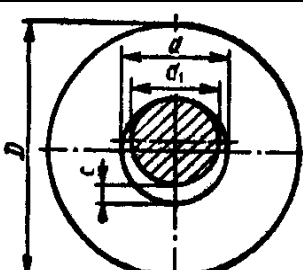
Неуровненность круга может быть измерена и рассчитана. Расчет позволяет установить и проанализировать зависимость неуровненности от отдельных причин, вызывающих ее появление. Возможны два подхода:

- 1) нахождение частных зависимостей неуровненности от отдельных факторов с последующим векторным или скалярным суммированием результатов расчета;
- 2) вывод обобщенной зависимости, учитывающей единовременное действие всех рассматриваемых источников неуровненности.

В табл. 1 представлены расчетные схемы и формулы, позволяющие определять значения частных неуровненных масс  $B_c$ ,  $B_e$ ,  $B_n$  до и после первой правки круга, установленного на шпиндель шлифовального станка.

Таблица 1

Зависимость неуровненности шлифовального круга от погрешностей его установки и геометрической формы

Причина	Схема	Зависимости величин дисбаланса
1	2	3
зазор между посадочным диаметром круга и планшайбой		<p>До правки</p> $B_c = 785 \cdot 10^{-6} \frac{(D^2 - d^2) H \chi}{D} \quad (1)$ <p>После правки</p> $B_c = 785 \cdot 10^{-6} \frac{d^2 H \chi}{D} \quad (2)$



1	2	3
эксцентриситет посадочного диаметра круга относительно наружного		До правки $B_e = 157 \cdot 10^{-5} D H \gamma e$ (3) После правки $B_e = 0$
непараллельность торцов круга		До правки $B_n = 196 \cdot 10^{-6} \frac{D^4 - d^4}{D^2} \frac{H \gamma \Delta H}{2H + \Delta H}$ (4) После правки $B_n = 196 \cdot 10^{-6} \frac{D^4 - d^4}{D^2} \frac{H \gamma \Delta H_1}{2H + \Delta H_1}$ (5)
<p><i>Примечание:</i> <math>\gamma</math> – плотность абразива, г/см<sup>3</sup> (средняя плотность кругов на связках К (керамическая) и Б (бакелитовая) составляет 2,0–2,6 г/см<sup>3</sup>, на связке В (вулканитовая) 2,6–3 г/см<sup>3</sup>); <math>c</math> – диаметральный зазор между посадочными поверхностями круга и планшайбы, мм; <math>e</math> – эксцентриситет посадочной поверхности круга относительно наружной поверхности, мм; <math>\Delta H</math> – непараллельность торцов круга, мм.</p>		

Из сравнения формул (1) и (2) видно, что величина  $B_e$  после правки снижается в  $\left[\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right]$  раз. Дисбаланс  $B_e$  после первой правки круга становится равным нулю. Это достигается снятием с круга слоя абразива, равного  $2e$ . Следовательно, чем больше  $e$ , тем большее время затрачивают на правку и тем больше будет расход абразивного и правящего инструментов.

Формулы (4) и (5) позволяют рассчитать величину  $B_n$ . Правкой инструмента невозможно устранить неуравновешенную массу  $B_n$ , хотя по мере съема абразива эта величина будет уменьшаться. Если при правке круга снимают слой абразива с размером  $\Delta D$  на сторону, то после правки значение  $B_n$  определяют выражением (5), где

$$\Delta H_1 = \left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right); \quad (6)$$

$$D_1 = D - 2\Delta D. \quad (7)$$

На величину неуравновешенности круга  $B_\gamma$ , являющейся результатом его неравноплотности, существенное влияние оказывают погрешности технологического процесса изготовления кругов и, в частности, непараллельность плоскости нижней плиты пресс-формы и верхней плоскости формуемой массы после разравнивания, перекося осей пресс-формы и пуансона, а также неравномерное распределение зерна и связки после перемешивания.

При этом усовершенствование технологии изготовления кругов не может полностью устранить их неравноплотность.

Суммарную неуровненность круга определяют векторной суммой:

$$\bar{B} = \bar{B}_e + \bar{B}_c + \bar{B}_H + \bar{B}_\gamma + \bar{B}_0, \quad (8)$$

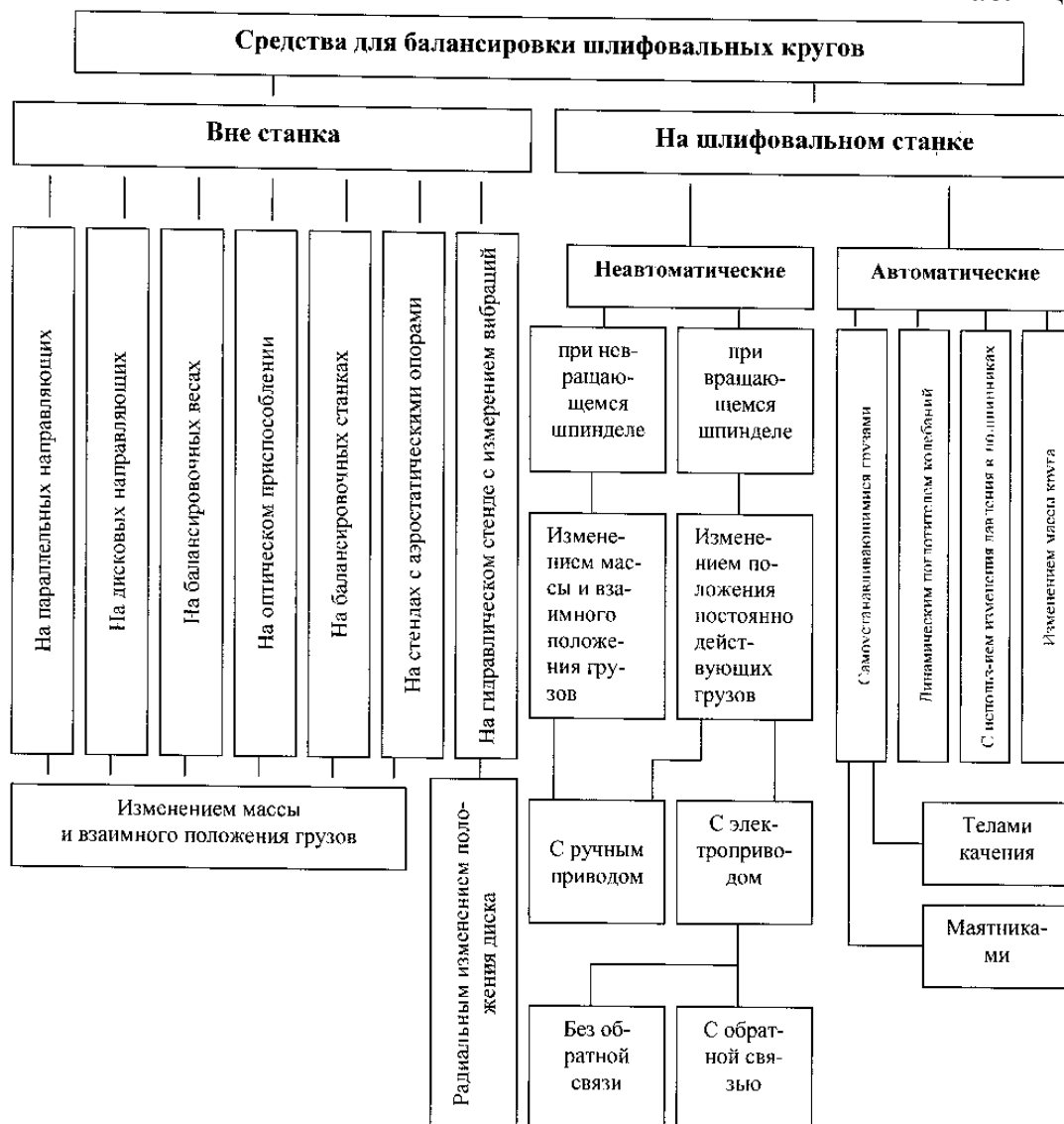
где  $\bar{B}_0$  – неуровненная масса, определяемая прочими причинами.

Рассчитать величину  $\bar{A}$  по формуле (8) можно, если известно взаимное расположение векторов. В противном случае следует принимать во внимание худший вариант и определять наибольшее значение суммы.

### 2.3. Балансировка шлифовальных кругов

Контроль неуровненности абразивных кругов производится согласно требованиям ГОСТ Р 58583-2019. Круги, не проходящие по требуемым параметрам, подвергаются балансировке. Классификация средств, применяемых для балансировки шлифовальных кругов, приведена в табл. 2.

Таблица 2



### 2.3.1. Устройства для балансировки кругов вне шлифовального станка

Абразивные круги наиболее часто балансируют на станках с параллельными направляющими. Станки просты по устройству и эксплуатации и бывают с направляющими, выполненными в виде цилиндрических валиков, а также плоских ножей и призм. Круг отдельно или вместе с планшайбой устанавливают на специальную оправку, имеющую коническую посадочную и цилиндрические опорные шейки, и закрепляют с помощью фланца и гайки. К числу основных недостатков указанных станков следует отнести низкую точность и малую производительность измерения дисбаланса и балансировки кругов.

Станки с дисковыми направляющими также часто используют в практике балансировки шлифовальных кругов. Они просты в эксплуатации и не требуют высокой точности взаимной выверки дисков. Основной их недостаток – невысокие точность и производительность балансировки.

Балансировочные весы позволяют получить более высокую точность уравнивания по сравнению с параллельными и дисковыми станками. Однако они более сложны в эксплуатации и пригодны для балансировки кругов диаметром до 600 мм.

Оптические балансировочные станки обеспечивают сравнительно высокую производительность балансировки шлифовальных кругов и дают возможность измерять дисбаланс у необожженных кругов, что представляет интерес для абразивных производств. К числу недостатков этих станков следует отнести ограничение диаметра (до 350 мм) и массы (до 7 кг) балансируемых кругов и сложность тарирования.

Для балансировки шлифовальных кругов можно применять балансировочные станки общего назначения типов 9В725, 9710, ДБ-3, ДБ-4, ДБ-5, ДБ-10, ДБ-50, ДБ-102, МС-22, МВТУ-703, МВТУ-704 и др., а также специальные балансировочные станки. Указанные станки позволяют производить статическую и динамическую балансировку шлифовальных кругов с высокой точностью и производительностью. В каждом конкретном случае следует экономически обосновывать целесообразность использования балансировочных станков той или иной модели.

Станки с аэростатическими опорами позволяют измерять величину неуравновешенной массы и балансировать круги с весьма высокой точностью. На рис. 2 показана схема станка с аэростатическими опорами, который предназначен для балансировки кругов диаметром до 1200 мм.

Балансировочную оправку 1, на которую насаживают круг, устанавливают на опоры 2. Сжатый воздух под давлением  $p = 2 \div 4$  кгс/см<sup>2</sup> подводят к опорам, и оправка с кругом всплывает на воздушной подвеске. Отсутствие контакта между рабочими поверхностями оправки и опор обеспечивает сведение момента трения к минимуму.

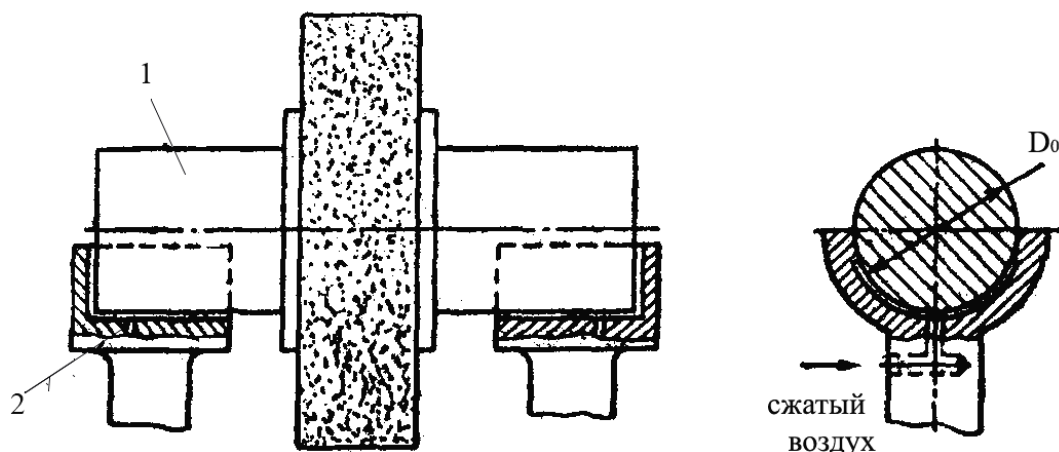


Рис. 2. Схема балансировочного станка с аэростатическими опорами

В результате опытно-промышленной проверки балансировочных станков с аэростатическими опорами установлено, что точность балансировки абразивных кругов  $D = 300 \div 800$  мм по сравнению с точностью их балансировки на станке с цилиндрическими направляющими (по ГОСТ Р 58583-2019 этот стенд предписывается как основное балансировочное средство) повышается не менее чем в 10 раз.

### **2.3.1. Балансировочные приспособления, предназначенные для балансировки кругов непосредственно на шлифовальных станках при невращающемся и вращающемся шпинделях**

Устройства с ручным перемещением компенсирующих грузов при невращающемся шпинделе, часто базирующиеся на применении амплитудно-фазового метода балансирования, не нашли пока широкого применения. Системы с ручным регулированием компенсирующих грузов при вращающемся шпинделе отличаются невысокой эксплуатационной надежностью и большой конструктивной сложностью, в связи с чем находят пока ограниченное практическое применение.

Известен ряд схем и конструкций балансировочных систем с механизированным управлением перемещением компенсирующих грузов. Перспективной является конструкция балансировочной системы, в которой дистанционное управление процессом уравнивания осуществляется с помощью электромагнита и муфт, приводимых в действие соответствующим переключением тумблеров. Значительный интерес представляет собой балансировочное устройство мод. БМ20 с волновым редуктором. Движение механизму перемещения компенсирующего груза сообщается непосредственно от вращающегося шпинделя станка, а медленные перемещения осуществляются при помощи двухволнового редуктора с большим передаточным отношением. Балансировка шлифовального круга диаметром 400 мм производится в течение 1,5–2 мин с точностью до 0,5 мкм. Балансировочные устройства с механизированным управлением перемещения грузов отличаются высокими

производительностью и точностью балансировки и более предпочтительны по сравнению с устройствами с ручным регулированием компенсирующих грузов. В системах для автоматической балансировки кругов на шлифовальных станках в качестве компенсирующих грузов используют шары, ролики, маятники и другие тела. Применяют также системы, в которых уравнивание кругов производят путем удаления части абразива, а также гидравлическим методом.

### **2.3.2. Системы для автоматической балансировки кругов на шлифовальных станках**

Автоматические системы балансировки кругов на шлифовальных станках наиболее перспективны с точки зрения как производительности, так и точности балансировки. При балансировке шлифовальных кругов, входящих в многокруговые наладки, имеются некоторые особенности. Уравновешенность всей системы обеспечивается при сборке многокругового комплекта на запасном шпинделе станка смещением заранее установленной тяжелой части каждого круга относительно предыдущего на угол  $360/m$  градусов ( $m$  – число кругов в наладке). Уравновешенность каждого круга наладки не должна выходить за пределы 1-го класса по ГОСТ Р 52781–2007.

Для компенсации неуравновешенности шлифовальных кругов в настоящее время применяют метод заливки свинца в подготовленную секторную канавку, которую выдалбливают на торце круга у посадочного отверстия. Этот метод является, однако, несовершенным как по технологии, так и по эффективности балансировки. Перспективным способом компенсации неуравновешенности абразивных кругов является метод инъекций аэрозолей, пригодный главным образом для инструмента на керамической связке, а также для крупнозернистых кругов на бакелитовой связке. Инъекция аэрозолей обеспечивает накопление компенсирующей массы в большом объеме шлифовального круга, что создает условия для достаточно длительного сохранения уравновешенности круга в процессе его эксплуатации.

## **2.4. Правка кругов и правящий инструмент**

Для восстановления режущей способности абразивного инструмента и придания ему правильной геометрической формы и профиля периодически в процессе работы производят его правку. От правильного выбора средств и режимов правки зависят не только точность и шероховатость обработанной поверхности детали, производительность обработки, но и расход шлифовальных кругов, износостойкость правящего инструмента и себестоимость операции шлифования.

Широко применяемые шлифовальные круги средних зернистостей и степеней твердости в основном расходуются не в процессе шлифования, где износ их крайне мал, а в процессе правки. На правку расходуется от 45 % до 80 % полезного объема абразивных кругов при круглом, плоском и внутрен-

нем шлифовании. Затраты времени на правку могут достигать 40 % штучного времени обработки и более. В зависимости от требований к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности применяют алмазную и безалмазную правку кругов.

Правку осуществляют обтачиванием алмазным инструментом, обкатыванием абразивными, твердосплавными и металлическими дисками, шлифованием кругами из карбида кремния и алмазно-металлическими роликами, тангенциальным точением профильной поверхности круга алмазным инструментом, накатыванием стальными профильными роликами.

#### 2.4.1. Правка методом обтачивания

Правка методом обтачивания представляет собой точение (разрушение) хрупкого абразивного материала и связки шлифовального круга правящим алмазным инструментом высокой твердости. Правка осуществляется либо отдельными сравнительно крупными алмазными зернами, зачеканенными в оправки (по ГОСТ 17564–85 «Иглы алмазные»), либо алмазно-металлическими карандашами диаметром 8–10 мм (по ГОСТ 607–80).

Наибольшее применение имеют алмазно-металлические карандаши, в которых в определенном порядке размещены кристаллы алмазов, прочно соединенные специальным сплавом. Этот сплав имеет близкий к алмазу коэффициент теплового расширения, поэтому при изменениях температуры алмазно-металлического карандаша в процессе правки алмазы не испытывают дополнительных тепловых деформаций. Алмазно-металлические карандаши выпускают четырех типов в зависимости от расположения и характеристики алмазных кристаллов в рабочей части: Ц – с алмазами, расположенными цепочкой вдоль оси карандаша (рис. 3, а); С – с алмазами, расположенными слоями, неперекрывающимися (рис. 3, б) и перекрывающимися (рис. 3, в); Н – с неориентированным положением алмазов (рис. 3, г). Каждый тип карандашей подразделяют на марки, отличающиеся массой и количеством алмазов, а также размерами вставки и оправы.

Карандаши типа Ц изготавливают из высококачественных кристаллов алмазов массой от 0,03 до 0,5 карата. Они имеют наибольшее применение при правке кругов для круглого, бесцентрового, внутреннего и фасонного шлифования. Карандаши типа С выпускают двух марок: *многозернистые* с количеством до 10 сравнительно мелких алмазных зерен в слое и *малозернистые* с двумя-пятью алмазными зернами массой 0,1–0,2 карата.

Эти карандаши обладают повышенной износостойкостью; их используют для правки абразивных кругов при чистовом шлифовании в автоматическом цикле.

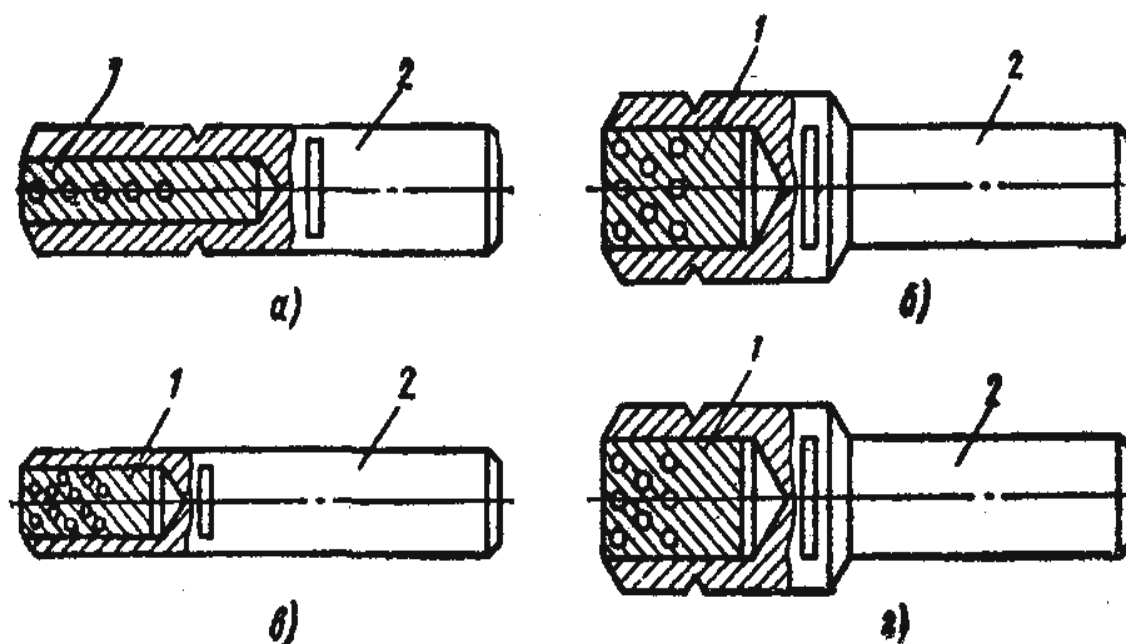


Рис. 3. Алмазные карандаши:

*а* – тип Ц; *б* – тип С с неперекрывающимися слоями алмазов;

*в* – тип С с перекрывающимися слоями алмазов; *г* – тип Н;

1 – алмазоносная вставка; 2 – оправка

Карандаши типа Н изготавливают из алмазов различного качества, в том числе из дробленых и колотых, и используют для правки мелкозернистых шлифовальных кругов на операциях круглого и бесцентрового шлифования, а также для правки односторонних резьбошлифовальных, тарельчатых и плоских кругов для зубошлифования и шлицешлифования.

В процессе правки алмазно-металлические карандаши изнашиваются, на их рабочих поверхностях образуются площадки, и поэтому карандаши обычно устанавливают так, чтобы их ось была наклонена под углом  $10-15^\circ$  в сторону вращения круга и развернута к направлению движения подачи. Это позволяет периодически поворачивать правящий инструмент вокруг оси, вводя тем самым в работу незатупившиеся грани алмаза, что способствует улучшению условий работы правящего инструмента и снижению его износа. Такая установка алмазных инструментов предохраняет также алмаз от перегрузок и разрушения кристаллов и исключает вибрации в системе станок – круг – алмаз.

Для правки кругов больших размеров, а также при профильном шлифовании применяют алмазы больших размеров в оправках, представляющих собой стальную державку, в которой закреплен необработанный алмаз с острой вершиной. Алмазы с естественными гранями, закрепленные в оправках, имеют преимущество перед алмазно-металлическими карандашами в том, что их изготавливают из более качественных алмазов и, следовательно, их износостойкость значительно выше. Оправы для алмазов изготавливают ци-

линдрическими, ступенчатыми, коническими и с резьбой. Для закрепления алмазов в оправках применяют механический зажим, пайку, чеканку. Установка алмаза в оправе должна быть осуществлена таким образом, чтобы плоскости сколов кристаллов не совпадали с направлением сил, действующих на алмаз при правке. После закрепления алмаз должен выступать из оправки не более чем на  $1/4$  своей длины. Специально для правки односторонних резьбошлифовальных кругов выпускаются алмазные иглы (рис. 4).

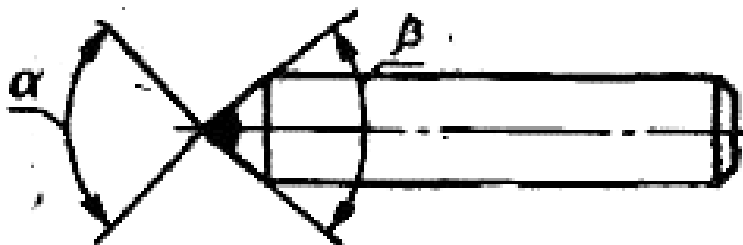


Рис. 4. Иглы алмазные

Для изготовления игл применяют природные алмазы в виде октаэдрических, пиленых и колотых кристаллов. Рабочую часть игл гранят по форме четырехгранной пирамиды без видимой при десятикратном увеличении перемычки на вершине. Алмаз крепят в державке пайкой серебряным припоем или другим методом, обеспечивающим необходимую прочность при исключении графитизации алмаза. Державки для игл изготавливают из стали марок 20, 25, 30, 35, 40.

Правка кругов методом обтачивания позволяет получить высокую точность рабочей поверхности круга, которая за счет изменения величины продольной подачи алмазного инструмента может обеспечить различную шероховатость обрабатываемой детали. В процессе правки кругов методом обтачивания возникают силы, не превышающие 3–5 кгс и способствующие меньшему разрушению зерен круга при правке и их износу при шлифовании.

#### 2.4.2. Правка методом обкатывания

Правка методом обкатывания представляет собой процесс дробления и скалывания абразивных зерен на рабочей поверхности круга правящим инструментом, получающим вращение вследствие сил трения от шлифовального круга.

В качестве правящих инструментов при методе обкатывания применяют круги из карбида кремния, стальные диски, звездочки и шарошки твердосплавные монокристаллические ролики, крупнозернистые твердосплавные на металлической связке. Под действием режущей кромки правящего инструмента, перемещающейся по образующей шлифовального круга с определенной скоростью, поверхностный слой связки круга разрушается, выступающие зерна выкрашиваются, а зерна, находящиеся более глубоко в связке, раскалываются на части. Проскальзывание между шлифовальным кругом и правящим ин-



струментом приводит к заглаживанию абразивных зерен на выправляемой поверхности круга. При правке методом обкатывания возможны две ориентации правящего инструмента относительно шлифовального круга: оси вращения шлифовального и правящего инструментов находятся либо в одной плоскости ( $\varphi = 0$ ), либо в пересекающихся плоскостях, расположенных под углом  $\varphi \neq 0$ . С увеличением угла  $\varphi$  в зоне правки увеличиваются разрушающие силы, действие которых интенсифицирует процесс восстановления рабочей поверхности круга, и повышается износ правящего инструмента.

Правку кругов методом обкатывания алмазными правящими инструментами чаще всего применяют как предварительную правку, когда необходимо снять большой слой абразива с недостаточно хорошо сбалансированного круга и при наличии неравномерности снимаемого слоя. При такой правке используют диски, звездочки и шарошки, устанавливаемые в специальные правящие приспособления.

Следует обратить внимание на правку шлифовальных кругов дисками (рис. 5, *а*, *б*), изготавливаемыми в исполнениях *а* и *б* из сталей марок 10, 20 и 30, цементуемых на глубину 0,3–0,5 мм и закаливаемых до твердости HRC 55–60. Наличие у этих дисков мягкого незакаленного слоя материала способствует интенсификации процесса правки. Правящие диски применяют для правки кругов, используемых при чистовом и получистовом шлифовании, когда требуется получить шероховатость обработки в пределах  $Ra = 0,63 \div 2,50$  мкм.

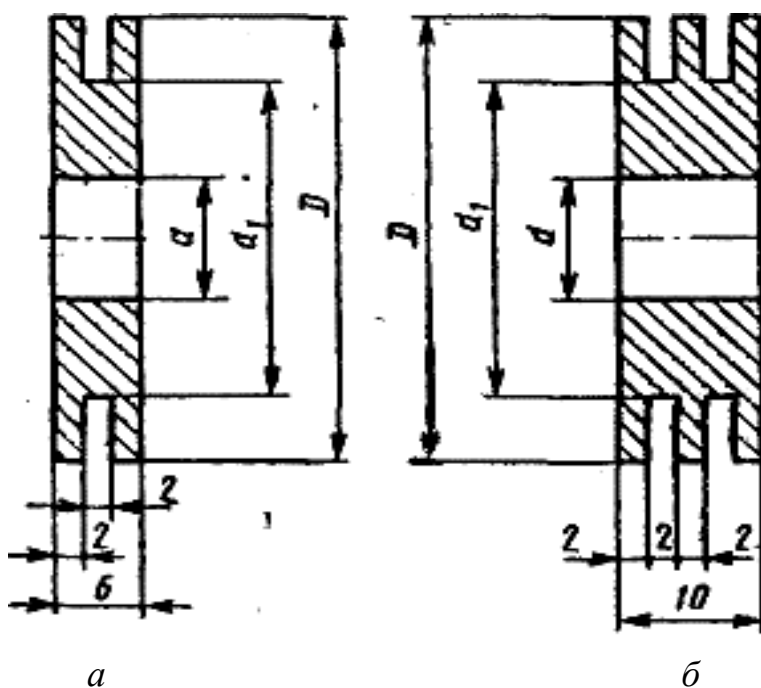


Рис. 5. Диски металлические для правки шлифовальных кругов

Для интенсификации процесса правки кругами из карбида кремния следует устанавливать ось правящего инструмента под углом  $\varphi = 8 \div 10^\circ$  по отношению к оси шлифующего круга. В остальных случаях инструменты

осуществляют правку кругов при параллельных осях. Обычно после рабочих ходов производят два-четыре выхаживающих хода.

### **2.4.3. Правка методом шлифования**

Правка методом шлифования представляет собой процесс срезания и дробления абразивных зерен вращающимся правящим инструментом, который получает принудительное вращение от самостоятельного привода или от привода шлифовальной бабки станка. В качестве правящего инструмента применяют алмазные ролики на твердосплавной связке (ГОСТ 16014–78) и круги из карбида кремния высокой твердости (ГОСТ Р 52781–2007). При рассматриваемом методе вследствие разности скоростей вращения шлифовального круга и правящего инструмента происходит скалывание частичек абразивных зерен, а иногда выкрашивание целых зерен. Для этого вида правки все большее применение находят алмазные ролики, получающие принудительное вращение, совпадающее по направлению с вращением шлифовального круга или направленное против него. Согласно ГОСТ Р 52781–2007, для правки кругов методом шлифования применяют круги из карбида кремния на керамической связке формы «Тип 1».

Алмазные ролики для правки абразивных кругов, согласно ГОСТ 16014–78, изготавливают из природных алмазов с равномерным их расположением на рабочей поверхности ролика. Ролик (рис. 6) состоит из корпуса, изготовленного из стали марки 35 или 45, и алмазоносного слоя 2, прочно соединенного с корпусом. Алмазоносный слой содержит алмазы, сцементированные специальной твердосплавной связкой методом порошковой металлургии.

Все шире применяются алмазные ролики, позволяющие осуществлять правку кругов по нескольким рабочим поверхностям: прямолинейным, криволинейным и их сочетаниям. Такая правка позволяет значительно повысить производительность шлифования за счет концентрированной одновременной обработки нескольких поверхностей детали, а также в результате сокращения времени, затрачиваемого на правку круга, которая ведется либо роликом сложного фасонного профиля, либо набором роликов с использованием метода врезания или метода продольной подачи. Алмазные правящие ролики сложного профиля применяют, в частности, на автомобильных заводах для автоматической правки абразивных кругов. Следует стремиться использовать приспособления для правки с самостоятельным приводом, устанавливаемым вне рабочей зоны станка – за задней бабкой, на шлифовальной бабке или позади нее. Это позволяет править круг во время установки и снятия детали, что сводит до минимума затраты времени на правку.

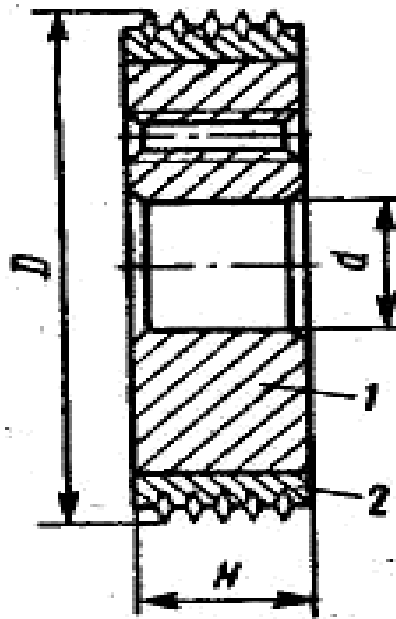


Рис. 6. Ролики алмазные для правки шлифовальных кругов

Для облегчения изготовления ролики делают из двух частей; на требуемый осевой размер детали их устанавливают с помощью распорной втулки. Наличие разреза ролика по плоскости, наклонной к его оси, исключает появление при правке на шлифовальном круге канавок и других дефектов.

Правку методом шлифования осуществляют на кругло- и бесцентрово-шлифовальных станках, а также на специальных станках (например, для шлифования шеек коленчатых валов и кулачков распределительных валов). Применение алмазных роликов и специальных правящих приспособлений позволяет сократить время на правку, а в некоторых случаях совершенно ее исключить и, таким образом, повысить производительность труда при обработке на 20–30 %.

При правке кругов алмазными роликами методом шлифования возникают меньшие силы, чем правка кругами из карбида кремния. Алмазные ролики способствуют получению высокой точности выправленной поверхности шлифовальных кругов и их рациональному расходу при шлифовании.

#### 2.4.4. Правка методом тангенциального точения

Правка методом тангенциального точения представляет собой процесс, аналогичный процессу обтачивания. Правку осуществляют путем срезания (отчасти скалывания и выкрашивания) абразивных зерен алмазным бруском. Операцию выполняют на плоскошлифовальных станках по всей рабочей поверхности круга при продольном перемещении стола. Брусок с профилем, соответствующим профилю шлифуемой детали, закрепляют на столе станка за деталью. Шлифовальный круг при каждой подаче на глубину приводят в соприкосновение с фасонной поверхностью бруска. В результате взаимодей-

ствия с бруском постоянно обновляется профиль круга и тем самым обеспечивается высокое качество обрабатываемых поверхностей деталей, точность размеров и стабильность обрабатываемого профиля.

При использовании профильных алмазных брусков на шлифшлифовальных и специальных станках (например, на станках для шлифования елочного замка турбинных лопаток) производительность операций значительно повышается за счет исключения времени на правку.

#### **2.4.5. Правка методом накатывания**

Правка методом накатывания рабочей поверхности круга представляет собой процесс дробления абразивных зерен и связки при относительно медленном вращении металлического накатного ролика и круга. Метод применяют исключительно для правки профильных шлифовальных кругов. Правящим инструментом служит фасонный стальной ролик, имеющий профиль обрабатываемой детали. Профилирование ведут при скорости накатывания 1–1,5 м/с с поперечной подачей 0,05–0,06 мм/мин. В зависимости от конструктивных особенностей станка вращение при накатке получает либо шлифовальный круг, либо ролик. В результате взаимного вращения ролика с кругом и значительного давления, создаваемого в зоне контакта поперечной подачей, происходит разрушение абразивных зерен и связки на рабочей поверхности круга. Правка продолжается до тех пор, пока круг не приобретает форму профиля заданной детали. Износ ролика вследствие незначительного относительного скольжения при правке сравнительно невелик, поэтому одним и тем же роликом можно многократно производить правку. Предпочтительнее осуществлять накатывание роликом, который приводится во вращение от отдельного электродвигателя или от шпинделя бабки изделия, так как при этом обеспечивается большая точность профилирования круга при меньшем износе ролика.

Профилирование кругов накатными роликами отличается простотой конструкции приспособлений, возможностью правки по нескольким поверхностям профиля круга, высокой режущей способностью выправленных поверхностей.

Для изготовления роликов применяют стали марок 45, 40Х с закалкой до твердости HRC 30–32, а также У8А, У10А, ХГ, Р18, закаленные до твердости HRC 60–64. Профилирование роликами из стали 45, 40Х более эффективно для операций предварительного шлифования, так как процесс накатывания круга протекает интенсивнее, а изготовление роликов проще. Хотя закаленные до твердости HRC 60–64 ролики более изнosoустойчивы и обеспечивают повышенную точность профилирования круга, для их изготовления необходимы специальные профилешлифовальные станки.

На рис. 7 приведена конструкция накатного ролика с параллельными оси канавками неравномерного шага. Наличие канавок интенсифицирует процесс профилирования круга, а неравномерный шаг их расположения исключает появление на круге следов от канавок, а также биение круга после

правки. Диаметр ролика выбирают в зависимости от диаметра круга  $D_1 = (0,2-0,25) D$ , а его ширина  $H$  должна соответствовать длине профиля.

Правку накатными роликами производят как с охлаждением, так и без него. В последнем случае процесс правки идет несколько быстрее, так как канавки ролика не засоряются разрушаемыми частицами круга.

Метод накатывания рабочей поверхности кругов применяют при многокониточном резьбошлифовании, шлифовании зубчатых колес абразивным червяком, при фасонном шлифовании и шлицешлифовании.

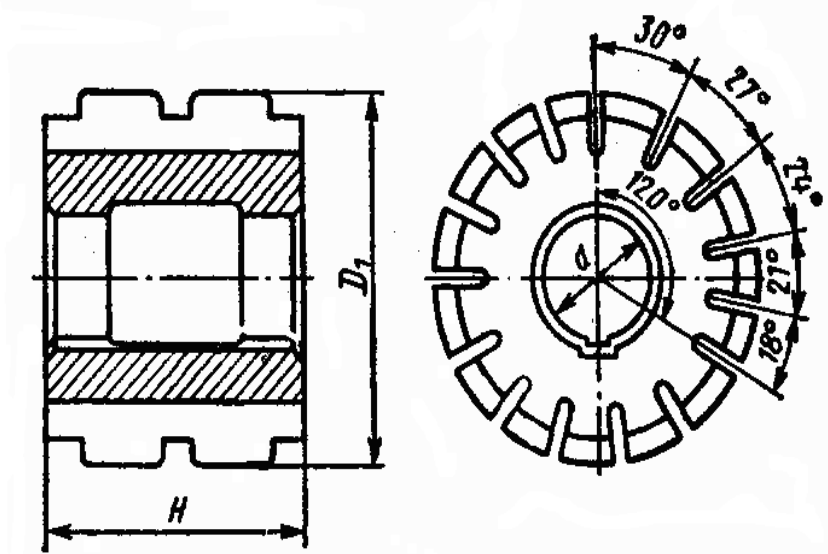


Рис. 7. Накатной ролик для правки фасонных шлифовальных кругов

При правке шлифовального круга тем или иным способом с его рабочей поверхности периодически снимается слой затупившихся абразивных зерен, связки и налипшего металла. Толщину этого слоя определяют в зависимости от требования на исправление геометрической формы и микропрофиля рабочей поверхности круга. Часто толщину  $h$  снимаемого при правке слоя устанавливают в несколько раз большей, чем это необходимо для восстановления режущих свойств и формы рабочей поверхности круга. При повышенном значении  $h$  не только излишне расходуются шлифовальные круги и правящий инструмент, но в значительной степени увеличивается время правки. Установление рациональной величины  $h$  позволяет повысить срок службы шлифовального круга и правящего инструмента и улучшить технико-экономические показатели операции шлифования.

Минимальная, но достаточная толщина слоя абразива, снимаемая при правке,

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (9)$$

где  $h_1$  – величина биения круга при вращении;  $h_2$  – высота волнистости на круге, возникающая вследствие его неравномерного износа из-за вибраций,

мкм;  $h_3$  – разновысотность затупленных вершин абразивных зерен на рабочей поверхности круга, мкм;  $h_4$  – закругление крайних участков рабочей поверхности круга, нарушающее прямолинейность образующей, мкм.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя вариант задания (табл. 2 приложения).
2. Подготовить таблицу для записи результатов расчетов и зарисовать схемы неуравновешенности шлифовального круга от погрешностей его установки и геометрической формы (по аналогии с табл. 1).
3. Согласно полученному варианту, по формулам (1)–(5) произвести расчет частных неуравновешенных масс (до и после правки круга), вызванных:
  - зазором между посадочным диаметром круга и планшайбой ( $B_c$ );
  - эксцентриситетом посадочного диаметра круга относительно наружного ( $B_e$ );
  - непараллельностью торца круга ( $B_n$ ).
 Полученные данные занести в таблицу.
4. По формуле (8) определить суммарную неуравновешенность круга.

### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите причины возникновения автоколебаний при шлифовании.
2. Назовите основные причины, вызывающие появление неуравновешенности у шлифовальных кругов.
3. Как проводится оценка неуравновешенности кругов?
4. Какие существуют средства для балансировки шлифовальных кругов?
5. Перечислите основные методы правки кругов.

### 5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

1. Изучить методы балансировки алмазных и эльборовых кругов. Абразивная и алмазная обработка материалов. (Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 304 с.; §2.3, с. 88) (1 час).
2. Подробно ознакомиться с нормами неуравновешенности шлифовальных кругов. (Теория и практика балансировочной техники. – Москва: Машиностроение, 1973, В. П. Захаров, с. 382–387) (1 час).

Таблица 1

## Допустимые неуравновешенные массы (г) кругов

Масса круга, кг	Класс неуравновешенности			
	1	2	3	4
0,2–0,25	2,5	4,0	6,0	12,0
0,25–0,3	2,5	4,5	7,0	14,0
0,3–0,4	3,0	5,0	7,5	15,0
0,4–0,5	3,5	5,5	9,0	17,0
0,5–0,63	4,0	6,0	10,0	20,0
0,63–0,8	4,5	7,0	11,0	22,0
0,8–1,00	5,0	7,5	12,0	25,0
1,00–1,25	5,5	9,0	14,0	27,0
1,25–1,6	6,0	10,0	15,0	30,0
1,6–2,00	7,0	11,0	17,0	35,0
2,00–2,50	7,5	12,0	20,0	40,0
2,50–3,00	9,0	14,0	22,0	45,0
3,00–4,00	10,0	15,0	25,0	50,0
4,00–5,00	11,0	17,0	27,0	55,0
5,00–6,30	12,0	20,0	30,0	60,0
6,30–8,00	14,0	22,0	35,0	70,0
8,00–10,0	15,0	25,0	40,0	75,0
10,0–12,5	17,0	27,0	45,0	85,0
12,5–16,0	20,0	30,0	50,0	95,0
16,0–20,0	22,0	35,0	55,0	110,0
20,0–25,0	25,0	40,0	60,0	120,0
25,0–30,0	27,0	45,0	65,0	135,0
30,0–40,0	30,0	50,0	75,0	150,0
40,0–50,0	35,0	55,0	85,0	170,0
50,0–63,0	40,0	60,0	95,0	190,0
63,0–80,0	45,0	65,0	110,0	215,0
80,0–100	50,0	75,0	120,0	240,0
100–125	55,0	85,0	135,0	270,0
125–160	60,0	95,0	150,0	300,0
160–200	70,0	110,0	170,0	340,0
200–250	75,0	120,0	190,0	380,0
250–300	85,0	130,0	210,0	420,0

Таблица 2

## Варианты заданий

№ вар.	$D$ , мм	$d$ , мм	$H$ , мм	$c$ , мм	$e$ , мм	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta H$ , мм	$\Delta D$ , мм
1	250	51	50	0,1	0,1	2,0	0,15	1,5
2	300	76	63	0,1	0,2	2,0	0,25	2
3	300	32	32	0,2	0,3	2,3	0,35	2
4	400	127	100	0,2	0,4	2,7	0,45	1
5	450	203	100	0,3	0,5	2,5	0,55	2,5
6	450	127	80	0,3	0,6	2,1	0,65	2
7	500	203	125	0,4	0,7	2,0	0,75	2,5
8	500	305	125	0,4	0,8	2,4	0,85	3
9	600	203	125	0,5	0,9	2,6	0,95	2
10	750	305	50	0,5	1,0	2,9	1,05	2,5
11	750	305	160	0,6	1,1	2,2	1,15	3
12	900	305	80	0,6	1,2	2,3	1,25	2,5
13	900	305	125	0,7	1,3	2,5	1,35	3
14	1060	305	63	0,7	1,4	2,6	1,45	2
15	1060	305	100	0,7	1,5	2,3	1,55	3



## Лабораторная работа №6

# ОЦЕНКА РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- ознакомление с понятием режущей способности шлифовальных инструментов;
- освоение методов оценки режущей способности различных абразивных инструментов, а также свободного абразива.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В общем случае под режущей способностью абразивного инструмента понимают количество снятого материала за определенный период времени обработки. Как правило, за показатель режущей способности принимают разность массы шлифуемого образца до обработки и после (весовой метод) либо разность его линейных размеров до и после обработки (размерный метод). На данный показатель существенно влияют зернистость, форма зерна, а также марка абразивного материала.

## 3. ОЦЕНКА РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВОБОДНОГО АБРАЗИВА

Режущие свойства абразивных материалов обычно оценивают по параметру, именуемому режущей (или абразивной) способностью. Для обеспечения возможности определения и сравнения режущей способности различных абразивов в одинаковых условиях, которые желательно формировать максимально адекватными условиям их реальной эксплуатации, требуется владеть соответствующей методикой испытаний и необходимым оборудованием.

### 3.1. Методы оценки режущих свойств абразивных материалов

Стандартным методом оценки режущих свойств абразивных материалов является метод истирания специального диска испытуемым абразивом. Для алмазных микропорошков для этой цели используют ГОСТ 9206–80 и прибор модели УАС-2М, а для абразивных шлифматериалов применяют МУ2-036-104-85, МУ2-036-058-82 (разработка ВНИИАШ) и прибор типа «Шлиф».

Суть метода состоит в том, что некоторое количество испытуемого свободного абразива помещается между двумя вращающимися и прижимаемыми с определенным усилием друг к другу дисками. В результате царапания частицами абразива поверхностей дисков происходит постепенное их

изнашивание, по величине которого судят об эффективности обработки данным абразивом.

В настоящее время, применительно к абразивным шлифматериалам и прибору «Шлиф-2», метод характеризуется следующими параметрами:

- истиранию подвергается стеклянный диск (стекло марки К8, диаметр диска 50 мм);
- истирание ведется водной суспензией испытуемого абразива (20–25 капель дистиллированной воды на навеску испытуемого шлифматериала);
- истирание ведется на притире из стекла (К8), стали (Ст.3) или чугуна диаметром 110 мм;
- прижатие испытательного диска к притиру осуществляется грузом, вес которого зависит от зернистости испытуемого абразива: 5,85 кг – для микрошлифпорошков и 2,0 кг – для шлифпорошков;
- частота планетарного вращения водила – 59 об/мин, планшайбы – 91 об/мин.

Режущая способность абразива определяется после совершения планшайбой определенного числа оборотов (для микрошлифпорошков – 58, шлифпорошков – 180) путем установления на аналитических весах потери массы испытательного диска.

За результат измерений принимают среднее арифметическое значение трех отдельных испытаний.

Среди других методов оценки режущих свойств абразивных материалов известны такие, как:

- резание единичным зерном, закрепленным во вращающемся диске;
- царапание единичным зерном обрабатываемого материала на низких скоростях относительного линейного движения;
- метод динамического абразивного изнашивания.

В качестве критерия оценки режущих свойств в этих методах используют различные показатели, такие как: предельная толщина срезанной стружки, длина резания, удельная производительность, работа резания, коэффициент шлифования.

Анализируя все названные методы, включая и стандартный, можно заметить, что выбор и применение их весьма произвольны и практически никак не связаны с реальными условиями последующей работы испытуемого абразива. Более обоснованно было бы проводить испытания абразива именно в тех условиях, в которых он впоследствии будет эксплуатироваться. В этом случае появляется гарантия того, что найденная величина режущей способности будет достаточно точно характеризовать поведение данного абразива в реальном процессе шлифования.

Абразивные материалы предназначены для шлифования, и, следовательно, наиболее целесообразно при определении их режущих свойств воспроизводить условия реального процесса шлифования.

### 3.2. Определение режущей способности абразивных материалов в условиях реального процесса шлифования

Для определения режущей способности зерен в условиях, удовлетворяющих всем признакам реального процесса шлифования, разработан специальный метод. По своему содержанию он является дальнейшим развитием работ в области использования абразива, уплотненного действием центробежных сил.

Суть метода состоит в том, что получение связанного абразива без использования связки достигается за счет действия центробежных сил на совокупность свободных шлифовальных зерен, перемещаемых в пространстве по кривой траектории. При таком движении на каждое единичное зерно воздействует центробежная сила. Под действием этой силы отдельные зерна прижимаются друг к другу и образуют некоторый слой из псевдозакрепленных частиц. Существование данного слоя, как целостного тела, целиком зависит от наличия центробежных сил, при отсутствии которых слой тут же распадается. Образовав данный слой, зерна приобретают свойства шлифовального инструмента, поэтому, при прижатии к слою образца обрабатываемого материала, начнется процесс шлифования. Оценивая эффективность этого процесса, можно определять режущую способность свободных шлифовальных зерен.

В качестве средства перемещения шлифовальных зерен по кривой траектории в предлагаемом методе используется пустотелый барабан, имеющий возможность вращаться вдоль горизонтальной оси. Подвод и прижатие неподвижных (либо вращающихся) обрабатываемых деталей к слою зерен могут быть осуществлены так, как показано на рис. 1.

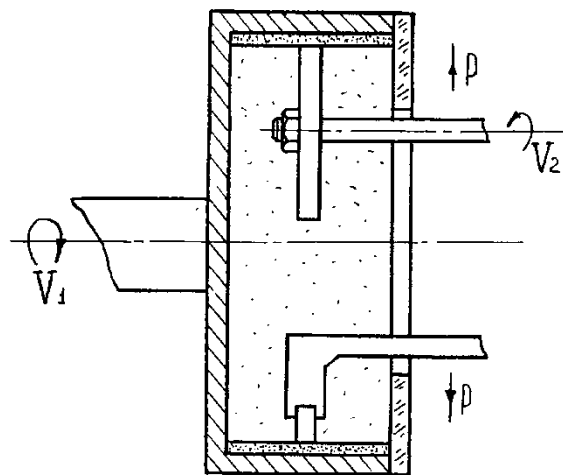


Рис. 1. Обработка шлифовальным слоем неподвижной и вращающейся деталей

Оценка режущей способности абразивов по данному методу производится следующим образом.

Предварительно взвешенную обрабатываемую деталь вводят с помощью кронштейна внутрь вращающегося барабана и, после закрепления кронштейна в держателе ползуна, плавно прижимают к шлифовальному слою грузом. В течение некоторого времени ведут обработку детали, после чего ее вынимают и взвешивают на аналитических весах. Режущая способность испытуемого абразива определяется как разность массы детали до и после испытаний.

Метод дает возможность оценивать режущую способность любых абразивных частиц. Это могут быть шлифовальные зерна, частицы связки или механическая смесь частиц связки с зернами. При испытании частиц связки можно установить долю, вносимую ими в общий процесс резания инструмента. Смесь частиц связки (с размерами, соответствующими соединительным мостикам связки в инструменте) с зернами позволяет моделировать ту или иную структуру шлифовального инструмента и находить ее оптимальное сочетание, не прибегая к непосредственному изготовлению инструмента.

### 3.3. Оборудование и материалы

1. Токарно-винторезный станок мод. 1К62 с закрепленным в патроне специальным барабаном для размещения свободного абразива (см. рис. 1).
2. Лабораторные весы с точностью отсчета не менее 0,001 г.
3. Стальные обрабатываемые образцы.
4. Навески испытуемого абразивного материала.

### 3.4. Подготовка и проведение испытаний

1. Взвесить стальной образец на весах.
2. Засыпать абразивный материал в барабан.
3. Закрепить образец в специальном держателе и прижать к шлифовальному слою грузом.
4. Установить режимы испытания, указанные в табл. 1.
5. Согласно установленным режимам произвести обработку.
6. Повторно взвесить образец.
7. Определить режущую способность ( $Q$ ) свободного абразива как разность масс образца до и после испытаний.
8. По результатам нескольких испытаний построить график зависимости  $Q = f(N)$ , где  $N$  – количество опытов.

Таблица 1

Режимы испытаний		
Скорость вращения барабана, об/мин	Усилие прижатия образца, Н	Время обработки, с
1 000	7	60

#### 4. ОЦЕНКА РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Для процесса работы шлифовальных кругов характерно самозатачивание, составляющее одно из основных отличий абразивного инструмента от лезвийного. Оно состоит в том, что в результате выкрашивания абразивных зерен появляются новые острые режущие кромки, а при достаточно большом размерном износе в работу вступает новый ряд абразивных зерен, что позволяет сохранить высокую режущую способность круга в течение сравнительно длительного периода времени.

Ухудшение режущих свойств круга, вызванное затуплением абразивных зерен и налипанием на них металла, приводит к увеличению силы резания и температуры шлифования и, в конечном итоге, к ухудшению точности и качества обработки. Исходя из сказанного, важно не только оценивать режущую способность и износ круга, но и принимать меры, обеспечивающие его оптимальную работу.

Режущая способность шлифовальных кругов (приведенная к единице высоты круга)  $Q_m$ , мм<sup>3</sup>/мин, рассчитывается по формуле (ГОСТ Р 52781–2007):

$$Q_m = \frac{W_m}{t_m B_k}, \quad (1)$$

где  $W_m$  – объем снятого металла, мм<sup>3</sup>;  $t_m$  – машинное время шлифования, мин;  $B_k$  – высота круга, мм.

По массовому методу режущая способность определяется следующим образом:

$$Q = \frac{m_1}{m_2}, \quad (2)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно масса испытуемого стального образца до испытаний и после.

Важной эксплуатационной характеристикой шлифовальных кругов является также коэффициент шлифования, который определяется по формуле

$$K = \frac{W_m}{W_a}, \quad (3)$$

где  $W_m$  – объем снятого металла, мм<sup>2</sup>;  $W_a$  – объем изношенной части шлифовального круга, мм<sup>2</sup>.

Помимо показателей режущей способности и коэффициента шлифования о качестве шлифовального инструмента можно судить по его износу.

Для оценки износа кругов обычно используют два показателя:

1) среднюю скорость износа, т. е. количество (по объему и массе) сошлифованного обрабатываемого материала в единицу времени работы круга  $Q_a$  (см<sup>3</sup>/мин, г/мин, мг/мин), иногда величину  $Q_a$  относят к единице высоты круга;

2) удельный износ, т. е. объемное или массовое количество изношенного абразива, отнесенное соответственно к единице объема или массе сошлифованного металла  $q$  (см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>, мг/г). Количественную оценку изменения формы и размеров круга вследствие износа, необходимую для вычисления величин  $Q_a$  и  $q$ , производят непосредственным измерением его размеров или взвешиванием круга.

#### 4.1. Оборудование и материалы

1. Плоскошлифовальный станок мод. 3Г71.
2. Лабораторные весы с точностью отсчета не менее 0,01 г.
3. Стальные образцы в виде плоских прямоугольных пластин.

#### 4.2. Подготовка и проведение испытаний

1. Взвесить стальной образец на весах.
2. Закрепить образец на магнитном столе плоскошлифовального станка.
3. Установить режимы испытания, указанные в табл. 2.
4. Согласно установленным режимам произвести обработку.
5. Повторно взвесить образец.
6. По формуле (2) определить режущую способность ( $Q$ ).
7. По результатам нескольких испытаний построить график зависимости  $Q = f(N)$ , где  $N$  – количество опытов.

Таблица 2

Режимы испытаний			
Материал образца	Скорость резания, м/с	Продольная подача, м/мин	Время обработки, мин
Сталь 45	33	3	5

### 5. ОЦЕНКА РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ШКУРОК

Метод определения режущей способности шлифовальных шкурок на тканевой основе регламентирован ГОСТ 5009–82, а для бумажных шлифовальных шкурок – ГОСТ 6456–82.

Суть метода заключается в следующем. Производят шлифование эталонного стержня из калиброванной стали марки 45 образцом шлифовальной шкурки в течение определенного времени. Затем производят измерение дли-

ны сошлифованного участка стержня. Режущую способность ( $Q$ , мм<sup>3</sup>/мин) определяют как отношение объема сошлифованной части эталонного стержня к продолжительности цикла шлифования:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (4)$$

где  $V$  – объем сошлифованной части эталонного стержня, мм<sup>3</sup>;  
 $t$  – продолжительность цикла шлифования, с.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h = \pi r^2 h, \quad (5)$$

где  $d$  и  $r$  – соответственно диаметр и радиус эталонного стержня;  $h$  – высота сошлифованной части эталонного стержня.

### 5.1. Оборудование и материалы

#### 1. Прибор для испытания.

Схема прибора для определения режущей способности шлифовальных шкурок на тканевой основе показана на рис. 2.

#### 2. Штангенциркуль с погрешностью 0,05 мм.

#### 3. Образцы шлифовальной шкурки длиной 680 мм и шириной 20 мм.

#### 4. Стержень из калиброванной стали марки 45 по ГОСТ 1051–73 диаметром 10 мм и длиной 300 мм.

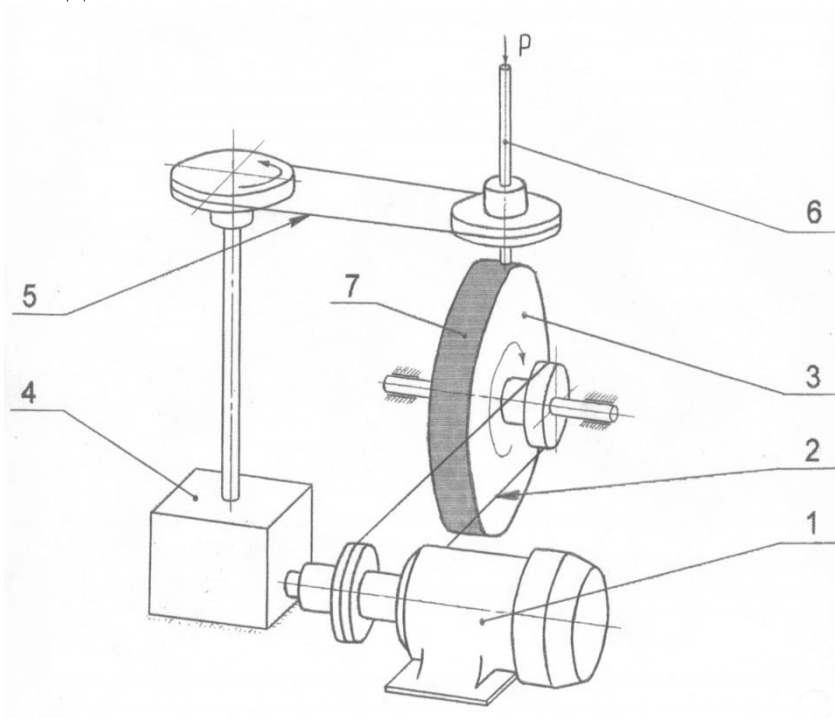


Рис. 2. Схема прибора для контроля режущей способности шлифовальных шкурок на тканевой основе

Электродвигатель (1) передает вращение по двум кинематическим цепям. Первая цепь – через клиноременную передачу (2) на барабан (3). Вторая цепь – через червячный редуктор (4), клиноременную передачу (5) на стержень (6). На барабане закрепляется образец шлифовальной шкурки (7).

## 5.2. Подготовка и проведение испытаний

1. Закрепить образец шлифовальной шкурки на барабане прибора и шлифуемый стержень в патроне-держателе.
2. Установить режимы испытания, указанные в табл. 3.
3. Стержень в процессе испытания прижимается к образцу шлифовальной шкурки при помощи грузов, а после каждого цикла меняется или охлаждается до комнатной температуры.
4. После осуществления цикла шлифования производится измерение длины сошлифованного участка стержня штангенциркулем с погрешностью 0,05 мм.
5. Режущую способность ( $Q$ ) определить по формуле (4).
6. По результатам нескольких испытаний построить график зависимости  $Q = f(N)$ , где  $N$  – количество опытов.

Таблица 3

Режимы испытаний

Зернистость	Скорость шлифования, м/с	Частота вращения стержня, мин <sup>-1</sup>	Радиальная нагрузка, Н	Продолжительность цикла шлифования, с
4–5	15	36	19,6	60
6–8			29,4	
10–16			39,2	40
20–50			44,1	20
40–25			63,6	10

## 6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить задание (по усмотрению преподавателя определяется режущая способность либо свободного абразива, либо шлифовальных кругов, либо шлифовальных шкурок).
2. Согласно пп. 3.4, 4.2 и 5.2, в зависимости от задания, провести испытания, в результате которых определить значения режущей способности предложенных абразивных инструментов или материалов.



## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что понимают под режущей способностью абразивных инструментов?
2. Назовите основные методы оценки режущих свойств абразивных материалов.
3. Как определяется режущая способность абразивных материалов в условиях реального процесса шлифования?
4. Как производится оценка режущей способности шлифовальных кругов?
5. Как производится оценка режущей способности шлифовальных шкурок на тканевой основе?
6. Опишите схему прибора для определения режущей способности шлифовальных шкурок.

## **8. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Изучить показатели режущей способности различных абразивных материалов (Коротков А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов : монография / А. Н. Коротков. – Кемерово, 2006. – 232 с. Гл. 4.4, с. 154) (1 час).
2. Ознакомиться с методикой определения режущей способности бумажной шлифовальной шкурки. ГОСТ 6456–82 (прил. 2) (1 час).

## Лабораторная работа №7

### ПРИТИРКА ДЕТАЛЕЙ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

– освоение теоретических основ процесса притирки, а также практических приемов ее выполнения.

#### 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ ПРИТИРКИ

##### 2.1. Основные характеристики процесса притирки

Притирка (доводка) – процесс окончательной чистовой механической обработки материалов. Притиркой могут быть достигнуты следующие параметры обработанной поверхности: шероховатость по  $R_z$  до 0,01 мкм, отклонения формы и расположения поверхностей до 0,05 мкм. Особая разновидность притирки – доводка – дополнительно позволяет получить точность размеров изделия по 2–3 качеству точности.

По сравнению с другими методами чистовой обработки притирка обеспечивает наивысшие показатели качества, но в то же время она оказывается наименее производительной по причине малого съема материала и значительного количества промежуточных переходов. Вследствие этого притирка эффективна для обработки высокоточных поверхностей небольшой площади на изделиях из любых материалов (рабочих поверхностей мерительного инструмента, фасок седел клапанов гидроаппаратуры, мелких изделий из керамики, кристаллов полупроводников и т. п.).

Сущность процесса притирки (рис. 1) состоит в съеме материала с обрабатываемой поверхности изделия (поз. 2) посредством рабочего инструмента – притира (поз. 1).

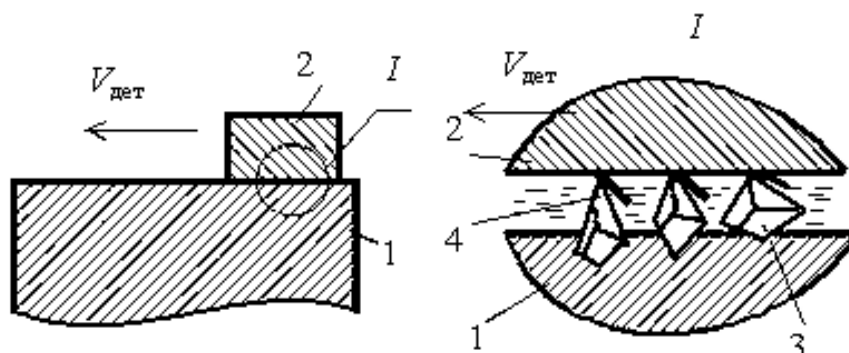


Рис. 1. Сущность процесса притирки

Притир имеет рабочую поверхность, в которую вдавлены (шаржированы) зерна абразивного материала (поз. 3). В процессе взаимного перемещения изделия относительно притира при контакте рабочей поверхности при-

тира с изделием зерна абразива снимают микростружки с обрабатываемой поверхности (поз. 4).

## **2.2. Разновидности притирки, их особенности, классификация, области применения**

### **2.2.1. Кинематика процесса притирки**

Для осуществления притирки необходимо наличие относительного перемещения сопряженных поверхностей притира и изделия, а также их прижим друг к другу с некоторой постоянной силой. В зависимости от способа приведения в движение притира и изделия различают ручную, машинно-ручную и машинную притирку.

Качество и стабильность результатов обработки при ручной (машинно-ручной) притирке хуже, чем при машинной, но она применяется в единичном производстве, для изделий с труднодоступными или фасонными поверхностями. Ручным способом также притираются мелкие изделия, которые вручную прижимаются и перемещаются по поверхности неподвижного притира.

Машинно-ручным способом обрабатываются более крупные изделия, особенно при притирке поверхностей вращения. Изделие закрепляется на любом подходящем оборудовании (например, на токарном станке) и приводится им в движение, а прижим притира и перемещение его вдоль поверхности изделия осуществляются вручную.

Машинная притирка позволяет достичь наилучшей точности и стабильности результатов обработки. Данным способом обрабатываются большие партии однотипных изделий или изделия с плоской поверхностью большой площади. Процесс притирки осуществляется на специальном оборудовании – притирочно-доводочных станках, которое приводит в движение притир и изделие и обеспечивает их постоянный прижим друг к другу.

В настоящее время выпускается обширная гамма притирочных станков – модели 3803, 3805, 3809, 3813Б, 3Б814, 3Е816, 3Д817 и прочие. Эти станки различаются между собой кинематикой обработки (рис. 2), формой обрабатываемой поверхности изделия, количеством одновременно притираемых изделий и прочими характеристиками.

Притир (поз. 1) обрабатывает изделие (поз. 2), установленное в приспособлении (поз. 3), причем одновременно обработке может подвергаться несколько мелких изделий.

В процессе обработки в движение приводятся как изделие, так и притир это позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности и получить равномерный износ всей поверхности притира.

В большинстве случаев рабочая поверхность притира полностью перекрывает поверхность изделия, что позволяет обойтись без движения подачи, в противном случае необходимо перемещение притира вдоль обрабатываемой поверхности.

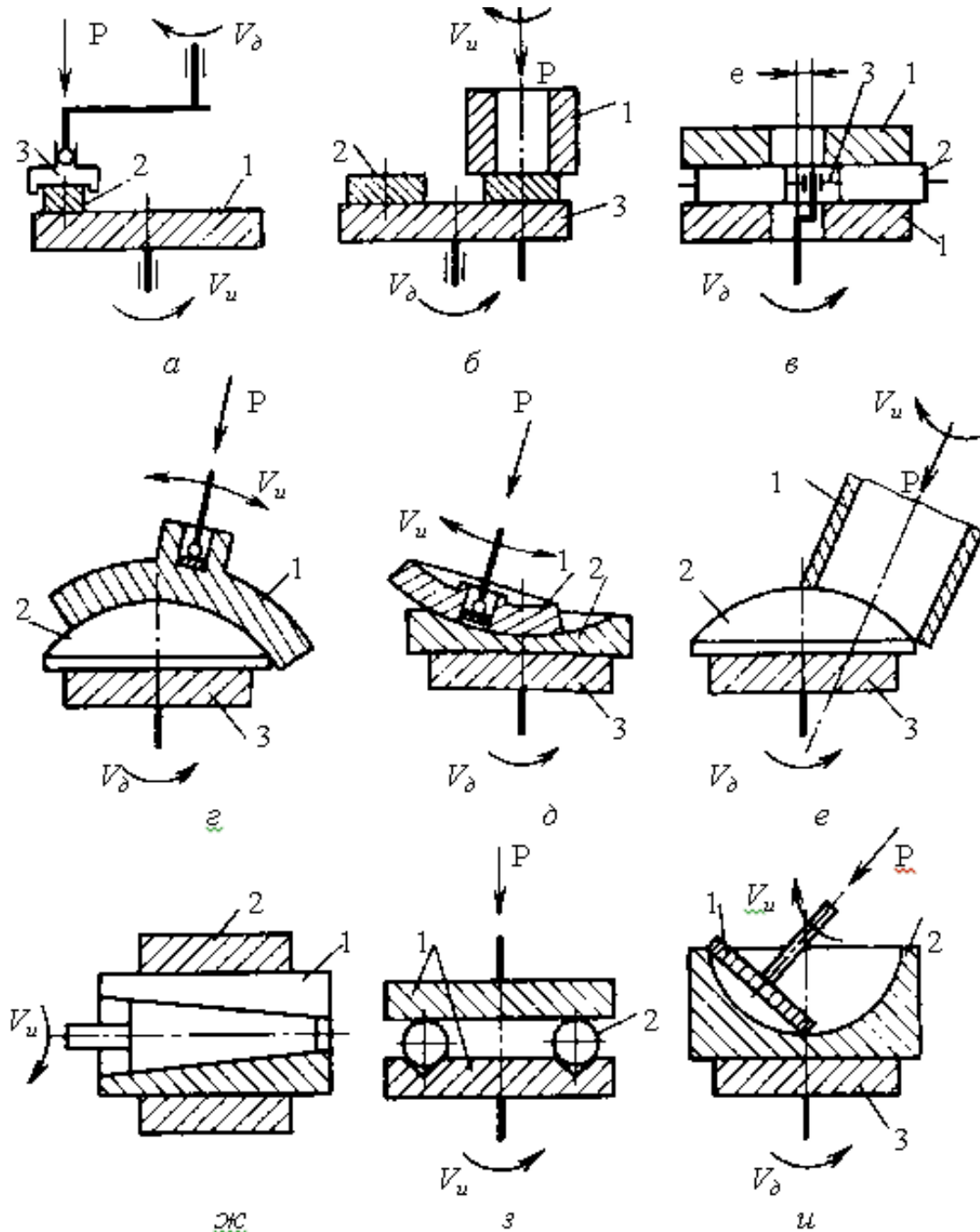


Рис. 2. Разновидности машинной притирки

При притирке мелких деталей в серийном производстве выгодно обрабатывать их по несколько штук одновременно. Для их установки на станке применяют специальные многопозиционные обоймы. Изделия определенных форм (например, шарики) можно обрабатывать между двумя притирами без крепления, что существенно повышает производительность процесса.

В зависимости от требуемых параметров обработки крепление притира и изделия на станке может быть либо жестким, либо шарнирным (плавающим). Во втором случае притир может самоустанавливаться по обрабатываемой поверхности.

### 2.2.2. Притиры

При выборе материала притира руководствуются следующими соображениями:

- материал притира (или какая-либо его структурная составляющая, как для чугуна) должен быть мягче, чем материал изделия, для обеспечения шаржирования притира абразивом;
- адгезия между материалами притира и изделия должна быть минимальной;
- притир во время работы должен подвергаться минимальному износу.

В настоящее время наиболее широко применяют притиры из серого чугуна, стали, оптического стекла, твердых пород дерева, цветных металлов и специальных пластмасс. Практически материал притира в каждом конкретном случае выбирается в зависимости от обрабатываемого материала.

На характеристики обработанной поверхности изделия существенное влияние оказывают такие параметры рабочей поверхности притира, как точность ее формы и шероховатость. Поэтому при изготовлении притиров их рабочие поверхности подвергаются точной обработке.

Машинные притиры изготовляют весьма массивными и жесткими с целью минимизации искажения формы их рабочей поверхности от сил прижима и тепловых деформаций. Чугунные притиры выполняются преимущественно цельными, притиры из прочих материалов – сборными с механическим креплением рабочих вставок. Конструкции ручных притиров значительно более разнообразны.

### 2.2.3. Притирочные пасты

Для удобства работы зерна абразива, являющиеся режущими элементами в процессе притирки, связывают в специальные субстанции – мазеобразные или твердые притирочные пасты и жидкие притирочные суспензии. Добавка в эти субстанции специальных активных веществ также позволяет интенсифицировать процесс обработки.

Абразивный материал составляет не более 40 % по массе в абразивной суспензии (пасте). Для притирки применяются мелкозернистые абразивы зернистостью от М40 и мельче. Все применяемые в данном процессе абразивные материалы можно разделить на 3 группы:

- сверхтвердые материалы (алмаз и эльбор);
- искусственные абразивные материалы (электрокорунды и др.);
- материалы для тонкой притирки с низкой абразивной способностью (окись хрома, трепел, крокус и др.).

В притирочные суспензии (пасты) также добавляются в небольшом количестве (3–5 % по массе) поверхностно-активные или химически активные вещества. Эти добавки облегчают процесс удаления припуска, повышая производительность процесса. Поверхностно-активные вещества действуют за счет адсорбционного эффекта, а химически активные – за счет перевода об-

рабатываемого материала в его менее прочные химические соединения. Состав добавок к рабочей субстанции определяется видом обрабатываемого материала.

Основной объем притирочной суспензии (пасты) составляет нейтральное связующее вещество. Для притирочных паст применяются связующие композиции на основе вазелина или парафина различной консистенции, для суспензий – минерального масла для обработки металлов или водно-глицериновой смеси для обработки хрупких неметаллических материалов.

#### **2.2.4. Шаржирование притиров**

Существует два подхода к шаржированию зерен абразива в притир – предварительное шаржирование или шаржирование в процессе работы.

В первом случае абразив накатывают на рабочую поверхность притира специальным инструментом (например, роликом), имеющим высокую твердость, во втором – притир шаржируется сам при работе за счет своей более высокой твердости, чем материал изделия.

При работе притира зерна абразива разрушаются и теряют режущую способность, а также расходуются активные вещества в составе пасты, что приводит к падению производительности обработки.

Поэтому необходимо периодически возобновлять рабочую субстанцию на притире. При его предварительном шаржировании пасту наносят перед самой операцией шаржирования. При шаржировании в процессе работы – пасту наносят на рабочую поверхность притира периодически, а жидкую суспензию равномерно и непрерывно подают на нее посредством специального приспособления.

#### **2.2.5. Выбор параметров процесса притирки**

Производительность процесса притирки весьма невелика, причем чем выше производительность, тем хуже получаются характеристики обработанной поверхности, и наоборот. Поэтому процесс ведут в несколько стадий, изменяя параметры притирки так, чтобы сначала получить максимальную производительность, а в конце – максимальную точность и чистоту поверхности. Для обеспечения наилучших характеристик притирку ведут в четыре стадии: предварительная, получистовая, окончательная, тонкая; но при меньших требованиях часть стадий обработки можно сократить.

Вид абразивного материала и состав пасты (суспензии) выбирают в зависимости от обрабатываемого материала и его механических характеристик. Помимо этого, для тонкой стадии может выбираться абразив с низкой абразивной способностью.

Зернистость абразива в составе пасты последовательно снижается от М40 в предварительной стадии до М1 в тонкой. Давление в контакте притира с деталью также последовательно снижается от 200 кПа в предварительной стадии до 10 кПа в тонкой. Помимо этого, на величину контактного давления

влияют конфигурация изделия и его материал. Скорость главного движения принимают порядка 40 м/мин для предварительной притирки и снижают до 6 м/мин – для тонкой.

Способ предварительного шаржирования наименее производителен и используется в тонкой стадии притирки. Для прочих стадий используется шаржирование при работе, причем способ с непрерывной подачей суспензии наиболее подходит для предварительной стадии.

Доводка осуществляется исключительно машинным способом, причем для получения высокой точности доводимого размера необходимо жесткое крепление изделия и притира на станке. Собственно притирка может осуществляться любым способом, причем при машинной притирке лучше применять плавающее крепление притира (детали), чтобы не вносить дополнительных искажений формы поверхности изделия.

Начальный припуск под притирку оставляется не более 0,05 мм, и по мере прохождения стадий процесса он уменьшается до 0,002 мм для тонкой стадии. При одновременной обработке нескольких изделий необходимо следить, чтобы припуски на обработку у притираемых деталей в одной партии различались между собой не более чем на треть.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя оборудование: притир со сменными рабочими вставками, образцы с основанием, профилограф-профилометр и набор притирочных паст.

2. Подготовить таблицу для записи результатов измерений.

Вес притира:

Вес одного груза:

Диаметр образца:

Число оборотов шпинделя:

Состав притирочной пасты:

№	Зернистость	Контактное давление, г/мм <sup>2</sup>	Время обработки, мин	R <sub>a</sub> , мкм
1	Z <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	0	R <sub>a(нач)</sub>
...			...	...

3. В данной работе процесс притирки реализуется на вертикально-сверлильном станке модели 2Н135. Схема наладки оборудования показана на рис. 3. Установить основание (поз. 8) в тиски (поз. 9), установленные на столе станка.

4. Выбрать интервал замеров шероховатости  $\tau$  (рекомендуется  $\tau = 2\text{--}5$  мин). Выбрать и записать в заголовок таблицы постоянные параметры процесса.

5. Взять образец (поз. 7), измерить начальную шероховатость его торца  $R_{a(\text{нач})}$  профилометром и записать ее в таблицу. При измерении шероховатости поверхности образца для большей точности производить его 3 раза в разных местах и за результат принимать среднее арифметическое трех измерений.

6. Установить образец на основание, закрепив его болтом (поз. 10). При первом закреплении образца проверить совпадение его оси с осью шпинделя станка (поз. 1). При видимом несовпадении переустановить тиски соответствующим образом.

7. Закрепить на притире (поз. 2) тремя винтами рабочую вставку (поз. 6). Надеть на притир 2–3 сменных груза (поз. 5) для создания контактного давления.

8. Рассчитать давление в контакте притира с образцом:

$$P_1 = \frac{4(kp + P_{np})}{\pi D^2}, \text{ г/мм}^2 \quad (1)$$

где  $k$  – число грузов;  $p$  – вес одного груза, г;  $P_{np}$  – вес притира со вставкой, г;  $D$  – диаметр образца, мм.

Занести величину давления в таблицу.

9. Поднять шпиндель станка в крайнее верхнее положение и установить в него притир с грузами, закрепив его шпилькой (поз. 3) и гайками (поз. 4).

10. Нанести на рабочую поверхность вставки притирочную пасту, записав ее зернистость в таблицу.

11. Опустить притир на образец таким образом, чтобы реализовать его плавающее крепление. Шпиндель должен передавать на притир только крутящий момент посредством шпильки, не касаясь его хвостовика.

12. Включить вращение шпинделя и производить обработку образца в течение времени  $\tau$ .

13. Выключить вращение шпинделя. Поднять шпиндель с притиром. Снять образец и протереть его обработанную поверхность мягкой тканью. Измерить ее шероховатость (параметр  $R_a$ ) профилометром.

Занести в таблицу шероховатость и время, прошедшее с начала обработки.

14. Установить образец на основание. Добавить небольшое количество притирочной пасты на рабочую поверхность притира.

15. Повторять пп. 3.11–3.14 пока шероховатость образца не перестанет уменьшаться в течение 3–4 интервалов.

16. Повторить пп. 3.5–3.15, увеличив в 2–2,5 раза количество грузов на притире, рассчитав новое контактное давление и взяв новый образец.

17. Повторить пп. 3.5–3.16, взяв притирочную пасту другой зернистости и сменив рабочую вставку притира (при каждом изменении параметров брать новый образец). Все данные заносить в таблицу.



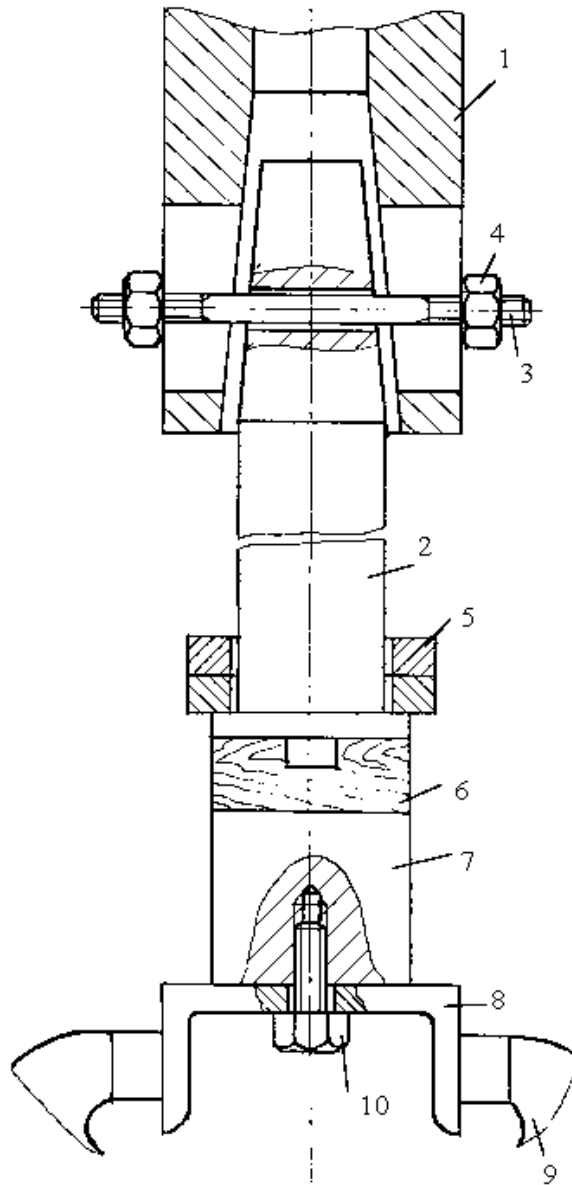


Рис. 3. Схема наладки притира

18. Построить в одной системе координат графики зависимости шероховатости обработанной поверхности образца для всех четырех случаев обработки.

19. Сделать выводы о зависимости производительности притирки и шероховатости обработанной поверхности от зернистости абразива и контактного давления.

#### 4. ОБОРУДОВАНИЕ

1. Притир с набором сменных вставок, грузов и крепежа.
2. Основание с набором образцов для обработки.
3. Набор притирочных паст различной зернистости.

4. Профилограф-профилометр ошупывающего типа для измерения шероховатости.

5. Мягкая хлопчатобумажная ткань для протирки обработанной поверхности перед измерением шероховатости.

## **5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Все измерения и расчеты произвести в соответствии с вышеприведенной методикой. Отчет выполнить на отдельных листах формата А4. Отчет проверяется и подписывается преподавателем.

## **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дать определение притирки и перечислить ее особенности.
2. Что такое шаржирование?
3. Что такое доводка?
4. Классификация разновидностей притирки по способу приведения в движение притира и детали.
5. Способы шаржирования притира.
6. Что такое «плавающее» крепление притира?
7. Из каких материалов изготавливаются притиры и почему?
8. Притирочные пасты (суспензии) – состав, классификация, способы подачи в зону обработки и особенности применения.
9. Каким образом выбираются параметры процесса притирки – давление, скорость и прочие.

## Лабораторная работа №8

# ОЦЕНКА РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕПЕСТКОВЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- изучение структуры и составных компонентов рабочих элементов лепестковых шлифовальных кругов;
- изучение методики оценки режущей способности рабочих элементов лепестковых шлифовальных кругов;
- приобретение практических навыков определения режущей способности рабочих элементов лепестковых шлифовальных кругов.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУКЦИИ ЛЕПЕСТКОВЫХ КРУГОВ

Во многих отраслях народного хозяйства на предварительных и отделочных операциях при обработке различных деталей из конструкционных сталей, жаропрочных и титановых сплавов, пластмасс, различных пород дерева, резины, кожи, стекла, чугуна, алюминия, бронзы, мрамора, фетра и других материалов при плоском, круглом наружном, внутреннем, ленточном и бесцентровом шлифовании используются эластичные абразивные инструменты – лепестковые круги, бесконечные ленты, диски и др. Основными преимуществами обработки данными типами изделий по сравнению с обработкой другими абразивными инструментами являются высокая производительность, качество обработки, как по точности формы, так и по шероховатости поверхности.

В настоящее время отечественной промышленностью шлифовальные лепестковые круги по ГОСТ 22775–77 изготавливаются двух типов: КЛ – без оправки и КЛО – с оправкой (рис. 1).

Помимо конструкций, предусмотренных ГОСТом, существуют многочисленные варианты исполнений данного типа инструмента.

Лепестковые круги обычно состоят из двух основных частей: рабочих органов – лепестков 1 и опорного элемента – ступиц 2, выпускаемых с отверстием (рис. 1, а) под шпиндель станка или с хвостовиком 3 (рис. 1, б) для крепления в ручном инструменте.

Пример условного обозначения лепесткового шлифовального круга типа КЛО, с наружным диаметром  $D = 80$  мм, высотой  $B = 20$  мм, диаметром оправки  $d = 6$  мм, из нормального электрокорунда марки 15А, зернистостью 5-П из шлифовальной шкурки класса А по ГОСТ 5009-82, на сарже средней № 2 гладкокрашеной, класса А:

КЛО 80×20×6 15А 5-П А2 С2Г А ГОСТ 22775-77.

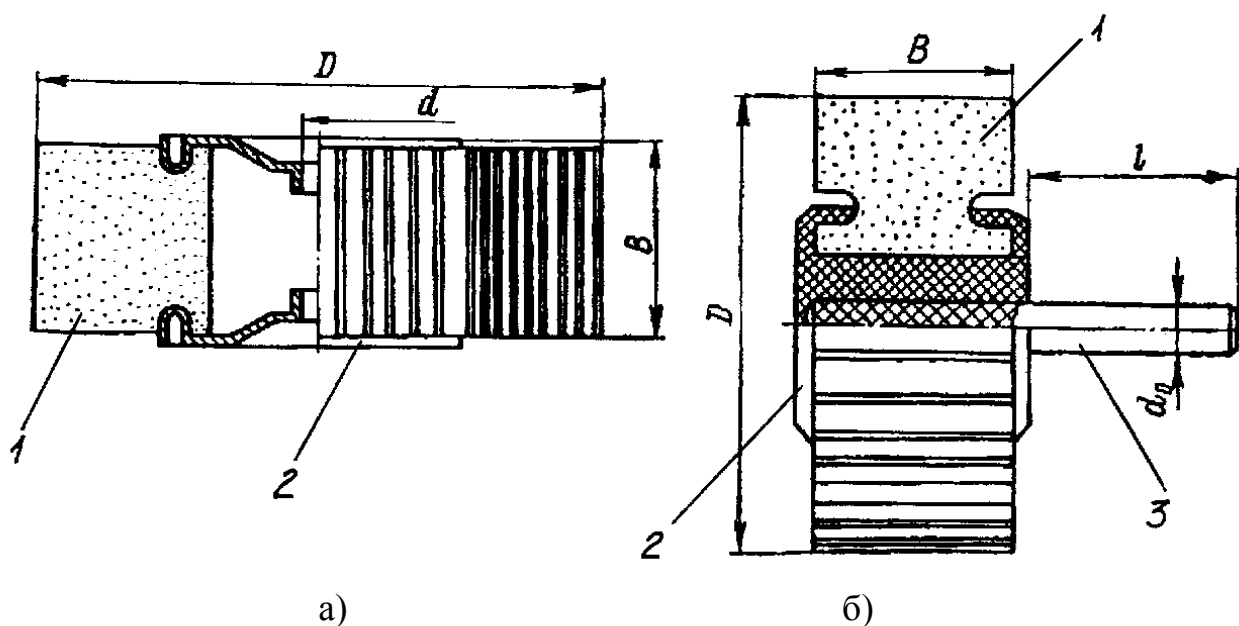


Рис. 1. Конструкция лепестковых кругов:  
а) с отверстием в ступице; б) с хвостовиком

### 3. СТРУКТУРА И СОСТАВ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕПЕСТКОВЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Основной составной частью эластичных абразивных инструментов, в том числе лепестковых шлифовальных кругов, является шкурка. Рабочие элементы лепестковых кругов из шлифовальной шкурки, обладая эластичностью, позволяют успешно обрабатывать сложные криволинейные поверхности деталей. Применение лепестковых кругов позволяет механизировать ручной труд и автоматизировать циклы шлифования и полирования.

В общем случае структура шлифовальных шкурок, из которой изготавливаются рабочие элементы (лепестки) лепестковых кругов (рис. 2) включает в себя: основу, аппрет, основной слой связующего, абразивное зерно, закрепляющий слой связующего.

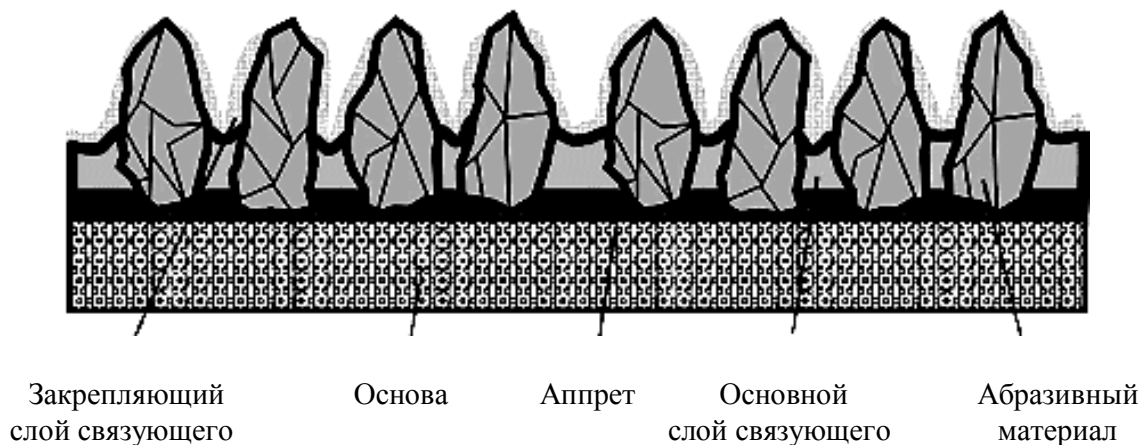


Рис. 2. Структура шлифовальной шкурки

Отечественной промышленностью выпускаются шлифовальные шкурки на бумажных и тканевых основах, различающиеся видами связующего, аппретирующих составов, характеристикой абразивного материала и технологией изготовления.

Для изготовления лепестков используют шлифовальную шкурку на тканевой основе. Шкурка на бумажной основе в связи с низкой прочностью малопригодна.

Выбор основ, клеевых связок и абразивного материала обусловлен режимами шлифования, видом обрабатываемого материала и необходимой шероховатостью поверхности после обработки. Например, тканевые основы, при изготовлении лепестковых кругов, подбираются в зависимости от нагрузок при шлифовании: саржа особо легкая, легкая, средняя применяются при шлифовании со средними нагрузками. Такие ткани, как саржа утяжеленная, полудвунитка, применяются на особо тяжелых операциях. Шифон предназначен для изготовления высокоэластичной шкурки, способной обеспечивать низкую шероховатость поверхности деталей и обрабатывать сложные поверхности.

Выбор абразивного зерна для лепестковых кругов зависит от вида обрабатываемого материала. Для грубого шлифования серого чугуна, горяче- и холоднокатанной стали, вязкой бронзы применяется электрокорунд нормальный; для шлифования алюминия, латуни, меди, бронзы – карбид кремния и электрокорунд нормальный; для шлифования стали – электрокорунд белый; для тонкого шлифования стекла – карбид кремния черный; для шлифования черных и цветных металлов – карбид кремния зеленый. На практике при изготовлении лепестковых кругов используется абразив зернистостью от 50 до М40.

В зависимости от вида применяемых клеевых связок и аппретирующих составов шлифовальные шкурки делятся на неводостойкие и водостойкие, эластичные и жесткие.

Недостатком неводостойкой шлифовальной шкурки является невозможность ее применения на операциях с водным охлаждением и, как следствие, низкая стойкость: абразивный слой осыпается либо засаливается.

Водостойкая шлифовальная шкурка на тканевой основе на синтетических клеях и алкидных лаках наиболее подходит для изготовления лепестковых кругов. Она является универсальной и применяется как для работы с охлаждающими жидкостями, так и для работы без охлаждения.

Эластичные шлифовальные шкурки для чистового шлифования изготавливаются с применением алкидных и масляных лаков. Для тяжелых обдирочных операций при шлифовании трудно обрабатываемых материалов предназначаются жесткие шлифовальные шкурки на синтетических клеях.

Одной из ответственных технологических операций при изготовлении водостойкой шлифовальной шкурки является операция подготовки ткани. Для придания тканевой основе ценных свойств – повышенной износоустойчивости, несминаемости, водостойкости, повышенной прочности ткани на разрыв, эластичности, а также для создания промежуточного слоя, защища-

ющего основу от проникновения клеевой связки, и повышения адгезии между клеевой связкой и основой применяются грунующие и аппретирующие составы. Операция отделки ткани, в результате которой приобретаются указанные свойства, называется аппретированием.

Для аппретирования ткани применяются аппреты на основе латекса СКС-50 и МП на основе поливинилового спирта.

Технические условия изготовления тканевой шлифовальной шкурки изложены в ГОСТ 5009-82.

Данный ГОСТ предусматривает изготовление шлифовальной шкурки из следующих абразивных материалов: нормальный электрокорунд (15А, 14А, Ф14А, 13А, Ф13А), белый электрокорунд (25А, 24А, 23А), легированный электрокорунд (94А, 93А, 92А, 91А), циркониевый электрокорунд (38А), монокорунд (45А, 44А, 43А), зеленый карбид кремния (64С, 63С), черный карбид кремния (55С, 54С, 53С), кремнь (81Кр).

В зависимости от вида абразивных материалов назначается зернистость. Для шкурок на тканевых основах зернистость шлифматериалов следующая: электрокорунда 125-М40, монокорунда 50-6, карбида кремния 80-М40, кремня 80-6.

В качестве основ применяют хлопчатобумажные ткани по ГОСТ 3357-72: саржу особо легкую суровую (ЛО), саржу особо легкую гладкокрашеную (ЛОГ), саржу легкую №1 суровую (Л1), саржу легкую №2 суровую (Л2), саржу легкую №2 гладкокрашеную (Л2Г), саржу среднюю №1 суровую (С1), саржу среднюю №1 гладкокрашеную (Л1Г), саржу среднюю №2 суровую (С2), саржу среднюю №2 гладкокрашеную (С2Г), саржу утяжеленную №1 суровую (У1), саржу утяжеленную №1 гладкокрашеную (У1Г), саржу утяжеленную №2 суровую (У2), саржу утяжеленную №2 гладкокрашеную (У2Г).

В качестве естественных клеев для изготовления неводостойкой шлифовальной шкурки используют мездровый (ГОСТ 3252-80) и казеиновый (ГОСТ 17626-81) клеи, а также водорастворимые карбамидные и фенолформальдегидные смолы.

Водостойкая шлифовальная шкурка на тканевой основе на синтетических клеях является универсальной и применяется как для работы с охлаждающими жидкостями, так и для работы без охлаждения.

Эластичные шлифовальные шкурки для чистового шлифования изготавливаются с применением алкидных и масляных лаков. Для тяжелых обдирочных операций при шлифовании труднообрабатываемых материалов предназначаются жесткие шлифовальные шкурки на синтетических клеях.

Для изготовления водостойкой шлифовальной шкурки на тканевой основе применяют смолы фенолфурфуроформальдегидные (СФЖ-3038, СФЖ-3039, ФМ-3, ФМ-4) и фенолформальдегидные (СФЖ-91, СФЖ-95, СФЖ-114 и др.), масляные, эпоксиэфирные, пентофталевые (алкидные) лаки ЯН-153, ЭЭ-42-3В, ПФ-587, ПФШ-4 и ВР.

Шлифовальная шкурка на тканевой основе изготавливается следующих типов:

1 – для машинной обработки неметаллических материалов, металлов и сплавов низкой твердости и ручной обработки различных материалов;

2 – для машинной и ручной обработки твердых и прочновязких материалов.

Пример условного обозначения тканевой шлифовальной шкурки типа 2, шириной 830 мм, длиной 50 м, на сарже средней №2 суровой, из белого электрокорунда марки 24А, зернистости 40-Н, на мездровом клее, класса А:

2 830×50 С2 24А 40-Н М А ГОСТ 5009–82.

При изготовлении шлифовальной шкурки абразивный материал наносится на основу механическим или электростатическим способом.

При механическом способе абразивный материал плотным слоем рассыпается по всей ширине движущейся основы, покрытой клеем, и вдавливаются в клеевой слой вращающимся валиком. Плохо приклеившиеся или совсем не приклеившиеся абразивные зерна удаляются с помощью специального отбойного приспособления.

При электростатическом способе происходит ориентация абразивных зерен так, что их наибольшая ось располагается перпендикулярно поверхности основы. Таким образом, на основу наносится слой вертикально расположенных зерен, что придает шкурке большую истирающую способность, чем при механическом способе.

#### **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕПЕСТКОВЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Одним из основных параметров шлифовальной шкурки, идущей на изготовление рабочих элементов лепестковых кругов, характеризующих их работоспособность, является режущая способность.

В общем случае под режущей способностью абразивного инструмента, в том числе и шлифовальной шкурки, понимают количество снятого материала за определенный период времени обработки. Как правило, за показатель режущей способности принимают разность массы шлифуемого образца до обработки и после. На данный показатель существенно влияют зернистость, форма зерна, а также марка абразивного материала.

С целью комплексной оценки режущей способности рабочих элементов (лепестков) лепестковых шлифовальных кругов на кафедре металлорежущих станков и инструментов КузГТУ была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3. На данной установке также можно определять режущую способность шлифовальных шкурок, как на тканевых, так и на бумажных основах, предварительно вырезанных в виде диска.

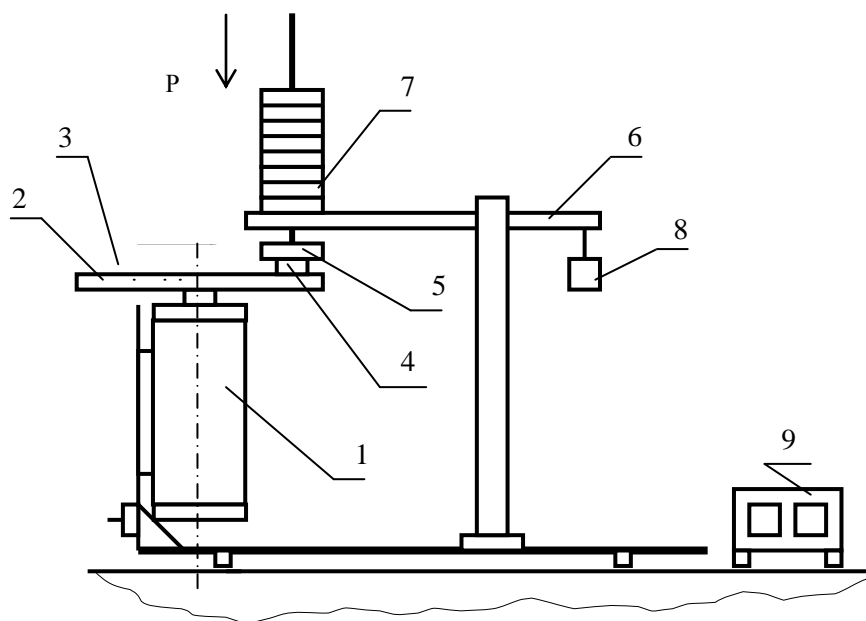


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения режущей способности шлифовальных шкурок, используемых для изготовления рабочих элементов лепестковых шлифовальных кругов

На валу электродвигателя с регулируемым числом оборотов 1 закреплен диск 2, на поверхность которого приклеивается испытуемый образец из шлифовальной шкурки, вырезанный в виде диска 3. Обрабатываемый металлический образец 4 закрепляется в держателе 5, который может перемещаться в вертикальной плоскости. Рычаг 6 в свою очередь имеет возможность движения в горизонтальной плоскости. Под действием набора грузов 7, надеваемых на стержень держателя, обрабатываемый образец прижимается к поверхности шлифовальной шкурки. Частота вращения электродвигателя 1 регулируется с помощью источника напряжения 9.

## 5. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

1. Установка для оценки режущей способности шлифовальных шкурок, используемых для изготовления лепестковых шлифовальных кругов.
2. Образцы шлифовальной шкурки диаметром 150 мм, подлежащие испытанию.
3. Образцы металлические размером 10×10×5 мм.
4. Технические весы с погрешностью взвешивания не более 0,01 г.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Оценка режущей способности шлифовальной шкурки, идущей на изготовление лепестковых кругов, проводится следующим образом. С помощью уравновешивающего груза 8 рычаг 6 приводится в равновесие. Предвари-



тельно взвешенный металлический образец 4 закрепляется в держателе, и подбором груза обеспечивается необходимое усилие прижатия образца к поверхности шкурки. Включается электродвигатель, с помощью регулируемого источника напряжения 9 задается требуемое число оборотов и в течение определенного времени ведется обработка. Затем металлический образец вынимается из держателя и повторно взвешивается. По полученным значениям разности массы образца  $\Delta M$  и определяется режущая способность шкурки.

$$Q = (M_1 - M_2) / t,$$

где  $M_1$  – масса образца до испытания, г;  $M_2$  – масса образца после испытания, г;  $t$  – время проведения испытания, мин.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие элементы входят в состав лепесткового шлифовального круга?
2. Какие параметры заложены в маркировку лепестковых шлифовальных кругов?
3. Из каких составных частей состоит шлифовальная шкурка для изготовления лепестковых кругов?
4. От чего зависит выбор типа основы, вида клеящих веществ и марки абразивных материалов при изготовлении шлифовальных шкурок, применяемых для изготовления рабочих элементов лепестковых кругов?
5. Для чего предназначена операция аппретирования?
6. Какие марки тканей используются для изготовления тканевых основ шкурок?
7. Какие клеящие вещества используются при изготовлении шкурок на тканевых основах?
8. Из каких абразивных материалов изготавливаются шлифовальные шкурки?
9. Какие параметры заложены в маркировку шлифовальных шкурок?
10. Методы нанесения абразива на основу шкурки и их различия.
11. Что такое режущая способность?
12. Опишите принцип действия экспериментальной установки для определения режущей способности шкурки, используемой для изготовления лепестковых кругов.

## Лабораторная работа №9

### ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ЛЕНТ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Работа проводится с целью освоения методики исследования работоспособности шлифовальных лент.

#### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Ленточное шлифование получило большое распространение в различных областях машиностроения. Преимуществами этого метода являются постоянство скорости резания, эластичность и упругость ленты, возможность обработки большой поверхности детали, более низкий уровень силы резания и теплонапряженности по сравнению со шлифованием кругом.

Одной из особенностей шлифования лентой является то, что в зависимости от технологического назначения она может работать в различных режимах. При этом могут создаваться более благоприятные условия для использования режущих свойств ее основных действующих элементов – зерен. Так, они имеют возможность не только самоустанавливаться, но и нивелироваться по высоте и равномерно распределять между собой нагрузку. Кроме того, вследствие возможной подвижности зерен относительно друг друга улучшаются условия для размещения и удаления стружки, а так же затрудняется процесс засаливания. Благодаря обширным зонам контакта инструмента с деталью, большому числу активно работающих зерен здесь создается иной тепловой режим по сравнению с обработкой шлифовальным кругом. В процессе обработки лентой изменяются относительное и абсолютное удлинение ленты, ее толщина и ширина, частота собственных и вынужденных колебаний в поперечном направлении и вдоль оси роликов, условия теплообмена, удаления продуктов шлифования, адгезионного и диффузионного взаимодействия с обрабатываемым материалом. В результате создаются иные, чем при шлифовании кругом, условия резания, теплового и силового воздействия, формирования свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала, происходит возникновение остаточных напряжений меньшей величины, чем при шлифовании кругом. В итоге создаются предпосылки получения более высоких эксплуатационных характеристик у обрабатываемых деталей.

Оценка работоспособности шлифовальных лент может осуществляться по различным критериям. Основными из них являются:

- режущая способность ( $Q$ );
- износ ( $h$ );
- температура в зоне резания ( $T$ );
- мощность, затрачиваемая на резание ( $We$ ).

Методика исследований шлифовальных лент включает установление вышеперечисленных параметров и изучение их влияния на процесс шлифования в зависимости от входных данных.

Режущая способность шлифовальной ленты подсчитывается по формуле

$$Q = \frac{M'_1 - M'_2}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $M'_1$  и  $M'_2$  – масса обрабатываемого образца стали до начала шлифования и после;  $\Delta t$  – время одного эксперимента.

Средняя величина режущей способности шлифовальной ленты определяется по следующей формуле:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (2)$$

где  $Q_i$  – режущая способность  $i$ -го эксперимента;  $n$  – количество экспериментов.

Износ шлифовальной ленты подсчитывается по следующей формуле:

$$h = \frac{m'_1 - m'_2}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $m'_1$  и  $m'_2$  – масса образца шлифовальной ленты до и после шлифования;  $\Delta t$  – время одного эксперимента.

Средняя величина износа шлифовальной ленты определяется по следующей формуле:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \quad (4)$$

где  $h_i$  – износ ленты при  $i$ -том эксперименте;  $n$  – количество экспериментов.

### 3. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Эксперименты проводятся на базе плоскошлифовального станка мод. 3Г71 (рис. 1).

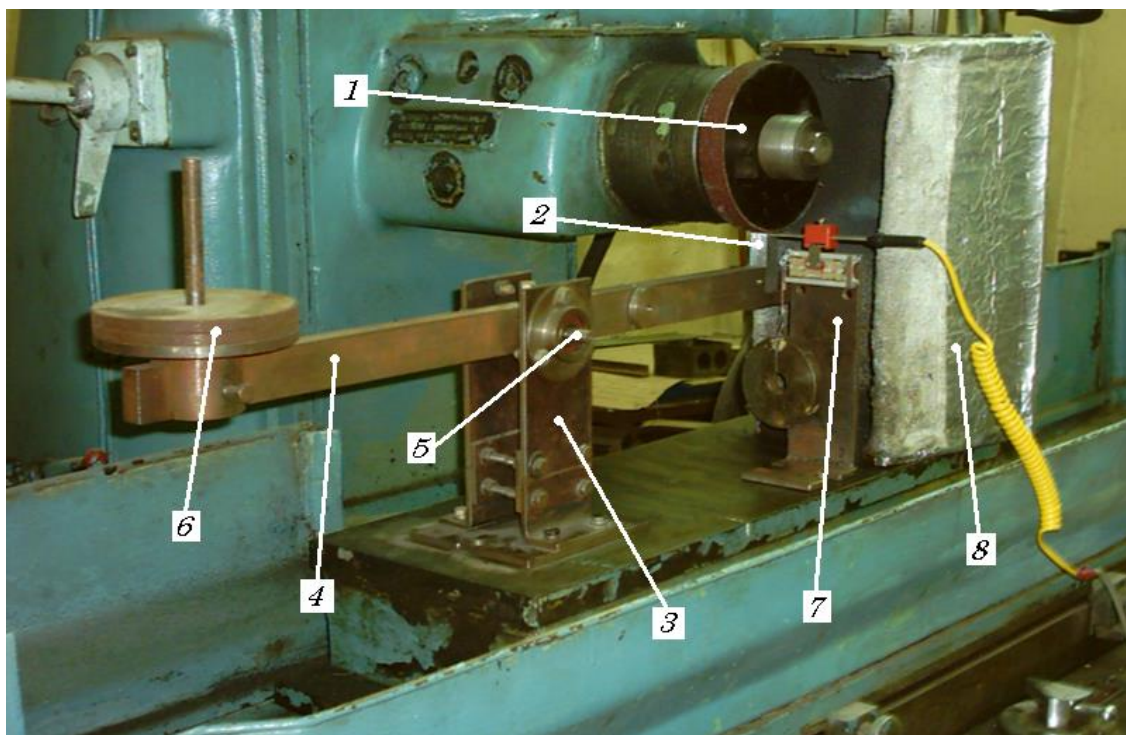


Рис. 1. Общий вид станка мод. 3Г71

Диск с закрепленной шлифовальной лентой 1 (рис. 1) устанавливается на шпинделе станка, а обрабатываемый образец 2 прижимается к ленте посредством балансира 3, установленного на магнитном столе станка. Рычаг балансира 4 может вращаться на оси 5, прижимая образец к ленте с постоянной силой за счет действия груза 6. Приспособление 7 предназначено для измерения температуры в зоне резания. Бункер 8 служит для сбора продуктов резания.

Для измерения разницы масс образца стали и шлифовальной ленты до и после эксперимента используются весы ВЛКТ-500 г – М (4класс) с точностью измерений 0,01 г.

Эксперименты проводятся на образцах  $B \times H \times L = 15 \times 15 \times 45$  мм из стали марки Ст3.

Исследования проводятся на образцах шлифовальной ленты со следующей характеристикой – 2О 408х20 С2 13А 40 Н СФЖ ГОСТ 13344–79 (подчеркнутые элементы характеристики шлифовальной ленты могут меняться).

#### 4. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Параметры режима резания:

- скорость резания ( $V$ ) – 30 м/с;
- нагрузка на обрабатываемый образец ( $N$ ) – 20 Н;
- общее время эксперимента ( $t_0$ ) – 5 мин;
- время одного цикла ( $t$ ) – 1 мин.

#### 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя образцы шлифовальных лент и обрабатываемого материала;
2. Занести в отчет маркировку шлифовальных лент;
3. Взвесить образцы шлифовальных лент и обрабатываемого материала;
4. Закрепить образец шлифовальной ленты на диске и обрабатываемый материал в специальном пазу балансира;
5. После осуществления цикла шлифования произвести измерение массы образцов шлифовальной ленты и обрабатываемого материала;
6. Произвести 5 циклов;
7. По результатам испытаний построить графики зависимостей  $Q = f(n)$  и  $h = f(n)$ , где  $n$  – номер цикла;
8. Рассчитать средние величины режущей способности и износа по формулам (2) и (4);
9. Написать вывод.

## Лабораторная работа №10

### ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ В АБРАЗИВНОЙ МАССЕ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- изучение специфики процесса обработки деталей свободным абразивом;
- приобретение практических навыков обработки деталей;
- обработка результатов проведенных экспериментов.

#### 2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

В современном машиностроении одним из важных методов обработки являются чистовые (финишные) операции, в процессе которых окончательно формируются качественные характеристики поверхностного слоя деталей, которые в большинстве случаев и обуславливают эксплуатационные свойства деталей. Так как многие детали отличаются сложностью форм, финишные или чистовые виды обработки на металлорежущих станках в большинстве случаев затруднены. Поэтому при выполнении финишных операций значительный объем шлифовальных и полировальных работ выполняется вручную. Однако ручные операции не обеспечивают стабильного качества поверхностного слоя. Механизировать выполнение отделочных операций можно путем применения методов обработки деталей свободным абразивом, которые находят все большее применение в отечественном и зарубежном машиностроении.

К методам обработки свободным абразивом относятся:

- струйная абразивная обработка;
- объемная абразивная обработка.

Отличительной особенностью данных методов обработки является то, что абразив находится в свободном, несвязанном состоянии. При обработке деталей этими способами происходит их соударение между собой, со стенками и дном контейнера и абразивным наполнителем при взаимных перемещениях под воздействием планетарного вращения контейнера, простого вращения либо вибраций.

##### 2.1. Струйная абразивная обработка

*Струйная абразивная обработка (САО)* выполняется за счет ударного воздействия абразивных частиц, переносимых высокоскоростной струей жидкости или газа (воздуха). Метод очень производительный и высокоточный, но требует значительных затрат на обработку. Получил широкое рас-

пространение в военно-промышленном комплексе. В общем машиностроении используется редко.

Для струйной абразивной обработки используется оборудование открытого и камерного типа с различной степенью автоматизации рабочего процесса. Достоинством камерных установок является экологическая чистота, а недостатком – ограниченные размеры деталей. Типовая схема камерной установки приведена на рис. 1.

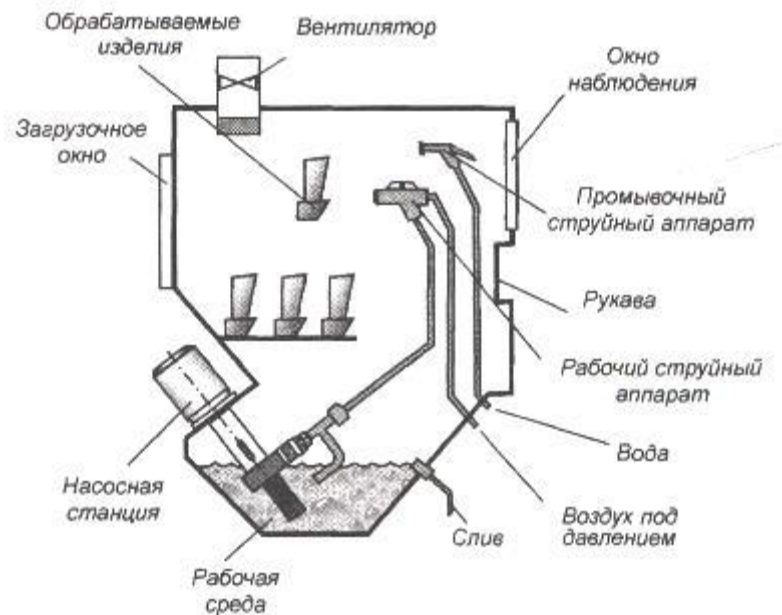


Рис. 1. Схема камерной установки для струйной абразивной обработки

Абразивная суспензия подается в рабочий струйный аппарат насосом. Одновременно в него подается сжатый воздух. Образующаяся абразивная струя воздействует на поверхности обрабатываемых деталей. Перемещение детали относительно абразивной струи может выполняться вручную или с использованием специальных приспособлений, обеспечивающих равномерность обработки. После завершения абразивной обработки может быть выполнена промывка деталей, осуществляемая промывочным струйным аппаратом.

Для САО применяются следующие виды абразивов и частиц:

- *корунд (электрокорунд)*. Используется при подготовке поверхностей к нанесению покрытий, для очистки поверхностей от окалина после термической обработки, финишной обработки с целью снижения шероховатости, очистки заготовок после литья от частиц формовочной смеси, удаления заусенцев, скругления острых кромок, удаления старых металлопокрытий. Обработку производят абразивными частицами размером  $12 \div 325$  мкм при давлении воздуха  $0,1 \div 0,6$  МПа. Широко используется при обработке сталей средней и высокой твердости;

- *карбид кремния*. Служит для тех же целей, что и электрокорунд. Частицы SiC имеют более выраженные и острые грани. Целесообразен при обработке деталей из вязких сплавов и титановых сплавов;

- *стальные угловатые частицы* твердостью 40÷60 HRC размером 10÷325 мкм. Используются для очистки от нагара, снятия заусенцев, старой краски, а также для подготовки поверхностей к нанесению покрытий;

- *стальная дробь* твердостью 20÷60 HRC размерами 8÷200 мкм. Применяется для упрочнения поверхностного слоя, удаления окалина, формирования остаточных напряжений сжатия, снижения пористости;

- *угловатые частицы из закаленного стекла* размером 30÷400 мкм и *стеклянная дробь*. Используются как для процессов очистки, так и поверхностного упрочнения, а также матирования поверхностей в декоративных целях, снижения пористости.

Одним из важных достоинств САО является отсутствие существенного нагрева деталей при обработке.

## 2.2. Объемная абразивная обработка

*Объемная абразивная обработка (ОАО)* имеет ряд преимуществ, обусловленных хаотичным характером взаимодействия частиц различной геометрической формы, содержащих абразивные зерна, с поверхностями детали, что обеспечивает равномерность обработки поверхностей и их высокое качество.

ОАО включает следующие методы:

- центробежную абразивную обработку;
- дисковую абразивную обработку;
- вибрационную абразивную обработку;
- магнитно-абразивную обработку;
- галтовку;
- принудительную обработку свободным абразивом и др.

Эти методы различаются способом обеспечения движения частиц рабочей среды. Рассмотрим некоторые из перечисленных методов, которые нашли наибольшее применение на практике.

### 2.2.1 Вибрационная абразивная обработка

Данный метод заключается в наложении колебаний заданной направленности на систему деталь-инструмент. Метод требует специального технологического оборудования и сложен в реализации, поэтому имеет узкоспециализированное применение на практике.

Виброабразивную обработку осуществляют в контейнерах, заполненных абразивными зернами и жидкостью, в которых размещаются детали. Относительное перемещение зерен абразива и обрабатываемых поверхностей деталей производится за счет сообщения контейнеру колебаний в нескольких направлениях. Виброабразивная обработка позволяет успешно механизиро-



вать трудоемкие операции по очистке, снятию заусенцев и полированию деталей сложной формы.

Обработку в вибробункерах осуществляют по следующей схеме: заготовки и рабочую абразивно-жидкостную среду помещают в контейнер 1, которому сообщают колебательные движения (на схеме показаны стрелками) с помощью специального вибратора (на рисунке – вращающийся от отдельного привода вал 7 с неуравновешенным грузом 8). Контейнер соединен с жесткой рамой 9 через пружины 6 и 10. В контейнер по шлангу 2 подается жидкость из бака 4 с помощью насоса 3, слив из контейнера происходит по шлангу 5.

Возмущающая сила, обусловленная воздействием вибратора, вызывает колебательное движение находящихся в бункере абразивной массы и заготовок, относительные перемещения которых приводят к съему материала с поверхности.

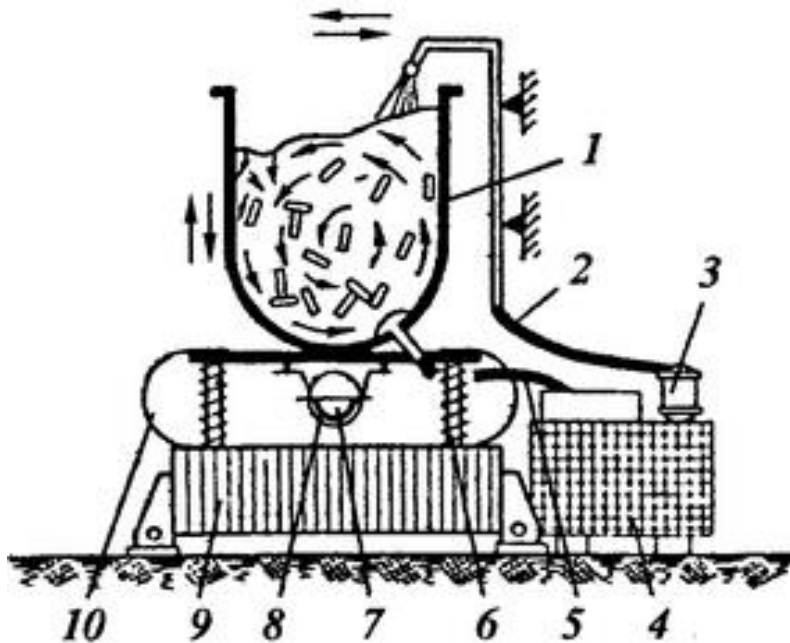


Рис. 2. Схема вибрационной абразивной обработки

Все методы обработки в вибробункерах можно разделить на два вида – «сухой» и «мокрый». При обработке сухим методом в качестве рабочей среды используют абразив. Обработку мокрым методом осуществляют посредством постоянного наполнения бункера жидкостью или подачи ее непрерывной циркуляцией.

Жидкостями для обработки в вибробункерах служат водные растворы химических соединений с различными добавками. Жидкость выполняет следующие функции:

- механически удаляет мелкие фракции наполнителя;
- оказывает физико-химическое разрушающее воздействие;
- удаляет с труднодоступных мест поверхности детали окисные пленки и соли (кислотные растворы); восстанавливает режущие свойства абразива путем обезжиривания (щелочные растворы);

- предохраняет детали от коррозии;
- создает при полировке блестящую поверхность.

Введение в рабочую среду химически активных добавок повышает производительность. Кроме того, химически активные добавки снижают шероховатость поверхности и придают ей блеск и оттенок.

Съем металла при обработке в вибробункерах происходит в результате периодически повторяющихся и накладывающихся друг на друга микроконтактов частиц рабочей среды и заготовок. Непрерывное относительное перемещение заготовок в вибрирующей среде обеспечивает непрерывное изменение их ориентации, нанесение ударов в самых различных направлениях и, как следствие этого, обработку поверхностей любой конфигурации.

Физический механизм снятия материала складывается из:

- микрорезания – царапание металла одним или группой зерен абразива, в результате которого на обрабатываемой поверхности образуются продольные борозды;
- микроударов частиц рабочей среды, приводящих к явлениям наклепа (схватывания) и образования на поверхности кратеров.

Наиболее часто на обработанной поверхности наблюдаются следы от совместного действия этих двух явлений. Таким образом, последовательное нанесение большого числа царапин и лунок и их совмещение определяют съем металла при виброобработке, микрорельеф и физико-механические свойства образующейся поверхности.

Эффективность обработки в вибробункерах оценивается интенсивностью съема металла и достигаемой шероховатостью поверхности.

Съем металла при виброобработке по времени происходит достаточно равномерно с некоторым увеличением в начальный момент, когда происходит округление острых кромок и удаление сравнительно грубых шероховатостей.

Параметры обрабатываемых деталей также влияют на съем металла: повышение веса деталей, снижение их твердости ведут к росту интенсивности съема.

Повышение интенсивности съема металла при абразивной обработке с вибрациями объясняется постоянной сменой рабочих граней, скоростей и углов резания, большим динамическим взаимодействием зерен и обрабатываемого материала, а также увеличением плотности сетки следов абразивных зерен на обрабатываемой поверхности. Все это ведет к снижению действующих сил и температуры, а, следовательно, повышению производительности обработки и качества поверхности. При этом ликвидируются самоотпуск материала поверхности детали, микротрещины, интенсивный наклеп.

### **2.2.2. Магнитно-абразивная обработка**

Сущность магнитно-абразивной обработки (МАО) основана на способности ферромагнитной массы, размещенной в магнитном поле, без каких-

либо механизмов-преобразователей оказывать абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность заготовок.

Данный метод является одним из наиболее перспективных и находит все большее применение в общем машиностроении.

МАО относят к отделочным видам обработки. Движение резания при этом может сообщаться как заготовке, так и инструменту. В первом случае заготовка помещается между полюсными наконечниками электромагнита с некоторыми зазорами, в которые подается порошок, обладающий магнитными и абразивными свойствами. Детали сообщают вращательное и осциллирующее (вдоль оси) движения. Силами магнитного поля зерна ферромагнитного порошка удерживаются в зазорах, и, прижимаясь к поверхности детали, обрабатывают ее. В рабочие зазоры подают также смазывающе-охлаждающие жидкости (СОЖ) – эмульсол, керосин. Принципиальная схема магнитно-абразивной обработки приведена на рис. 3.

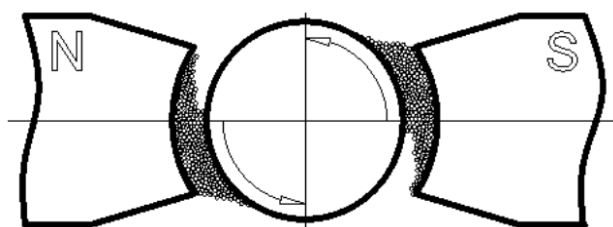


Рис. 3. Схема магнитно-абразивной обработки

МАО применяют для обработки деталей из сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, предварительно обработанных точением, фрезерованием, шлифованием. По сравнению с традиционными методами абразивной обработки МАО обеспечивает повышение производительности труда в 3 раза, а при полировании сферических линз из стекла – в 5÷6 раз. При этом затраты на абразивный инструмент снижаются в 2÷3 раза.

С помощью МАО можно снизить исходную шероховатость с  $Ra = 1,25 \div 3,2$  мкм до  $Ra = 0,08 \div 0,01$  мкм; волнистость – в 8÷10 раз, гранность – в 1,5÷2 раза. Точность размеров и формы – не изменяются. Основные преимущества МАО – возможность обработки сверхтонких изделий ( $h = 0,05 \div 0,5$  мм), изделий неправильной геометрической формы, возможность обнаружения дефектов предшествующей обработки (трещины, прижоги).

В качестве оборудования при МАО используют как универсальные МРС, так и специальные высокопроизводительные установки.

В качестве абразивных материалов для МАО применяют керметы, получаемые прессованием абразивной и ферромагнитной составляющей, а также чугунные и стальные опилки. В керметах абразивная составляющая может быть из электрокорунда белого, карбида хрома, карбида титана, карбида кремния. Оптимальная зернистость колеблется в пределах 125÷315 мкм.

Режимы МАО обусловлены параметрами, характеризующими механическое движение детали и магнитного индуктора, размерами, конфигурацией рабочих зазоров, напряженностью магнитного поля свойствами кермета и СОЖ.

### 2.2.3. Галтовка

Одним из наиболее широко применяемых способов является обработка свободной массой абразива – галтовка. Метод используется главным образом для обработки мелких деталей, которые трудно и нецелесообразно обрабатывать на обычных шлифовально-полировальных станках.

Сущность способа заключается в том, что обрабатываемые детали вместе с абразивным материалом загружаются в барабан (контейнер), которому затем сообщается вращательное движение. На рис. 4 показаны некоторые типы галтовочных барабанов, применяемых при обработке деталей.

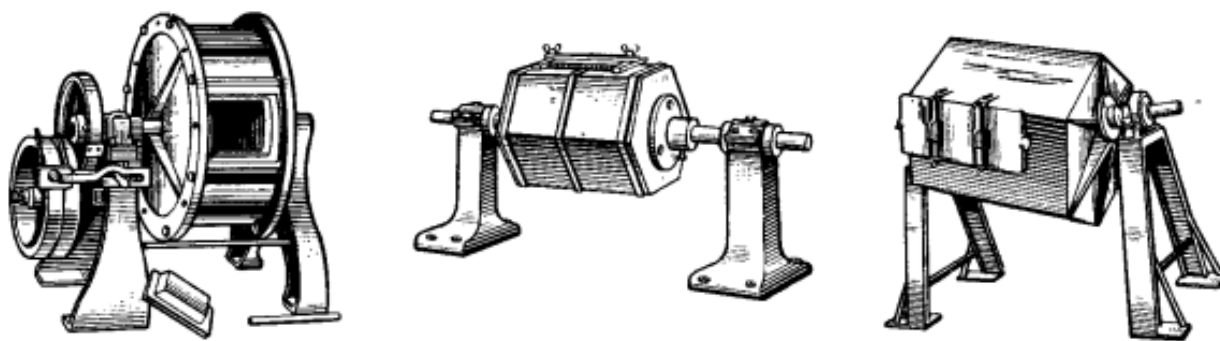


Рис. 4. Галтовочные барабаны

Скорость вращения галтовочного барабана не превышает  $30 \div 60$  об/мин. Она является оптимальной и подбирается таким образом, чтобы происходило максимально интенсивное движение деталей между собой внутри барабана. В процессе хаотического движения абразивной массы и детали происходит относительное перемещение абразивных частиц и поверхности, в результате чего происходит обработка.

Галтовочными методами можно выполнять полирование, безразмерное шлифование, упрочнение, очистку и зачистку.

В процессе галтовки в результате взаимодействия наполнителя и деталей, загруженных в контейнер, при вращении происходят соударения, скольжение и микрорезание поверхностей деталей абразивным наполнителем, вследствие чего и снимается металл. Силы прижима деталей с частицами наполнителя невелики, съем металла также мал, поэтому галтовочные операции продолжают достаточно длительное время – до нескольких часов.

Схемы обработки галтовочными методами разнообразны, но в основном это вращение круглых или граненых барабанов вокруг вертикальной, горизонтальной или наклонной оси.

В круглых и граненых барабанах иногда делают небольшие поперечные ребра, улучшающие перемешивание деталей и интенсифицирующие процесс обработки.

Детали загружают в барабан обычно навалом. В качестве инструмента при галтовочном методе применяют:

- для очистки и зачистки деталей – абразивный бой, гранулированный абразив, металлический полированный и неполированный наполнитель и др.;
- для безразмерного шлифования – гранулированный абразив на керамической и вулканитовой связке, кварцит и др.;
- для полирования деталей – абразивное зерно, порошки и микропорошки М10÷М50, деревянные шары, обрезки кожи, войлока, стальные полированные шарики диаметром 0,4÷0,9 мм и др.

На производительность и качество полированных поверхностей оказывает влияние общий объем загруженной в барабан массы и соотношение в ней обрабатываемых деталей, абразивных и неабразивных материалов, свойства и зернистость абразивных материалов, характеристики неабразивных наполнителей.

Достоинства метода галтовки – возможность обрабатывать мелкие детали, а также детали, которые трудно обрабатываются на полировальных станках или другими известными методами.

Недостатки метода галтовки – невозможность обработки очень мелких и высокоточных тонкостенных деталей, неравномерная интенсивность съема металла по поверхности, которая приводит к худшей обрабатываемости труднодоступных участков и поверхностей деталей (канавок, углублений, переходов, внутренних поверхностей и т. д.).

#### **2.2.4. Принудительная обработка свободным абразивом**

Галтовка имеет относительно невысокую производительность, поэтому в случае необходимости интенсификации процесса применяют метод принудительной обработки деталей в абразивной массе.

Отличительной чертой данного метода является то, что обрабатываемая деталь в абразивной массе находится не в свободном состоянии, а закрепляется на специальной оправке и имеет возможность совершать либо вращательные, либо поступательные движения внутри массы абразива.

Таким образом, благодаря вращению барабана и принудительному движению детали, создаются сложные траектории перемещения абразивного материала, обеспечивающие высокую интенсивность и качество обработки.

Схема реализации данного метода приведена ниже на рис. 5.

Заготовки при обработке помещают в контейнере в свободном состоянии – «внавал» или закрепляют в приспособлении. Последнее может быть связано или не связано с бункером. Крепление заготовок в приспособлении может быть неподвижное и со свободным движением в определенном направлении вследствие использования энергии движущихся частиц рабочей

среды или дополнительного принудительного движения. Оно в свою очередь может быть вращательное (попутное или встречное) и поступательное.

Финишные методы обработки, как видно из изложенного выше, отличаются разнообразием форм и видов абразивного воздействия, наличием сопутствующих факторов, влияющих на съем металла и качество поверхностного слоя, степень механизации и другими факторами. У каждого из перечисленных методов имеются определенные достоинства и недостатки, учитывая которые выбирают область оптимального применения методов.

### 3. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

1. Смесительная установка (кинематическая схема установки представлена на рис. 5).

2. Абразивный материал различной зернистости.

3. Комплект обрабатываемых образцов.

4. Аналитические весы.

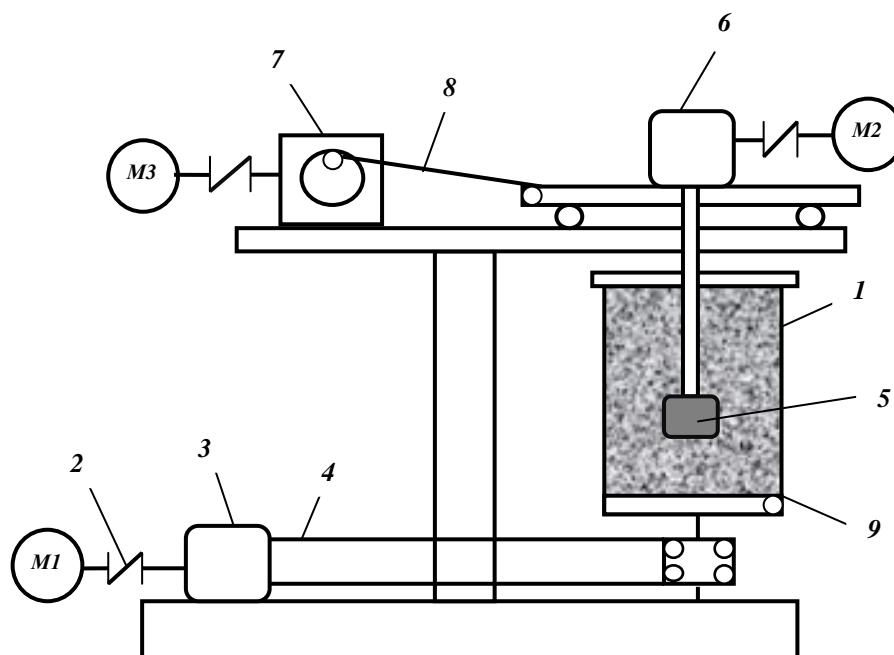


Рис. 5. Кинематическая схема установки

Принцип работы смесительной установки заключается в следующем. Вращение чаши 1 посредством клиноременной передачи 4, заимствуется от электродвигателя  $M_1$ , выходной вал которого через эластичную муфту 2 соединен с редуктором 3.

Вращение лопасти 5 осуществляется от отдельного электродвигателя  $M_2$  через червячный редуктор 6. Возвратно-поступательное перемещение лопастей обеспечивается двигателем  $M_3$  через редуктор 7 благодаря кривошипно-шатунному механизму 8. Для обеспечения выгрузки материалов предусмотрена возможность поворота чаши на шарнирах 9 на 120 градусов.

#### 4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа предусматривает определение следующих зависимостей:

1. Зависимость интенсивности съема металла от времени обработки.
2. Влияние зернистости абразива на съем металла.
3. Зависимость съема металла от материала обрабатываемого образца.
4. Зависимость степени очистки детали от времени обработки.

Выбор характеристик для оценки интенсивности съема металла осуществляется по усмотрению преподавателя.

##### 4.1. Зависимость интенсивности съема металла от времени обработки

Суть метода заключается в определении величины  $\Delta m$  – разницы массы образца до обработки и после. По данной величине судят об интенсивности съема металла. Этапы выполнения работы:

1. Взвесить образец.
2. Закрепить образец на лопасти.
3. Засыпать абразив в чашу смесителя.
4. Включить приводы вращения чаши, вращения лопасти и возвратно-поступательного перемещения лопасти.
5. Провести обработку в течение времени  $1 \div 2$  мин.
6. Взвесить образец и определить величину  $\Delta m = m - m_n$ , где  $m$  – масса образца до обработки,  $m_n$  – масса образца после обработки.

Затем следует повторить действия, указанные в п. 5 и 6 не менее 5 раз (для построения графика). По полученным в ходе эксперимента значениям построить график в координатах  $\Delta m, t$  (рис. 6).

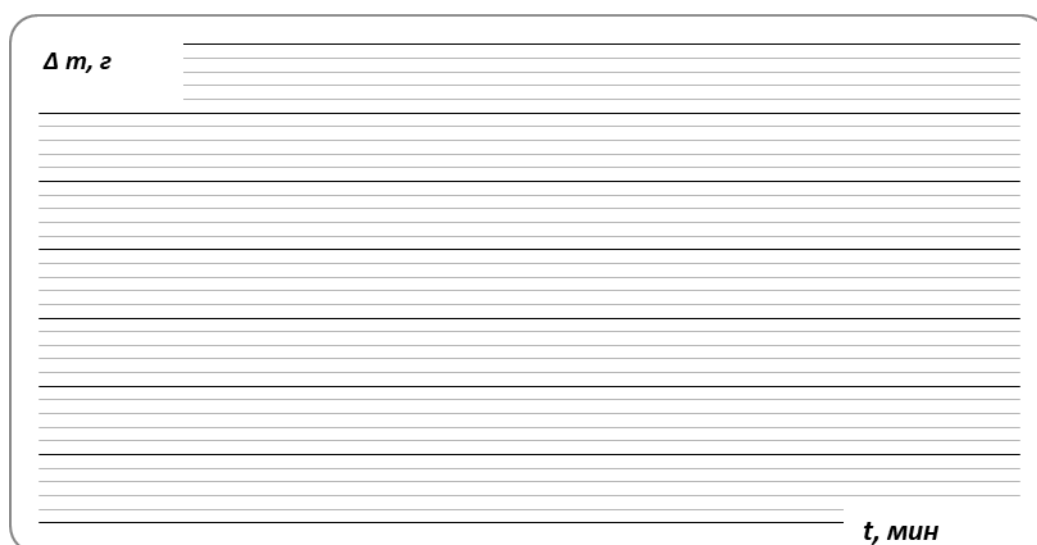


Рис. 6. Влияние времени обработки на съем металла

#### 4.2. Влияние зернистости абразива на съем металла

На данном этапе проводится обработка образца в абразивной массе из зерен различной зернистости (32, 50, 60, 125). Алгоритм выполнения работы аналогичен предыдущему опыту. Как и прежде, необходимо определить величину  $\Delta m$  образца при его обработке в абразивной массе каждой отдельно взятой зернистости.

Для всех зернистостей время обработки постоянное  $8 \div 10$  мин. Далее строится зависимость  $\Delta m$  от номера зернистости в виде столбцовой диаграммы (рис. 7). Здесь также полезно визуально или с помощью шаблонов оценить чистоту обработанной поверхности образца при его обработке абразивом различной зернистости.

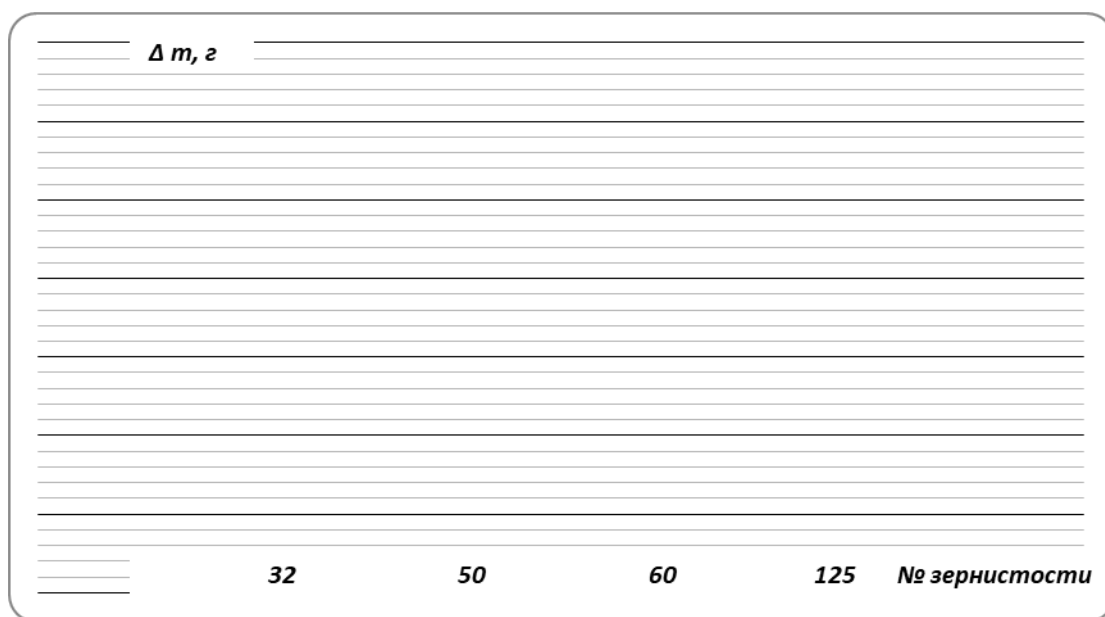


Рис. 7. Влияние зернистости абразива на съем металла

#### 4.3. Зависимость съема металла от материала обрабатываемого образца

В данном случае проводится обработка образцов, изготовленных из сталей различных марок (например, У7, Ст 3, 40Х). Марка абразива и время обработки всех образцов одинаковые. По окончании обработки строится столбцовая диаграмма зависимости  $\Delta m$  от материала обрабатываемого образца (рис. 8).



#### 4.4. Зависимость степени очистки детали от времени обработки

[illegible]

Рис. 9. Зависимость степени очистки детали от времени обработки

## **5. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА**

Отчет по лабораторной работе пишется на одной стороне листов бумаги формата А4. В отчет должны быть включены зависимости, построенные согласно п. 4. Опыт контролируется и подписывается преподавателем.

## **6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Изучить такие методы обработки свободным абразивом, как: притирка, гидроабразивная, виброабразивная, магнитно-абразивная и ультразвуковая обработка. (Технология обработки конструкционных материалов / под ред. П. Г. Петрухи. – М. : Высш. шк., 1991. – 512 с., гл. 10, 11, с. 199). 1 час.

2. Ознакомиться с видами отделочной обработки поверхностей заготовок при помощи абразивных инструментов – тонким шлифованием, хонингованием, суперфинишированием, полированием. (Технология металлов / под ред. Б. В. Кнорозова. – М. : Металлургия., 1978. – 903 с., гл. 5, с. 169). 1 час.

3. Рассмотреть способы абразивной доводки деталей с плоскими, цилиндрическими и сферическими поверхностями. (Справочник металлиста / под ред. М. П. Новикова и П. Н. Орлова. – М. : Машиностроение, 1977. – 707 с., гл. 1, с. 110). 1 час.

## **Лабораторная работа №11**

# **ВИБРАЦИОННАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ**

## **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить операцию вибрационной абразивной обработки деталей и получить навыки по осуществлению этой операции.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **2.1. Общие положения**

Обработка деталей в вибрационных машинах получила за последнее время в различных отраслях народного хозяйства широкое распространение. Ее внедрение способствует интенсификации различных процессов, повышает уровень механизации и автоматизации трудоемких работ, способствует усовершенствованию или разработке новых технологических процессов, увеличивает экономическую эффективность и производительность труда.

Высокая интенсивность протекания процессов при этой операции обусловливается характером взаимодействия обрабатываемых заготовок и рабочей среды, возможностью обработки одновременно всей поверхности большого количества заготовок. Вибрационная обработка в машиностроении является новым, прогрессивным направлением, возможности которого и область применения еще не полностью выявлены.

Широкие технологические возможности различных методов вибрационной обработки в сочетании с высокой производительностью на очистных, доделочных, шлифовально-полировальных и упрочняющих операциях ставят их в число наиболее актуальных и перспективных способов обработки и упрочнения деталей машин и приборов.

Вибрационная обработка представляет собой механический или химико-механический процесс съема мельчайших частиц материала с поверхности обрабатываемой заготовки, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательные движения. Процесс сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Движение рабочей среде сообщается поверхностью рабочей камеры.

### **2.2. Конструкции вибрационных установок**

Классификация вибрационных установок осуществляется по многим признакам. Наиболее существенными являются: объем, количество и форма

рабочей камеры, тип и количество вибраторов, способ регенерации рабочей среды, цикл работы установки.

В числе других признаков можно назвать форму сечения рабочей камеры, траекторию ее колебаний (плоская, круговая, линейная, пространственная); установки с постоянным закреплением рабочей камеры, быстросъемными и наклоняемыми рабочими камерами; установки с встроенным вибратором-двигателем или с приводом вибратора от отдельно размещенного электродвигателя; тип упругих элементов (спиральные пружины, пневмобаллоны); установки со ступенчатым или бесступенчатым регулированием режимов работы; установки с встроенными механизмами и приспособлениями для загрузки, разгрузки и разделения обрабатываемых деталей и рабочих сред.

Для осуществления процесса обработки вибрационная установка должна иметь устройства, обеспечивающие выполнение вибраций с требуемыми параметрами (траектория, частота, амплитуда), удаление продуктов износа деталей и рабочей среды, очистку циркулирующей жидкости (или сжатого воздуха), устройства для загрузки и выгрузки деталей и рабочей среды.

Конструкция вибрационной установки состоит из основания, на котором смонтированы все рабочие элементы установки; рабочей камеры с закрепленным на ней вибратором, подвешенной на пружинах и опирающейся на основание; привода вибратора; бака-отстойника и системы циркулирующей жидкости (при работе сухим способом вместо жидкости применяют сжатый воздух). Схема типовой вибрационной установки представлена на рис. 1.

Основным узлом вибрационной установки, обеспечивающим выполнение главного движения – вибрирования, является вибратор. Вибраторы могут быть инерционные и электромагнитные. На практике в конструкциях установок в основном применяются инерционные вибраторы. При этом встречаются вибраторы с встроенным электродвигателем (рис. 4). Неуравновешенные грузы располагаются на валу ротора электродвигателя.

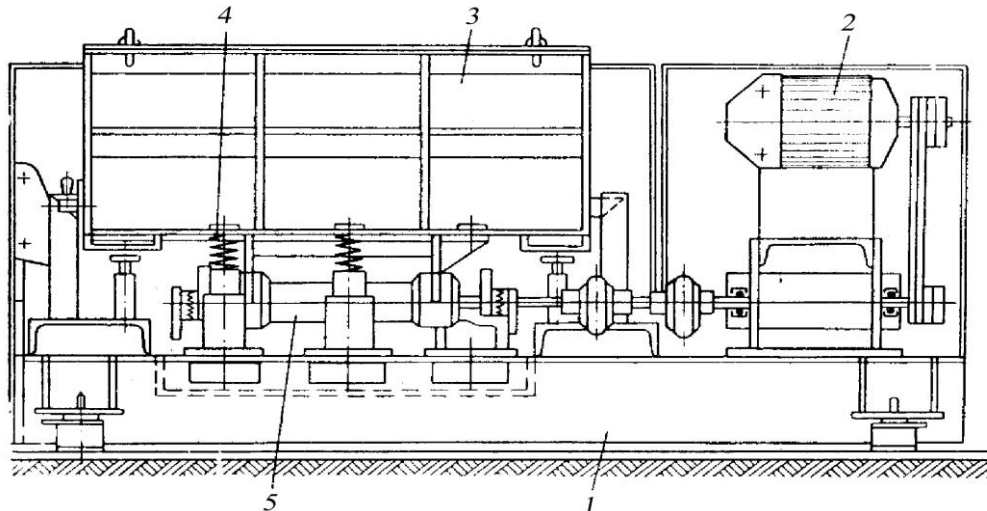


Рис. 1. Схема вибрационной установки УВГ-200:

1 – основание; 2 – привод; 3 – рабочая камера;  
4 – пружина; 5 – вибратор

Наибольшее распространение получили вибраторы, изготавливаемые без собственного привода, получающие вращение через гибкие элементы от отдельного электродвигателя, закрепленного неподвижно. Такие конструкции вибраторов представляют собой вал с двумя опорами, размещенными в конце вала дисками с несбалансированными грузами. Смещением подвижного груза относительно неподвижного осуществляется изменение возмущающей силы вибратора и соответственно амплитуды колебаний. В некоторых случаях изменение амплитуды достигается за счет добавления на диск пластин в виде секторов. Схема привода вала вибратора показана на рис. 2.

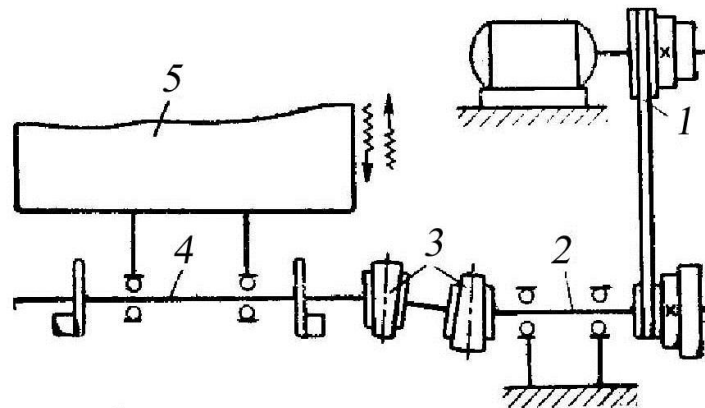


Рис. 2. Схема привода вала вибратора: 1 – электродвигатель; 2 – промежуточный вал; 3 – эластичные муфты; 4 – вал вибратора; 5 – рабочая камера

Расчет основных элементов конструкции вибратора обычно производят исходя из условий, что его вал при наличии неуравновешенных грузов создает неуравновешенную центробежную силу, которая может быть выражена уравнением

$$F = \frac{M_n}{g} \omega^2 = \frac{Q_{гр}}{g} r \omega^2 = m_{гр} r \omega^2, \quad (1)$$

где  $M_n = Q_{гр} r$  – момент неуравновешенности ( $Q_{гр}$  – вес неуравновешенных грузов;  $r$  – расстояние от центра тяжести груза до оси вращения;  $g$  – ускорение силы тяжести);  $\omega$  – угловая частота;  $m_{гр}$  – неуравновешенная масса грузов.

Неуравновешенные центробежные силы, действуя на рабочую среду и детали, загруженные в рабочую камеру и имеющие возможность колебаться в плоскости, перпендикулярной оси вращения вала, вызывают интенсивное перемешивание загруженной массы и вибрирование каждого элемента этой массы с частотой колебаний рабочей камеры. Расчет параметров вибратора, наряду с расчетом упругих элементов (пружин), составляет основную часть расчета виброустановки и осуществляется с учетом следующих исходных

данных: объема рабочей камеры; амплитуды и частоты вибраций; приведенного веса колеблющейся массы  $Q_{\text{п}}$ , который определяется из выражения

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{м}} + KQ_{\text{р.к}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{м}}$  – вес колеблющихся частей машины, рабочей камеры, вибратора, виброплощадки;  $K = 0,4$  – коэффициент, учитывающий, что колебание содержимого рабочей камеры происходит с меньшей амплитудой, чем колебание элементов конструкции;  $Q_{\text{р.к}}$  – вес загрузки рабочей камеры.

Вес загрузки на основе опытных данных принимается равным 2,5–3,0 кг на 1 л объема загрузки. Заполнение рабочей камеры принимается 0,7–0,8 ее объема.

В качестве привода вибратора применяются электродвигатели постоянного или переменного тока. Двигатели постоянного тока обеспечивают бесступенчатое регулирование числа оборотов вала вибратора (следовательно, частоты колебаний) и наиболее широко применяются в конструкциях установок зарубежных фирм. На практике применяются электродвигатели переменного тока с установкой вариатора для бесступенчатого регулирования числа оборотов вала вибратора или промежуточной опоры с валом и двух- или трехступенчатым шкивом и клиноременной передачей, обеспечивающих соответственно двух- и трехступенчатое регулирование числа оборотов вала вибратора.

При выборе или расчете мощности электродвигателя привода вибратора обычно используют опытные данные. Так, например, установка с объемом рабочей камеры 100 дм<sup>3</sup> имеет электродвигатель мощностью 1,7 кВт, а установка с объемом рабочей камеры 200 дм<sup>3</sup> имеет соответственно мощность электродвигателя 4,0 кВт.

Передача вращения от отдельно закрепленного электродвигателя валу вибратора обычно передается через эластичную муфту. Для большей изоляции вибрирующих частей установки от неподвижных в цепи передачи крутящего момента на валу вибратора помещают две эластичные муфты, разделенные промежуточным валом небольшой длины. Обязательным в большинстве случаев является установка в этой цепи промежуточного вала с закрепленным на его свободном конце ступенчатым шкивом. Вместе с другим ступенчатым шкивом, закрепленным на валу электродвигателя, эта пара обеспечивает ступенчатое регулирование числа оборотов вала вибратора (рис. 2).

Существуют и другие конструкции гибких связей между валом вибратора и промежуточным валом. Например, применяют отрезки шланга, цилиндрические пружины, диски из прорезиненных материалов, установленные на концах соответствующих валов и соединенные болтами. Однако работоспособность эластичных муфт с резиновой оболочкой является наиболее высокой.

Рабочая камера выполняется обычно из листовой стали путем сварки. Внутри камера может быть облицована резиной, пластмассой, абразивным материалом и т. п. Особенностью формы рабочей камеры является ее

U-образное (рис. 3, *a*) или V-образное сечения (рис. 3, *б*), обеспечивающие наиболее интенсивное перемещение рабочей среды.

Изменение формы сечения рабочей камеры путем скругления одной из стенок улучшает и ускоряет процесс обработки вследствие исключения дополнительного завихрения в верхней части рабочей камеры с U-образным сечением (рис. 3, *a*).

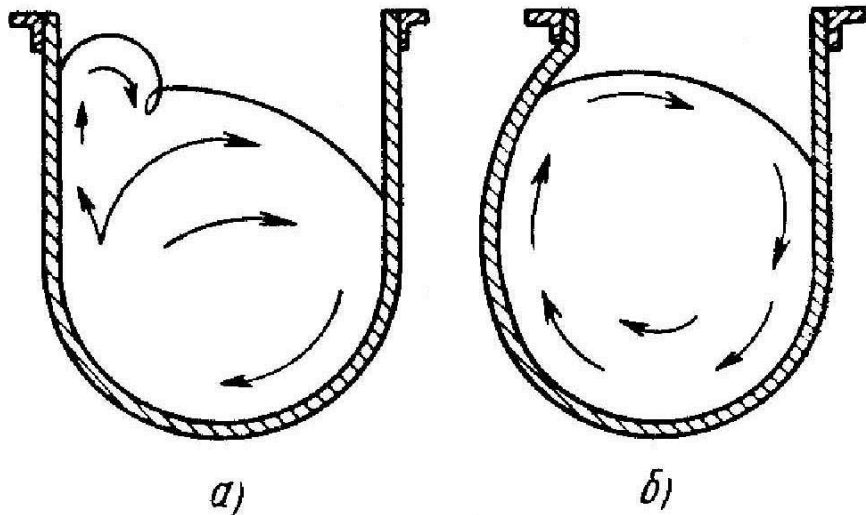


Рис. 3. Схемы сечений рабочих камер

Рабочие камеры больших размеров имеют в боковой стенке разгрузочное окно для выгрузки деталей и рабочей среды. Рабочие камеры объемом до 10–50 дм<sup>3</sup> часто разгружаются путем опрокидывания. Для удаления продуктов износа рабочей среды и обрабатываемых деталей на дне рабочей камеры имеется одно или несколько сетчатых отверстий. В некоторых случаях для уменьшения шума (или пылеобразования при сухом способе) камеры снабжаются быстросъемными крышками.

Рабочая камера устанавливается на пружинах, обеспечивающих ей необходимую свободу колебаний. Эти пружины должны иметь определенные размеры, которые находят расчетным путем. Жесткость пружин, также зависящая от их размеров и модуля упругости материала, должна быть такой, чтобы частота собственных колебаний системы была меньше частоты вибрации машины, тогда вынужденные колебания будут совершаться в более устойчивом для работы виброустановки режиме. Кроме того, виброустановка должна иметь возможность работать как с полной нагрузкой, так и при холостом режиме. При полной нагрузке величина прогиба пружин не должна превышать допустимый прогиб, чтобы не нарушить нормальную работу эластичных муфт.

Основание вибрационной установки служит для монтажа на нем всех рабочих узлов: рабочей камеры с вибратором и пружинами, привода вибратора с промежуточной опорой и некоторых вспомогательных устройств. Основание выполняют в виде массивной коробки, сваренной из швеллеров и залитой бетоном или отходами чугунного литья. Большой вес основания по-

вышает устойчивость работы установки и существенно снижает уровень вибраций, передаваемых на пол или фундамент помещения. Основание опирается на амортизаторы, которые являются разделяющим элементом между вибрационной установкой и полом или фундаментом помещения и обеспечивают гашение вибраций, передаваемых основанием. Основание воспринимает нагрузки от действия вертикальной составляющей вибрации рабочей камеры и вибратора. Действие этой нагрузки на основание может рассматриваться как действие моментов неуравновешенности.

Эффективность амортизаторов зависит от их жесткости. Жесткость амортизаторов должна быть такой, чтобы частота собственных колебаний основания на амортизаторах была в несколько раз меньше частоты колебаний рабочей камеры и вибратора. В конструкциях вибрационных установок встречаются амортизаторы, имеющие эластичные элементы в виде пружин или резиновых деталей, располагаемых между металлическими пластинами, связанными с основанием. Амортизаторы с резиновыми деталями обычно компактны и имеют простую конструкцию, более удобны в эксплуатации и применяются сравнительно чаще других.

Важную роль в работе виброустановки играет система циркуляции жидкого наполнителя с баком-отстойником, обеспечивающая подачу жидкости в рабочую камеру в необходимых количествах, отвод ее из рабочей камеры вместе с продуктами износа рабочей среды и обрабатываемых деталей, очистку для последующей подачи вновь в рабочую камеру. Система циркуляции состоит из бака-отстойника, трубопровода, насоса с фильтром и кранов. Бак-отстойник изготавливается обычно сварным из листовой стали с внутренними перегородками. Емкость бака выбирается приблизительно из расчета 0,7–1,2 л на 1 л объема рабочей камеры. К основному баку-отстойнику рекомендуется устанавливать (сверху) дополнительный приемный бачок для грубой очистки стекаемой жидкости. В этом бачке оседают наиболее крупные частицы и он сравнительно быстро засоряется (особенно при работе абразивами пониженной твердости). Небольшие размеры и вес бака, а также свободный доступ позволяют сравнительно легко и часто очищать его. Вместе с тем, наличие бака грубой очистки предохраняет основной бак-отстойник большого объема от частых загрязнений и уменьшает число периодических промывок. Бак-отстойник можно располагать рядом с установкой или под ней. Для отвода раствора с продуктами износа из рабочей камеры применяют гибкий шланг. Длина шланга должна быть небольшой. Кроме того, нельзя допускать перегибов с малыми радиусами. При несоблюдении этих условий в местах изгиба шланга или на участках большей длины образуются пробки из продуктов износа, которые трудно удалить.

Установка имеет кожух, служащий для поглощения шума. Установки небольших размеров с объемом рабочей камеры до 100–150 дм<sup>3</sup> обычно полностью закрывают кожухом, у более крупных установок рабочая камера сверху открыта. Для обслуживания в процессе работы и наладки в кожухе изготавливают проемы, закрываемые соответствующими крышками.



Наряду с вибрационными установками, имеющими прямоугольную форму рабочей камеры, находят применение и установки с кольцевой (или тороидной) формой рабочей камеры (рис. 4). Основные элементы и принцип работы вибрационной установки этого типа те же, что и установок с прямоугольным сечением рабочей камеры. Некоторые особенности имеет только принцип перемешивания рабочей среды и обрабатываемых деталей. Наиболее существенным параметром, характеризующим различные типы установок, является объем рабочей камеры ( $\text{дм}^3$  или  $\text{м}^3$ ). Этот параметр определяет как технологические возможности данной установки (количество и размеры обрабатываемых деталей, потребное количество рабочей среды), так и конструкцию основных ее узлов. Пределы изменений амплитуды и частоты колебаний в основном являются постоянными для различных типов установок.

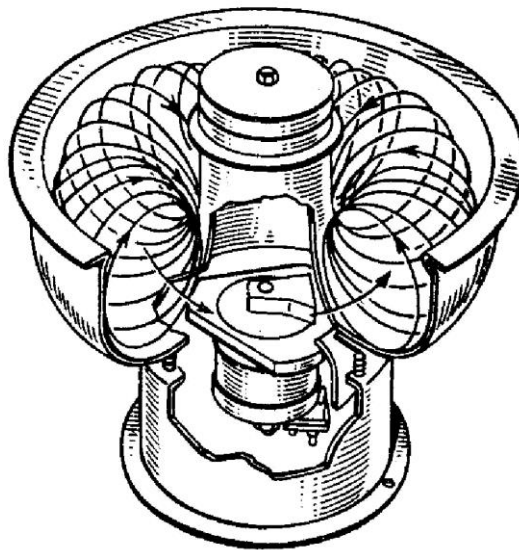


Рис. 4. Вибрационная установка кольцевого типа

В нашей стране разработана гамма вибрационных установок с объемом рабочих камер (прямоугольной формы)  $4 \times 10$ ,  $4 \times 25$ ,  $2 \times 50$ , 100, 200, 300, 500 и  $1000 \text{ дм}^3$ .

### 2.3. Рабочие среды

Одним из основных этапов разработки технологического процесса вибрационной обработки, оказывающих решающее влияние на достижение требуемых результатов, с точки зрения качества поверхности и производительности, является выбор рабочей среды. В зависимости от назначения выполняемой операции, материала детали и применяемого способа ведения процесса (сухой или с непрерывной промывкой) состав рабочей среды может быть различным.

В состав рабочей среды входят: твердый наполнитель в виде абразивов и неабразивных материалов, жидкий наполнитель (СОЖ) в виде водных растворов с различного рода добавками, обладающими необходимыми свой-

ствами (моющими, разделяющими, травящими, пассивирующими, блескообразующими и т. п.), циркулирующий непрерывно через рабочую камеру или сменяемый периодически (при сухом способе для регенерации рабочей среды применяется сжатый воздух).

### 2.3.1. Классификация рабочих сред

Классифицируют рабочие среды по нескольким признакам. По роду материала рабочие среды бывают из различных абразивных материалов (искусственных и естественных) и неабразивных. Из числа искусственных абразивных материалов применяют электрокорунд белый и нормальный, карбид кремния зеленый и черный, шлак литейный и др. Среди абразивных материалов естественного происхождения применяют кварцевые породы, известняк, гранит, базальт, мрамор и др. Абразивные материалы применяют в виде крошки различных размеров и формы, шлифовальных зерен и шлифовальных порошков. На операциях тонкой отделки абразивные материалы часто применяются в составе различного рода паст.

В качестве неабразивных материалов применяют предметы различной формы из древесины, пластмасс, резины, войлока, фетра, кожи, картона, некоторых тканей и т. п. Некоторые из этих материалов могут применяться самостоятельно в качестве твердого наполнителя. По форме частицы рабочих сред подразделяют на частицы правильной геометрической формы (рис. 5) (цилиндр, шар, призма, конус, пирамида, звездочка и т. д.) и частицы произвольной формы. Частицы правильной геометрической формы получают путем прессования, штамповки, прокатки, выдавливания и другими способами, частицы произвольной формы получают в результате дробления или размалывания твердых материалов. По размеру частиц рабочие среды бывают в виде шлифовальных зерен или шлифовальных порошков различной зернистости, формованных частиц и крошки различной грануляции от 3 до 60 мм. Твердый наполнитель играет основную роль в процессе обработки, обеспечивая съем металла и его окислов с обрабатываемой поверхности или ее пластическое деформирование. В зависимости от характера операций можно применять только абразивные материалы или неабразивные или сочетания тех и других. Абразивная среда обычно осуществляет работу по диспергированию металла в процессе вибрационной обработки. Абразивные материалы в подавляющем большинстве случаев составляют основную часть состава твердого наполнителя и играют роль режущего элемента. Кроме того, абразивная среда разделяет детали и уменьшает столкновение их между собой. Абразивные материалы применяются также в качестве добавок в небольших количествах к среде в виде металлических, деревянных, войлочных, кожаных, резиновых и других предметов. В этом случае абразивные материалы также являются режущими элементами, а неабразивные предметы – носителями абразивных частиц.

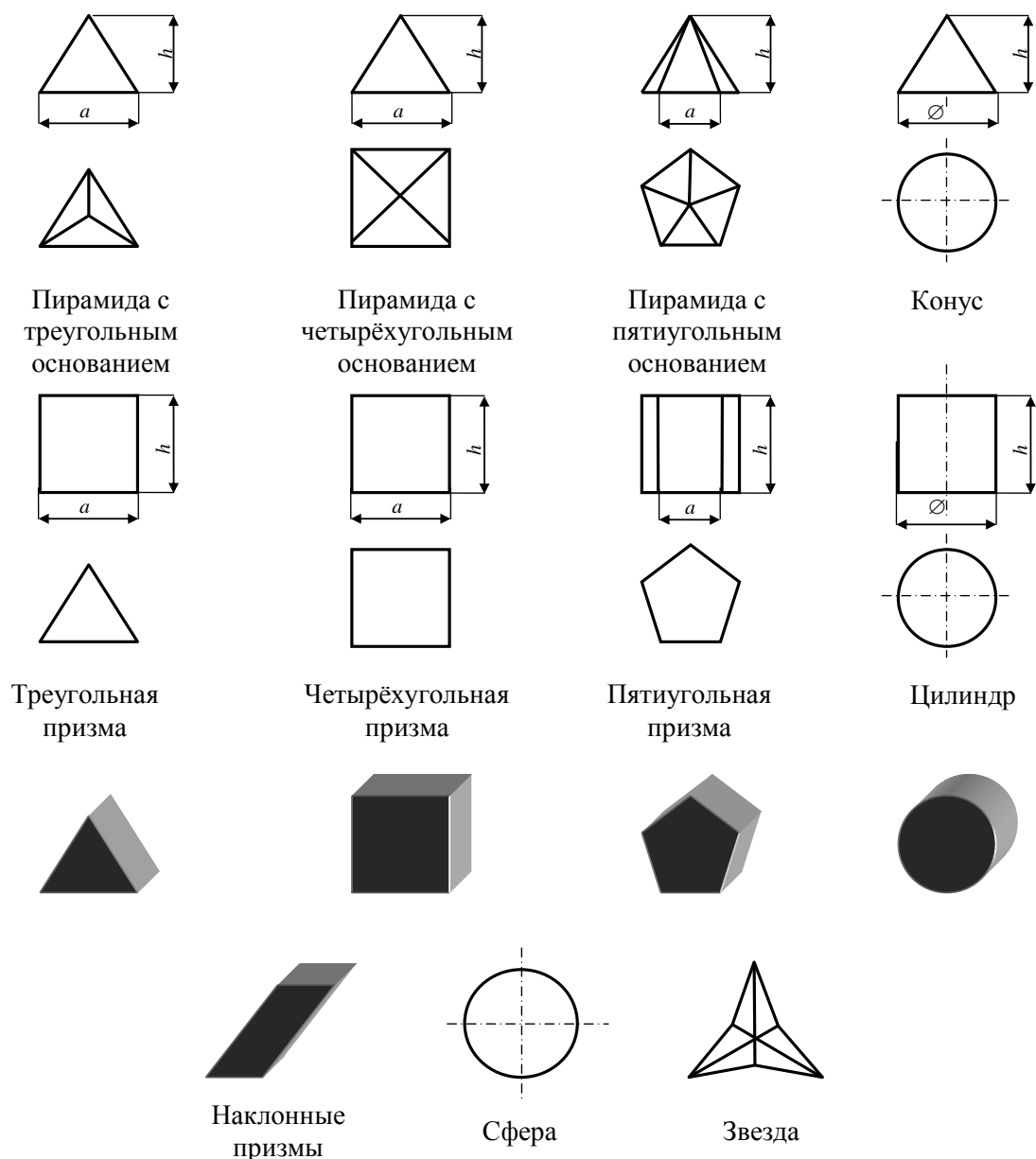


Рис. 5. Часто применяемые формы галтовочных тел

### 2.3.2. Твердые наполнители для вибрационной обработки

Применяются формованные галтовочные тела, изготовленные из абразивных зерен и различных связок (керамической, органической, вулканистой и др.). Твердость галтовочных тел может быть различной в зависимости от конкретных условий выполнения той или иной операции.

Характеристика абразивного зерна определяется видом выполняемой операции и материалом обрабатываемых деталей, а размеры и форма определяются соответственно формой и размерами детали. Некоторые виды абразивных формованных галтовочных тел на органической связке для объемно-абразивной обработки представлены на рис. 6.

Среди наполнителей из неабразивных материалов широкое применение в практике вибрационной обработки получили стальная и чугунная дробь,

литые звездочки, рубленая проволока, мелкие отходы листовой штамповки, стальные полированные шарики, войлочные пыжи, древесная крошка различной формы, косточковые материалы. Некоторые виды наполнителей этой группы показаны на рис. 7.

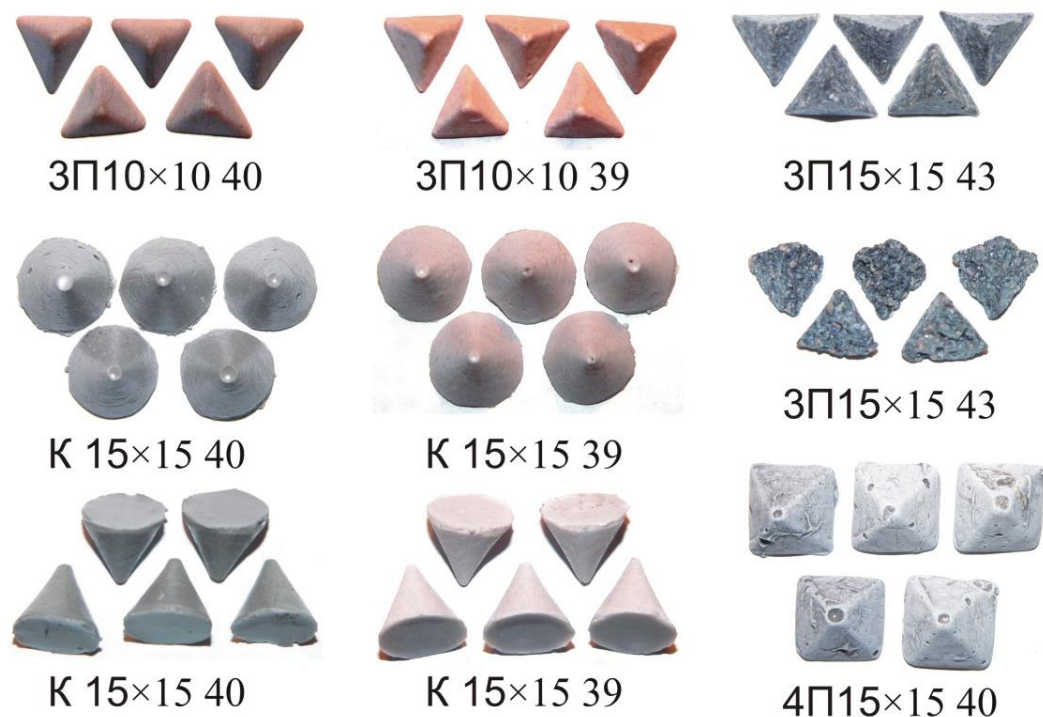


Рис. 6. Галтовочные тела на органической связке

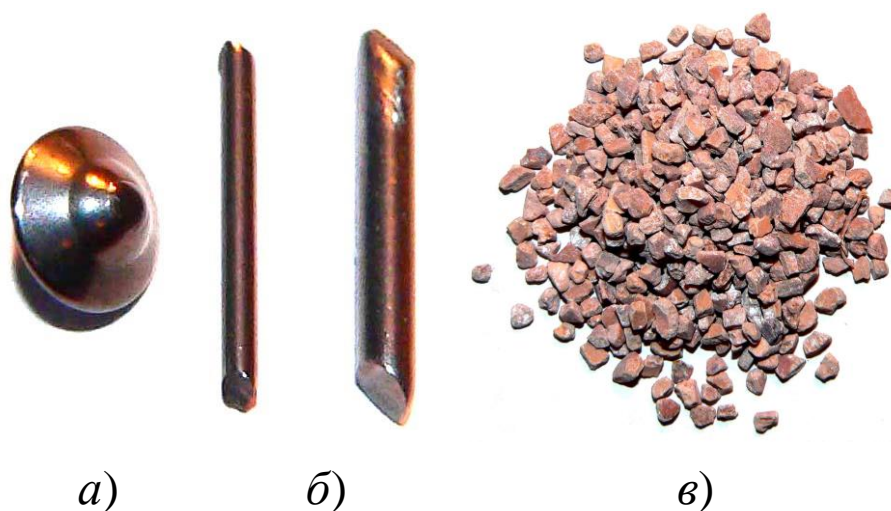


Рис. 7. Наполнитель фирмы ОТЕС (Германия):  
 а – металлический наполнитель «планета»; б – рубленая проволока; в – крошка из скорлупы грецкого ореха

### 2.3.3. Жидкие наполнители для вибрационной обработки

Жидкий наполнитель (СОЖ) оказывает существенное влияние на протекание процесса вибрационной обработки и обеспечивает удаление продук-

тов износа с поверхности обрабатываемых деталей и рабочей среды, смачивает детали и твердый наполнитель, помогает их разделению и равномерному распределению в рабочей среде, охлаждает детали и рабочую среду, исключает пылеобразование, обеспечивая нормальные условия для обслуживания. Путем регулирования уровня жидкости в рабочей камере достигается изменение интенсивности обработки. Наличие жидкого наполнителя обеспечивает наибольшие удобства для введения в состав раствора химических веществ с различными свойствами.

Основой СОЖ в большинстве случаев являются водные растворы щелочей, кислот и солей, которые в зависимости от характера выполняемой операции дополняются различного рода химическими добавками.

Введение в раствор химических веществ расширяет служебные функции СОЖ. Вводимые добавки способствуют увеличению съема металла и сохранению режущих свойств абразива; повышают антикоррозионные, смазывающие или смачивающие свойства растворов; могут образовывать сильную пенистую подушку, способствующую лучшему сглаживанию и осветлению обрабатываемой поверхности; способствуют лучшей обрабатываемости мягких и вязких материалов (чистовая обработки таких материалов, как известно, встречает серьезные затруднения); обладают свойствами блескообразования; препятствуют загрязнению и затемнению полируемых поверхностей и полирующих тел; предотвращают слипание плоских поверхностей и обеспечивают равномерную обработку плоских поверхностей всех загруженных в рабочую камеру деталей.

Щелочи применяются наиболее часто как антикоррозионное средство, а также как средство, ускоряющее процесс обработки черных металлов. Например, раствор кальцинированной соды (2–3 %) применяется при выполнении операций шлифования, удалении заусенцев и окалины. При этом обеспечивается удовлетворительная очистка поверхности деталей и твердого наполнителя от продуктов износа и предохранение от коррозии обрабатываемых деталей из стали и чугуна.

Кислоты (серная, соляная и др.) применяются в растворах как средство для травления поверхности металлов. Наиболее часто кислотные растворы слабой концентрации применяются на операциях очистки от окалины. В составе с другими веществами (в том числе и ингибиторами) кислоты добавляют в растворы и при шлифовании металлов. В практике вибрационной обработки находят применение медный купорос, олеиновая и стеариновая кислоты, главным образом на операциях шлифования и отделки.

При экспериментальной проверке удовлетворительные результаты по шлифованию черных металлов достигнуты при применении раствора хлористого олова или хлористого железа. На операциях отделки применяют добавки скипидара, олеиновой и стеариновой кислот.

При обработке деталей из алюминиевых сплавов с целью исключения потемнения поверхности применяется водный раствор с добавлением следующих веществ при комнатной температуре: 27 мл/л  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 27 г/л ОП-7; 5 г/л тиомочевины. Удовлетворительные результаты дает также раствор хромпика.

При обработке деталей из латуни хорошие результаты достигнуты с применением раствора следующего состава:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 30 мл/л;  $\text{HNO}_3$  – 15 мл/л;  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 5 г/л; ОП-7 – 20 г/л.

#### **2.4. Описание оборудования для выполнения лабораторной работы**

Вибрационная обработка выполняется на установке с техническими характеристиками:

- амплитуда колебания бункера 0,1–5 мм;
- частота колебаний 2800 кол./мин;
- емкость бункера 10 л.

Амплитуда колебаний изменяется путем изменения угла между несбалансированными грузами вибратора от 0 до 180°. Чем меньше угол между грузами, тем больше амплитуда.

Пуск установки осуществляется выключателем, расположенным на панели управления.

Для взвешивания образцов используются весы марки ВЛКТ-500г-М, 4 класса точности.

Для взвешивания наполнителя используются электронные весы любой марки с точностью взвешивания до 0,5 г и максимально допустимым весом не менее 5 кг.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Работа выполняется в заданном порядке при условиях, согласно выданного преподавателем варианта задания.

Порядок выполнения работы следующий:

1.Получить у преподавателя номер варианта. По табл. 1, прил. 1, определить номер наполнителя, номер набора образцов и номер режимов обработки.

2.Получить у лаборанта необходимое оборудование для выполнения работы.

3.Подготовить образцы для обработки: протереть ветошью и взвесить на весах. Занести данные в табл. 5, прил. 2.

4.Подготовить наполнитель для осуществления обработки. Просеять на сите с соответствующим размером ячейки и взвесить заданный объем наполнителя на весах. Данные занести в табл. 6, прил. 2. Соотношение объема образцов и наполнителя принимать 1:10.

5.Подготовить СОЖ заданного объема. Соотношение объема СОЖ и наполнителя принимать 3:10.

6.Загрузить образцы, наполнитель и СОЖ в рабочую емкость устройства для вибрационной обработки и запустить обработку в заданном режиме.

7.По окончании времени обработки остановить устройство и отделить образцы от наполнителя. Тщательно промыть образцы и наполнитель в про-

точной воде. После этого образцы протереть чистой ветошью и взвесить, данные занести в табл. 5, прил. 2. Наполнитель просушить в течение 20 минут под вентилятором, просеять на сите и взвесить. Данные занести в табл. 6, прил. 2.

8. Рассчитать массу снятого металла  $\Delta m_i$  по формуле

$$\Delta m_i = m_{i1} - m_{i2}, \text{ г} \quad (3)$$

и производительность  $Q_i$  по формуле

$$Q_i = \frac{\Delta m_i}{t}, \text{ г/мин} \quad (4)$$

значения занести в табл. 5, прил. 2.

Построить гистограмму для обработанных образцов по данным производительности обработки  $Q_i$ .

9. Рассчитать коэффициент галтования по формуле

$$K_z = \frac{\sum \Delta m_i \cdot M_{н1}}{\sum m_{i1} \cdot \Delta M_{н}}, \quad (5)$$

значение занести в табл. 5, прил. 2.

10. По полученным в ходе работы данным сделать выводы:

- об эффективности вибрационной обработки;
- об эффективности обработки различных материалов;
- об эффективности наполнителя.

11. Оформить отчет о выполненной работе на листах формата А4, который должен содержать титульный лист с необходимыми сведениями, цель работы, полученные результаты и вывод о проделанной работе. Готовый отчет сдать преподавателю на проверку.

12. Защитить выполненную работу, ответив на вопросы преподавателя.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите конструкции вибрационных установок.
2. Изобразите кинематическую схему вибрационной установки. И опишите принцип ее работы.
3. Перечислите основные узлы вибрационных установок.
4. Какие формы рабочих камер используются на вибрационных установках?
5. Что называют рабочей средой при вибрационной обработке?
6. По каким признакам классифицируют рабочие среды?
7. Галтовочные тела какой формы используются в вибрационной обработке?
8. Из каких материалов изготавливают галтовочные тела?
9. С какой целью используются жидкие наполнители?
10. Какие СОЖ используются при объемной абразивной обработке?
11. Как устроена система циркуляции жидкости на vibraустановках?
12. О чем свидетельствует величина коэффициента галтования?

## Приложение 1

Таблица 1

## Варианты заданий для вибрационной обработки образцов

№ варианта	№ наполнителя по табл. 2.	№ набора образцов по табл. 3.	№ режимов для обработки по табл. 4.	№ варианта	№ наполнителя по табл. 2.	№ набора образцов по табл. 3.	№ режимов для обработки по табл. 4.
1	1	1	1	26	26	6	6
2	2	2	2	27	27	7	7
3	3	3	3	28	28	8	8
4	4	4	4	29	29	9	9
5	5	5	5	30	30	10	10
6	6	6	6	31	31	1	1
7	7	7	7	32	32	2	2
8	8	8	8	33	33	3	3
9	9	9	9	34	34	4	4
10	10	10	10	35	35	5	5
11	11	1	1	36	36	6	6
12	12	2	2	37	37	7	7
13	13	3	3	38	38	8	8
14	14	4	4	39	39	9	9
15	15	5	5	40	40	10	10
16	16	6	6	41	41	1	1
17	17	7	7	42	42	2	2
18	18	8	8	43	43	3	3
19	19	9	9	44	44	4	4
20	20	10	10	45	45	5	5
21	21	1	1	46	1	6	6
22	22	2	2	47	2	7	7
23	23	3	3	48	3	8	8
24	24	4	4	49	4	9	9
25	25	5	5	50	5	10	10



Тип наполнителя

№ наполнителя	Наполнитель		
	Вид наполнителя, форма	Размеры, мм	Марка абразива
1.	Треугольная пирамида	15×15	13AM10
2.	Четырехугольная пирамида	15×15	13AM10
3.	Конус	15×15	13AM10
4.	Треугольная пирамида	10×10	13AM10
5.	Четырехугольная пирамида	10×10	13AM10
6.	Конус	10×10	13AM10
7.	Треугольная пирамида	15×15	13AM20
8.	Четырехугольная пирамида	15×15	13AM20
9.	Конус	15×15	13AM20
10.	Треугольная пирамида	10×10	13AM20
11.	Четырехугольная пирамида	10×10	13AM20
12.	Конус	10×10	13AM20
13.	Треугольная пирамида	10×10	24AM20
14.	Четырехугольная пирамида	10×10	24AM20
15.	Конус	10×10	24AM20
16.	Треугольная пирамида	15×15	13AM40
17.	Четырехугольная пирамида	15×15	13AM40
18.	Конус	15×15	13AM40
19.	Треугольная пирамида	10×10	13AM40
20.	Четырехугольная пирамида	10×10	13AM40
21.	Конус	10×10	13AM40
22.	Треугольная пирамида	15×15	13AM63
23.	Четырехугольная пирамида	15×15	13AM63
24.	Конус	15×15	13AM63
25.	Треугольная пирамида	10×10	13AM63
26.	Четырехугольная пирамида	10×10	13AM63
27.	Конус	10×10	13AM63
28.	Свободный абразивный материал	—	13AM10
29.	Свободный абразивный материал	—	24AM10
30.	Свободный абразивный материал	—	13AM20
31.	Свободный абразивный материал	—	24AM20
32.	Свободный абразивный материал	—	13AM40
33.	Свободный абразивный материал	—	24AM40
34.	Свободный абразивный материал	—	13AM50
35.	Свободный абразивный материал	—	24AM50

Продолжение табл. 2

№ наполнителя	Наполнитель		
	Вид наполнителя, форма	Размеры, мм	Марка абразива
36.	Свободный абразивный материал	—	13AM63
37.	Свободный абразивный материал	—	13AM80
38.	Свободный абразивный материал	—	13AM100
39.	Свободный абразивный материал	—	13AM120
40.	Стальной наполнитель рубленая проволока	0,5×5	—
41.	Стальной наполнитель рубленая проволока	1×5	—
42.	Стальной наполнитель рубленая проволока	1,5×10	—
43.	Стальной наполнитель рубленая проволока	2×10	—
44.	Стальная дробь	5	—
45.	Другой наполнитель	—	—

Таблица 3

Набор образцов

№ набора образ- цов	Образцы						
	Размеры $l \times b \times h$ (рис. 11)	Объем, мл	№1	№2	№3	№4	№5
1.	50×30×20	30	ШХ15	20Х13	09Г2С	АК6	Л9
2.	50×30×20	30	ШХ15	12Х18	Сталь 3	АК6	Л9
3.	50×30×20	30	ШХ15	20Х13	Сталь 45	АК6	Л9
4.	45×15×15	10,125	ШХ15	20Х13	09Г2С	АК6	Л9
5.	45×15×15	10,125	ШХ15	12Х18	Сталь 3	АК6	Л9
6.	45×15×15	10,125	ШХ15	20Х13	Сталь 45	АК6	Л9
7.	45×15×2	1,35	ШХ15	20Х13	09Г2С	АК6	Л9
8.	45×15×2	1,35	ШХ15	12Х18	Сталь 3	АК6	Л9
9.	45×15×2	1,35	ШХ15	20Х13	Сталь 45	АК6	Л9
10.	Другой	—	—	—	—	—	—

## Эскиз образца

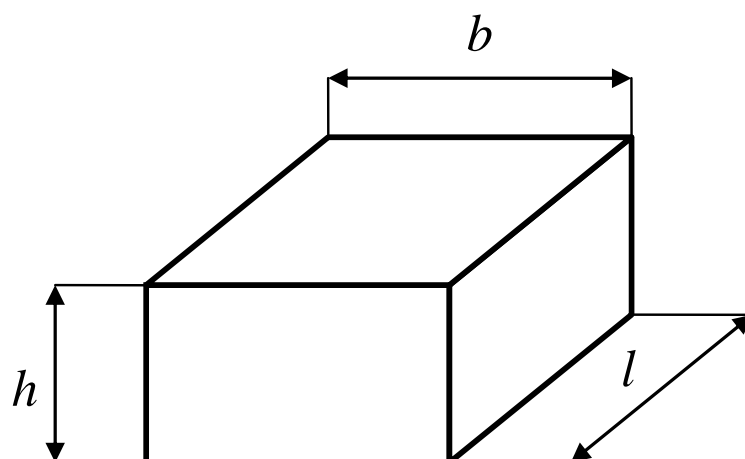


Таблица 4

## Режимы вибрационной обработки образцов

№ режимов	Амплитуда колебания бункера, мм	Время обработки $t$ , мин
1.	0,5	40
2.	1	40
3.	1,5	40
4.	2	40
5.	3	40
6.	4	60
7.	5	60
8.	0,5	30
9.	2	30
10.	3	30

## Приложение 2

Таблица 5

Данные об образцах

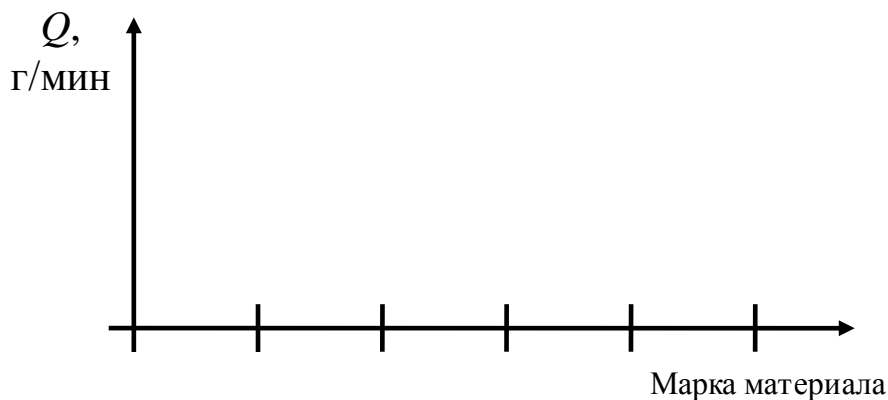
Номер образца	№1	№2	№3	№4	№5	Сумма
Марка материала						-
Масса до обработки $m_{i1}$ , г						
Масса после обработки $m_{i2}$ , г						
Масса снятого металла $\Delta m_i$ , г						
Производительность $Q_i$ , г/мин						

Таблица 6

Данные о наполнителе

Вид наполнителя	
Объем наполнителя перед обработкой	
Масса до обработки $M_{н1}$ , г	
Масса после обработки $M_{н2}$ , г	
Износ наполнителя $\Delta M_n$ , г	
Износ наполнителя $U$ , г/мин	
Коэффициент галтования $K_r$	

Оси для построения гистограммы



## **Лабораторная работа №12**

# **ИСПЫТАНИЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА РАЗРЫВНУЮ ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

## **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Ознакомление студентов с методом оценки динамической разрывной прочности шлифовальных кругов, а также оборудованием для контроля этого показателя у шлифовальных инструментов.

## **2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Прочность шлифовальных кругов является одним из наиболее важных эксплуатационных параметров этих инструментов. Это обусловлено тем, что шлифовальные круги, в отличие от других инструментов, работают в специфических условиях – на скоростях, насчитывающих десятки метров в секунду. Разрыв круга при таких скоростях сопряжен с рядом отрицательных последствий, в числе которых – возможное травмирование оператора, поломка станка, порча обрабатываемой детали. Поэтому, фактору прочности круга придают большое внимание и он в опосредованном виде, как величина допустимой рабочей скорости, присутствует в характеристике каждого инструмента. С другой стороны, установлено, что, увеличение скоростей шлифования в основном положительно влияет на выходные параметры этого процесса, такие как производительность и качество обработки. Как следствие – возникла тенденция постоянного увеличения скоростей шлифования, которая особенно заметна на примере отрезных кругов. Рабочая скорость этих инструментов, за относительно короткий промежуток времени, повышена с  $50 \div 60$  м/с до  $80 \div 100$  м/с и продолжает повышаться до  $125 \div 150$  м/с. Это предъявляет еще более жесткие требования к прочности шлифовальных кругов и, вместе с тем, стимулирует поиски путей ее эффективного контроля и рационального повышения.

### **2.1. Динамический метод оценки разрывной прочности шлифовальных кругов**

Шлифовальные круги – это инструменты повышенной опасности. В связи с этим, при производстве и приемке заказчиком шлифовальных кругов, помимо таких параметров, как соответствие размерам, номеру структуры, содержанию оксида железа, соответствию твердости, в обязательном порядке проводится контроль кругов на неуравновешенность (динамическую сбалансированность) и испытание на механическую прочность. Для обеспечения безопасной работы на шлифовальном оборудовании последний параметр контроля представляется особенно важным. В настоящее время существуют два направления по испытанию шлифовальных кругов на механическую

прочность: первое – это испытание кругов на основе динамического метода; второе – испытание кругов с помощью статических методов.

Динамический метод реализуется на специальных станках, общий принцип работы которых состоит в раскручивании кругов до скоростей, превышающих рабочие на определенные величины (в 1,3 – 1,5 раза), с некоторой выдержкой по времени или без нее. Кроме того, производители шлифовальных инструментов, с целью определения максимально допустимой рабочей скорости шлифовальных кругов в партии, раскручивают несколько кругов до скорости, при которой происходит их разрушение. Осредненную скорость разрушения кругов в партии делят на коэффициент запаса прочности (обычно составляет 1,8–2, в зависимости от типа кругов) и получают максимально допустимую рабочую скорость для кругов в партии.

В Российской Федерации динамические испытания на механическую прочность по ГОСТ Р 52588–2011 и по ГОСТ 30513–97 являются обязательными перед установкой на шпиндель станка всех типов шлифовальных кругов, разрыв которых при работе представляет опасность для человека. Не подвергаются проверке лишь особо малые шлифовальные круги и головки. Среднегабаритные и, в особенности, крупногабаритные круги подвергаются стопроцентной проверке.

Статические методы основаны на том, что силы, возникающие при работе шлифовального круга, имитируют, прикладывая нагрузку к неподвижному кругу или к специальным образцам, например, вырезанным из него. Данные методы пока не заменяют полностью динамических методов испытания.

В связи с этим существует необходимость совершенствования станков для динамических испытаний кругов на механическую прочность, так как чем больше рабочая скорость круга, тем больше должна быть и скорость его испытания. К настоящему времени в нашей стране созданы и эксплуатируются станки для испытания шлифовальных кругов на разрывную прочность моделей АИП, СИП, ЛТ, ИА.

Станки моделей АИП – это однокамерные автоматы с вертикальным расположением шпинделя. Они предназначены для испытания в условиях крупносерийного и массового производства шлифовальных кругов, работающих со скоростями до  $60 \div 80$  м/с, с превышением рабочей скорости в 1,5 раза. Станки АИП оборудованы механизмами автоматической загрузки, зажима и разжима испытываемого круга, его выгрузки, а также имеют плавный набор испытательной скорости, выдержку и выключение по заданной программе. Станки оснащены автоматически закрывающимся защитным экраном рабочей зоны, а также блокирующими и контролирующими устройствами.

Станки серии СИП представляют собой многочисленную группу станков, созданных в разное время, разными заводами и предназначенных для контроля прочности кругов с превышением их рабочей скорости в  $1,5 \div 1,65$  раза.

В первую подгруппу этой серии входят однокамерные станки СИП-200, СИП-400 для испытания шлифовальных кругов с наружными диаметрами до  $200 \div 400$  мм с рабочими скоростями до  $80 \div 125$  м/с и выше.

Вторая подгруппа оборудования серии СИП – это двухкамерные станки СИП2-350 и СИП-800 для испытания шлифовальных кругов с наружными диаметрами  $150 \div 750$  мм, работающих со скоростью до  $60 \div 80$  м/с.

Третья подгруппа серии СИП – это станки СИП 800K1 и СИП 1000С, предназначенные для испытания на динамическую прочность средне- и крупногабаритных кругов с диаметрами до  $800 \div 1000$  мм, работающих со скоростями  $60 \div 125$  м/с и выше.

Четвёртая подгруппа серии СИП – это станки СИП-20 и СИП-40, предназначенные для испытания на динамическую прочность малогабаритных кругов диаметрами  $32 \div 150$  мм, работающих со скоростями до  $80 \div 100$  м/с и выше.

Станки серии ЛТ условно можно разделить на две подгруппы: первая подгруппа – это станки для испытания крупногабаритных кругов с рабочими скоростями до 60 м/с; вторая – это станки, предназначенные для испытания среднегабаритных кругов, работающих со скоростями до  $60 \div 80$  м/с.

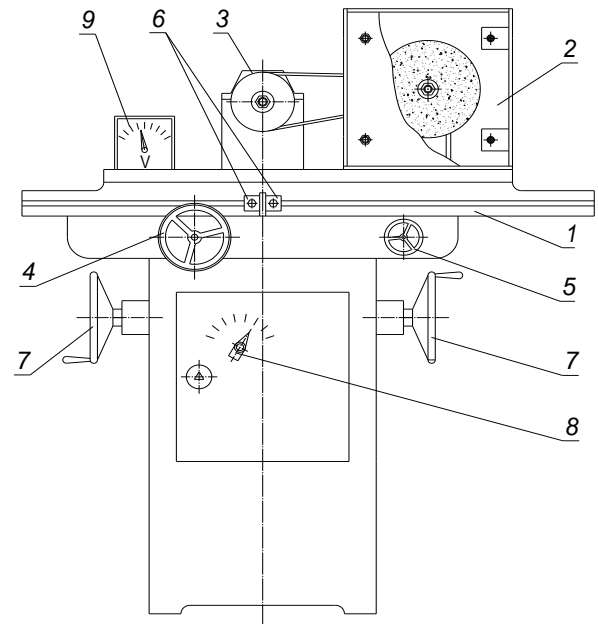
Станки серии ИА предназначены для испытания малых кругов, работающих со скоростями до  $65 \div 100$  м/с и выше. Шпиндель таких станков раскручивается воздушной турбиной.

Созданием и выпуском станков для испытания шлифовальных кругов на разрывную динамическую прочность занимаются также фирмы-производители оборудования для абразивной промышленности в Германии, Италии, США, Японии и в других странах. Одним из известных производителей испытательных станков такого типа является итальянская фирма «Davide Maternini». Данная фирма предлагает на рынке, например, модели станков для испытания отрезных и обдирочных шлифовальных кругов: модель 023/26 с максимальным числом оборотов шпинделя 26000 об/мин, для испытания кругов диаметром  $100 \div 500$  мм (с рабочей скоростью до 80 м/с); модель 023/32 с максимальной частотой вращения шпинделя 32000 об/мин, для испытания кругов диаметром  $100 \div 400$  мм (с рабочей скоростью до 100 м/с); модель 023/40 с максимальным числом оборотов шпинделя 40000 об/мин, для испытания кругов диаметром  $70 \div 180$  мм (с рабочей скоростью до 100 м/с).

## **2.2. Стенд для испытаний на прочность шлифовальных кругов и их моделей динамическим методом**

Применение станков, описанных в предыдущем разделе, не всегда бывает экономически оправданно, особенно в случаях периодической и редкой проверки на прочность небольших партий шлифовальных кругов, как это бывает, например, при проведении научных исследований, изготовлении и испытании моделей шлифовальных кругов. Кроме того, большинство испытательных станков, имеющих на отечественных машиностроительных

предприятиях, ввиду невысоких максимальных рабочих скоростей, не позволяют испытывать отрезные шлифовальные круги, армированные стеклосетками (доводить скорость круга до его разрыва), имеют ступенчатое переключение скоростей. Так, например, максимальная скорость вращения шпинделя у станка модели СИП-800 составляет 10500 об/мин, в то время как средние скорости разрыва обычных отрезных кругов с наружным диаметром 230 мм (предназначенных для работы со скоростью 80 м/с) составляют порядка 12000 об/мин. Вследствие этого, для проведения исследований более целесообразно использовать какой-либо готовый привод, доработанный и модернизированный под конкретную задачу. Именно такой путь был реализован на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» КузГТУ. В данном случае за базу был взят универсально-заточной станок модели 3А64Д, на основе которого был создан специальный испытательный стенд, внешний вид и конструкция которого представлены на рис. 1 (а, б).



а)  
Рис. 1. Внешний вид (а) и конструкция (б)  
испытательного стенда

Здесь, на рабочем столе 1, закреплена с помощью резьбовых соединений и Т-образных пазов бронекamera 2, стенки и съемная крышка которой выполнены из листовой стали толщиной 7 мм. В бронекамере находится шпиндельный узел, на который устанавливается испытуемый шлифовальный круг. Крышка камеры надежно фиксируется четырьмя болтами, чем обеспечивается получение замкнутого пространства, в котором происходит последующее разрушение шлифовального круга. Шпиндель испытательной камеры кинематически связан со шпиндельным узлом станка 3 посредством клиноремennой передачи. Расположение шкивов данной передачи в одной плос-



кости достигается посредством поперечного перемещения рабочего стола станка с помощью маховика 4. Предварительное натяжение ремня клиноременной передачи обеспечивается продольным перемещением стола 1, с закрепленной на нем испытательной бронекамерой 2, посредством маховика 5. Фиксация рабочего стола станка в необходимом положении осуществляется с помощью упоров 6. Более точное регулирование натяжения ремня клиноременной передачи производится вертикальным перемещением шпиндельного узла 3 с помощью маховика 7. Бесступенчатое регулирование скорости вращения шпинделя испытательной бронекамеры обеспечивается за счет тиристорного привода и переменного резистора 8, а контроль скорости вращения осуществляется с помощью вольтметра 9, включенного в цепь главного электродвигателя постоянного тока.

Кинематическая схема стенда отличается от кинематической схемы базового станка модели 3А64Д тем, что добавлено еще одно звено. Шпиндель станка связан со шпинделем испытательной бронекамеры посредством клиноременной передачи через шкивы с соотношением делительных диаметров соответственно 2,88:1. Такое техническое решение было применено для увеличения максимальной скорости вращения шпинделя бронекамеры. Для определения эксплуатационных параметров шпинделя бронекамеры был проведен расчет действующих при испытаниях нагрузок, выбран оптимальный материал для данного вала (сталь 40Х), назначена его термообработка (закалка в масле и высокий отпуск), а также выбраны подшипники, удовлетворяющие исходным требованиям. В шпиндельном узле бронекамеры, в частности, были применены радиально-упорные подшипники 36204 с максимальной допустимой скоростью вращения 20000 об/мин на жидкой смазке.

На стенде обеспечивается бесступенчатое регулирование скорости вращения шпинделя в пределах 800–18500 об/мин. Бронекамера и шпиндельный узел позволяют испытывать отрезные и обдирочные шлифовальные круги, а также модели кругов с максимальным диаметром 356 мм и высотой до 10 мм.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Для оценки разрывной прочности необходимо закрепить испытуемый шлифовальный круг на шпинделе и закрыть бронекамеру, для предотвращения травмирования при разрыве круга. Процесс испытания требует участия двух человек: оператора испытательного стенда (для регулировки числа оборотов шпинделя) и видеооператора (для видеофиксации процесса испытания и непосредственно самого момента разрыва круга).

Тиристорный привод преобразует переменный ток в постоянный и позволяет путем поворота переменного резистора R (барашек как на радиоаппаратуре) изменять (плавно увеличивать или уменьшать) величину подаваемого на электродвигатель напряжения в пределах 15–230 В. Чем больше подаваемое напряжение, тем больше обороты шпинделя (зависимость линейная).

Перед испытанием партии кругов (или моделей кругов) с определенной массой строят тарифовочный график:

1. При открытой бронекамере на шпиндель устанавливают металлический диск с массой примерно равной массе кругов, которые предстоит испытывать. Металлические диски в разы прочнее шлифовальных кругов и моделей кругов и их без опасности разрыва можно вращать на высоких скоростях без закрытия бронекамеры.

2. Включают вращение шпинделя и переменным резистором  $R$  устанавливают 40 В на вольтметре и трижды механическим тахометром типа СК определяют скорость вращения шпинделя (об/мин) с металлическим диском при данном напряжении. Колесико тахометра подводят и прижимают к цилиндрической поверхности металлического прижимного фланца на шпинделе и оно начинает вращаться с той же скоростью, на циферблате прибора отсчитываются об/мин. Данные заносят в формуляр. Затем измерения проводят на 80 В, после чего на 120 В. Итого получается девять измерений.

3. Для каждого измерения рассчитывают цену деления вольтметра, т. е. чему равен 1 В (об/мин). По девяти значениям рассчитывают среднюю цену деления вольтметра для данной партии кругов.

После этого можно приступать к испытанию шлифовальных кругов или их моделей. Испытания проводят в следующем порядке:

1. Круг устанавливают и зажимают на шпинделе, надежно закрывают крышкой бронекамеру.

2. Включают шпиндель при минимально возможных оборотах (т. е. минимальных показаниях вольтметра), переменный резистор  $R$  начинают плавно вращать, увеличивая вольтаж и обороты шпинделя. Параллельно производят видеосъемку вольтметра (звук также записывается).

3. Скорость вращения шпинделя увеличивают до тех пор, пока не произойдет разрушение круга.

4. Просматривают видеозапись показаний вольтметра при испытании и устанавливают (по характерному звуку разрушения круга), при каком напряжении (В) произошло разрушение круга.

5. Перемножением показаний вольтметра на цену деления вольтметра получают число оборотов шпинделя ( $n$ , об/мин) при которых произошло разрушение круга.

6. Рассчитывают окружную скорость разрушения круга ( $V$ , м/с) по формуле

$$V = \frac{\pi D n}{60000} \quad (1)$$

Здесь  $D$  – наружный диаметр круга [мм].

7. Делением скорости разрушения круга на коэффициент запаса прочности получают максимально допустимую рабочую скорость круга. Для шлифовальных кругов прямого профиля этот коэффициент равен 2, а для отрезных 1,8.

Для получения достоверных данных необходимо разрушить минимум 3 круга из исследуемой партии кругов с одинаковыми характеристиками. В этом случае можно исключить случайные факторы, например, когда один из кругов изготовлен с дефектом и его скорость разрыва существенно меньше, чем у двух других кругов. Данные по такому кругу в расчет не берутся. Хороший вариант – когда все три круга (или хотя бы два) имеют близкие скорости разрыва ( $\pm 5-7\%$ ).

#### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как влияет прочность шлифовальных кругов (моделей кругов) на их максимальную рабочую скорость?
2. Какие отрицательные последствия возможны при разрушении шлифовального кругов (модели круга) при эксплуатации?
3. Как производят испытания на прочность шлифовальных кругов (моделей кругов) перед их установкой на шпиндель шлифовального станка?
4. Как определяют максимально допустимую рабочую скорость партии кругов (моделей кругов)?
3. Какое оборудование необходимо для проведения динамических испытаний на прочность шлифовальных кругов и их моделей?

## **Лабораторная работа №13**

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОДЕЛЕЙ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ И ОЦЕНКА ИЗНОСА ЕДИНИЧНЫХ ЗЕРЕН В НИХ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

## **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Ознакомление студентов с методикой оценки эксплуатационных показателей моделей шлифовальных кругов и износа единичных зерен в них при резании.

## **2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

По общепринятой классификации износ единичных шлифовальных зерен подразделяется на следующие разновидности:

- износ истиранием (когда происходит постепенное истирание и выглаживание задней поверхности зерна с образованием площадки износа);
- износ скалыванием (когда в результате динамических нагрузок от зерна откалываются небольшие осколки);
- объемное разрушение зерна (при больших действующих нагрузках или малой прочности зерно раскалывается на несколько крупных частей и вылетает из связки);
- вырыв зерна из связки (при слабой адгезии зерна со связкой или неудачном расположении на рабочей поверхности инструмента оно под действием сил резания целиком вырывается из тела инструмента).

При шлифовании, когда осуществляется групповое микрорезание одновременно большим числом зерен, имеющих произвольную форму и расположение в инструменте, одновременно могут иметь место все перечисленные виды износа. Эффективность обработки и стойкость инструмента зависит от баланса видов износа. Например, если зерна изнашиваются преимущественно истиранием и скалыванием, то инструмент работает в благоприятных условиях и стойкость его будет велика. Если же большинство зерен раскалываются и вылетают из связки, то инструмент работает с интенсивным износом и будет иметь невысокую стойкость. При изменении условий работы зерен (режимов резания, физико-механических свойств обрабатываемого материала, применения СОЖ и пр.) возможен переход от одной стадии износа к другой: например, от износа по площадке к износу путем скалывания или к износу за счет объемного разрушения и наоборот.

Установление закономерностей механизма износа зерен дает возможность повысить эффективность работы инструмента в целом. Однако, непосредственное исследование износа отдельных зерен, находящихся на рабочей поверхности инструмента, на основе методов, используемых для лезвийных инструментов, реализовать технически трудно. Причина состоит в том, что зерна являются весьма мелкими объектами, размеры передних и задних по-

верхностей которых составляют всего десятые и сотые доли миллиметра, и их можно наблюдать только через микроскоп. Кроме того, зерна перемещаются в пространстве со скоростями десятки метров в секунду и прямое наблюдение за ними можно организовать только с использованием скоростных и сверхскоростных кино- или телекамер. Сюда добавляется также то, что на единице поверхности шлифовального инструмента могут находиться сотни зерен, каждое из которых обладает своими особенностями и изнашивается по-своему. В силу этих причин на практике преимущественно изучают не износ отдельных зерен, а всего инструмента в целом, контролируя его размерный (объемный) или массовый износ.

Вместе с тем, существуют и методы оценки износа отдельных зерен. К ним относятся: метод резания единичным зерном, анализ частиц шлама, образующегося при шлифовании, снятие профилограмм с рабочей поверхности инструмента, фотометрический метод, использование растрового электронного микроскопа, телекамер или сверхскоростных кинокамер.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

#### **3.1. Метод моделирования и оценка износа единичных зерен в моделях шлифовальных кругов**

Сущность метода состоит в том, что изготавливаются модели шлифовальных кругов (рис. 1), отличающиеся от стандартных инструментов только двумя особенностями – наличием оптически прозрачной связки и однорядным расположением зерен.

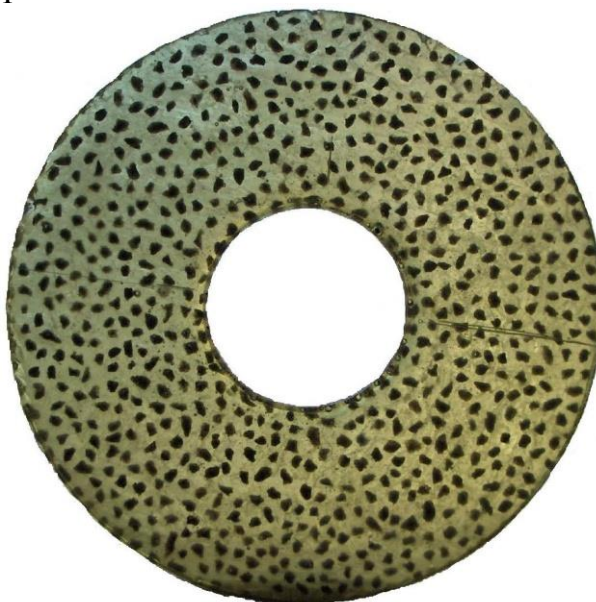


Рис. 1. Внешний вид модели отрезного шлифовального круга из оптически прозрачной связки и однорядным расположением зерен с размерами 100×2,2×32 мм

Прозрачная связка обеспечивает возможность визуального изучения контуров зерен на рабочей поверхности инструмента, а однорядное расположение зерен в теле инструмента исключает перекрытие одних контуров зерен другими. В качестве оптически прозрачной связки для моделей кругов используется эпоксидная смола, физико-механические свойства которой близки к свойствам бакелитовой связки (фенолформальдегидной смолы). Применение эпоксидной смолы обусловлено также тем, что данный материал применяется в качестве связующего при изготовлении некоторых типов шлифовальных инструментов, например, – кругов для шлифования шеверов.

Абразивным материалом в моделях круг служат зерна различных марок крупных зернистостей, например нормальный электрокорунда марки 13А, зернистость 200. Крупный номер зернистости выбирается с целью облегчения наблюдений за износом отдельных зерен. Соотношение зерен со связкой в моделях кругов берется в соответствии с открытой структурой № 12 и твердостью ЧТ (с целью максимально увеличить расстояния между зернами). Объем, отведенный под поры, также заменяется связкой. Размеры моделей кругов выбираются небольшими (например,  $D \times H \times d$  может соответствовать  $100 \times 2,2 \times 32$  мм). Модели шлифовальных кругов испытываются в условиях реальной абразивно-отрезной операции на установке, смонтированной на базе станка 3А64Д (рис. 2).

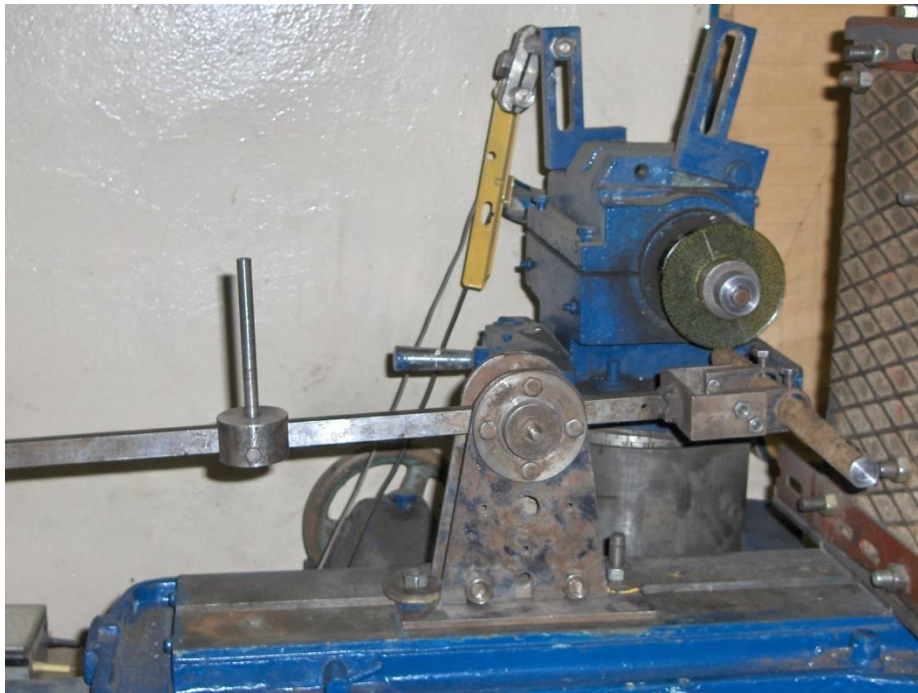


Рис. 2. Установка на базе станка 3А64Д для испытания резанием моделей отрезных шлифовальных кругов

В качестве обрабатываемой заготовки может быть использован, например, прутки из стали 10, диаметром 20 мм, а скорость резания моделей кругов из эпоксидной смолы может составлять  $V = 35$  м/с. В процессе испытаний обеспечивается постоянное усилие прижатия заготовки к кругу за счет ры-



чажно-балансирного механизма и может составлять, например, 3 Н. Испытания моделей кругов на указанных режимах проводятся путем осуществления резов, каждый продолжительностью 60 с. Испытуемым кругом осуществляется 25 резов, причем после каждого реза производится анализ износа всех зерен, находящихся на рабочей поверхности круга. Измеряется также длина линии реза на заготовке. Перед началом испытаний и после каждого реза модель круга укладывается торцевой поверхностью на планшетный сканер. Изображения, получаемые сканированием, обрабатываются и анализируются при помощи специально разработанной для этой цели программы для ЭВМ «Износ шлифовальных зерен» (свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008610817, авторы Коротков В. А., Рылов Г. М.).

Методика оценки износа единичных зерен и алгоритм специальной программы состоят в следующем. Исследуемую модель шлифовального круга после каждого реза устанавливают на сканере при помощи кондукторного устройства, обеспечивающего точную координатную и угловую фиксацию круга на поверхности сканера. Получаемые цветные изображения в первом блоке программы преобразовываются в черно-белые. Причем, при осуществлении каждого цикла преобразования получают два изображения модели круга. Первое изображение получают при оптических настройках, позволяющих зафиксировать связующее круга (эпоксидную смолу). Второе – с оптическими настройками для фиксации только изображений зерен. Во втором блоке программы производится анализ (рис. 3).

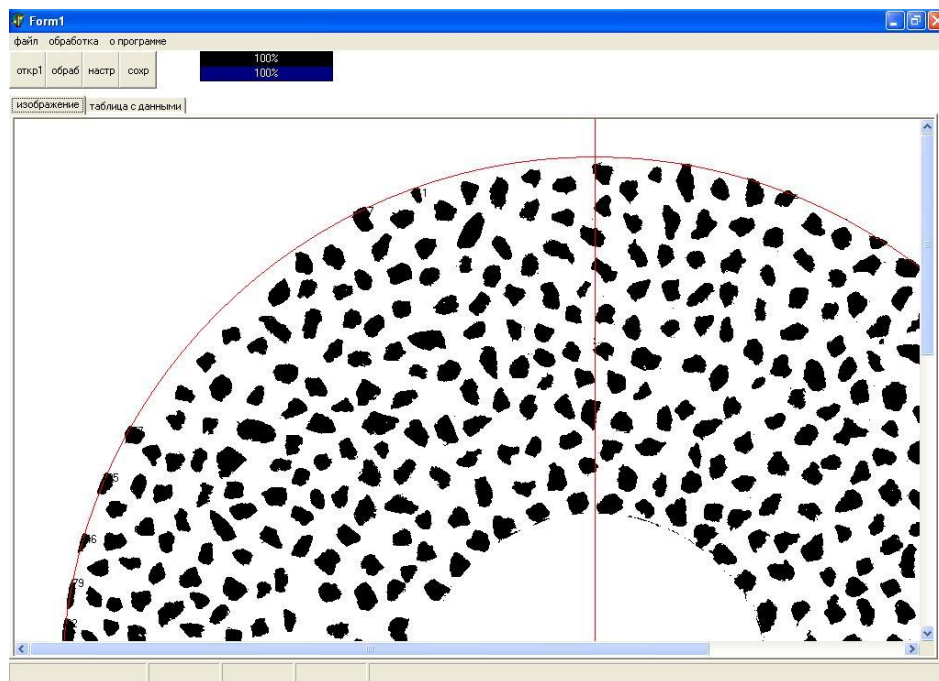


Рис. 3. Интерфейс программы для оценки износа единичных зерен в моделях шлифовальных кругов

Здесь первым исследуется изображение круга, полученное перед началом его испытаний. В результате, каждому зерну присваивается свой номер, запоминается его координатная область и определяется коэффициент формы, равный отношению диаметра описанной окружности к диаметру вписанной в проекцию зерна окружности. При последующем анализе изображений кругов (с зафиксированным связующим) получают конфигурацию контура рабочей поверхности круга. Совмещая данные контуры с изображениями, на которых зафиксированы только зерна, программа устанавливает, какие из них находятся на рабочей поверхности инструмента и определяются размеры площадок их износа. Получаемые данные сохраняются в виде таблиц Excel.

Таким образом, в процессе анализа видеоряда изображений зерен измеряются образующиеся площадки износа и визуально регистрируются разновидности износа – вырыв фрагментов зерен, разрушение их на части или удаление целиком из связки. В итоге удастся проследить за работой каждого единичного зерна, находящегося на поверхности круга, до момента его полного удаления из рабочего слоя. При известной частоте вращения круга и длине линии реза можно также определить стойкость каждого единичного зерна, т.е. время его контакта с металлом. Получаемые экспериментальные данные позволяют установить зависимости стойкости шлифовальных зерен и длины их площадок износа от марки и зернистости абразива, процента связки, коэффициента формы зерен и угла их ориентации.

### 3.2. Оценка эксплуатационных показателей моделей шлифовальных кругов

Помимо оценки износа единичных зерен в моделях шлифовальных кругов целесообразным также является контроль параметров, которые являются стандартными при проведении испытаний любых шлифовальных инструментов. В их число входят:

1. Режущая способность ( $Q_m$ ) (производительность шлифования), определяемая как отношение массы снятого материала заготовки ( $\Delta M_3$ ) ко времени обработки ( $t$ ):

$$Q_m = \Delta M_3 / t \quad (\text{г/мин}). \quad (1)$$

2. Коэффициент шлифования ( $K_{ш}$ ), вычисляемый как отношение массы снятого материала заготовки ( $\Delta M_3$ ) к израсходованной массе круга ( $\Delta M_k$ ):

$$K_{ш} = \Delta M_3 / \Delta M_k. \quad (2)$$

3. Эффективная мощность резания ( $W_{эф}$ ), характеризующая уровень энергозатрат при работе шлифовального круга и выражаемая через разницу мощностей рабочего ( $W_{рх}$ ) и холостого ходов ( $W_{хх}$ ):

$$W_{эф} = W_{рх} - W_{хх} \quad (\text{Вт}). \quad (3)$$



4. Качество отрезки заготовок, оцениваемое по теплонапряженности этого процесса, а также по изменению микротвердости и микроструктуры металла вблизи плоскости отрезки.

Наиболее важными и обязательными для контроля среди перечисленных параметров являются режущая способность и коэффициент шлифования у моделей кругов. Для их оценки, перед началом испытаний, после каждых 5 резов и после завершения испытаний измеряются массы модели круга и обрабатываемой заготовки на весах ВЛКТ-500-г-М с ценой деления 0,01 г. Кроме того, контролируется время резов с помощью механического секундомера с ценой деления 0,2 с.

#### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие методы применяются для оценки износа единичных абразивных зерен?
2. Из чего изготавливают модели шлифовальных кругов?
3. Каких соотношений зерен, связки и пор придерживаются при изготовлении моделей кругов?
4. По каким параметрам оценивают износ зерен в моделях шлифовальных кругов?
5. Особенности методики оценки износа зерен в моделях шлифовальных кругов?
6. Как оценивают коэффициент шлифования и режущую способность моделей кругов?
7. Какое оборудование необходимо для испытания моделей шлифовальных кругов, оценки их эксплуатационных показателей и износа зерен?

## **Лабораторная работа №14**

# **ОЦЕНКА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА**

## **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Цель данной работы – освоение студентами методики определения гранулометрического состава для различных фракций абразивных материалов, используемых при изготовлении алмазно-абразивных шлифовальных инструментов.

## **2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОМ СОСТАВЕ АБРАЗИВОВ**

### **2.1. Базовые характеристики фракций абразивов**

При производстве шлифовального инструмента используются выпускаемые заводами фракции абразивных материалов с определенными ГОСТами параметрами. В процессе получения абразивного материала его дробят, получая совокупность зерен различных размеров. Затем материал сортируется на фракции зерен различной зернистости по размеру. Абразивные зерна с размерами от 2000 до 40 мкм подвергается рассеву на пакете сит с последовательно уменьшающимися просветами ячеек. Более мелкие шлифпорошки разделяются посредством гидравлической классификации, при которой используется различие скорости осаждения зерен различной крупности в жидкости в поле центробежных сил или сил тяжести.

Обе технологии разделения не обеспечивают одинаковых размеров зерен в выделенных фракциях, хотя размер зерна подчиняется определенному статистическому закону. Исследованиями установлено, что крупность зерен абразива – важнейший параметр, оказывающий сильное влияние на характеристики шлифовального инструмента. Для конкретной операции обработки в абразивно-шлифовальном инструменте наиболее эффективно будут работать зерна определенного размера. Более крупные зерна обеспечивают высокую производительность при обдирочном и отрезном шлифовании, зерна средних и мелких зернистостей – низкую шероховатость и высокую размерную точность на чистовых операциях шлифования. Наличие в реальных фракциях зерен частиц большего и меньшего размера, по сравнению с оптимальным, всегда ухудшает характеристики инструмента. Применяя в производстве повторную классификацию фракций абразива по крупности, можно уменьшить разброс размеров, но это сильно удорожает его стоимость. Поэтому заводы выпускают фракции абразива с разным разбросом размеров зерен относительно среднего, разной стоимости, для производства шлифовального инструмента для соответствующих работ.

Обычно во фракциях абразивов допускается высокое содержание зерен с размерами меньше заявленного номера зернистости (до 40–60 % от объема). В микропорошках, а также фракциях алмазов и кубического нитрида бора содержание основной (заявленной) фракции составляет более 90 %.

Таким образом, выпускаемые заводами фракции абразивов характеризуются тремя параметрами:

- маркой абразивного материала, обозначающей его химический состав;
- зернистостью, характеризующей крупность зерен в данной фракции;
- индексом минимального содержания основной фракции, характеризующим разброс размеров отдельных зерен относительно среднего.

Все виды абразивных материалов делятся на природные (добываемые в карьерах и шахтах) и искусственные (изготавливаемые на абразивных заводах). Дополнительно абразивы разделяются на обычные абразивы (основной химический элемент в которых – это оксид алюминия или других металлов, оксид кремния, карбид кремния и др.) и на сверхтвердые материалы (СТМ), к которым относятся природный и синтетический алмаз, а также кубический нитрид бора (эльбор, боразон).

Так как эти группы материалов сильно отличаются по свойствам, технологиям изготовления и другим характеристикам, обозначение и контроль их гранулометрического состава тоже имеют отличия. Также отличается контроль гранулометрического состава шлифзерна и мелких шлифпорошков вследствие разной технологии их разделения. Номенклатура выделяемых фракций по зернистости и индексу разброса, а также способы контроля их гранулометрического состава нормированы ГОСТами.

## **2.2. Гранулометрический состав фракций абразивов**

Установлено, что распределение размеров зерен подчиняется нормальному закону. Для контроля весь диапазон рассеяния размеров зерен делится на несколько частей – размерных фракций. Для шлифзерна (рис. 1) выделяются мелкая 1, основная 2, крупная 3 и комплексная 4 размерные фракции.

Для шлифпорошков (рис. 2) добавляется предельная размерная фракция 5 и изменяются границы комплексной фракции. Наиболее важной является основная размерная фракция – чем выше ее процентное содержание, тем более качественной является фракция абразива. Остальные размерные фракции с большими или малыми размерами зерна при большом содержании ухудшают состав абразива.

Гранулометрический состав – совокупность размеров единичных зерен фракции абразивного материала. ГОСТом нормируется относительное массовое содержание зерен разных размерных фракций в зависимости от индекса разброса.

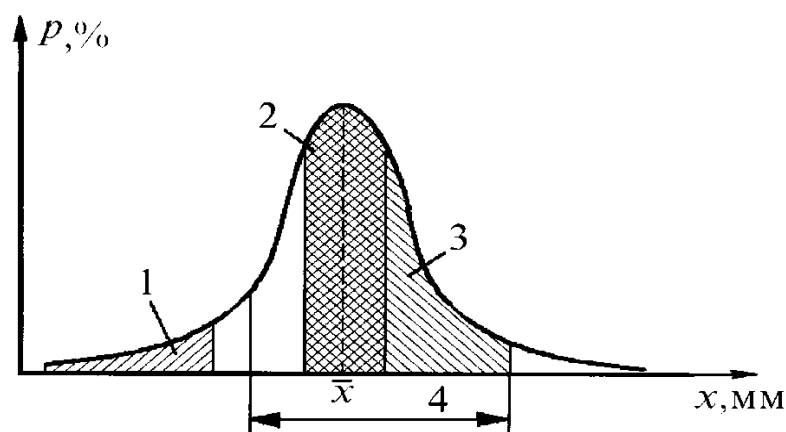


Рис. 1. Размерные фракции для шлифзерна

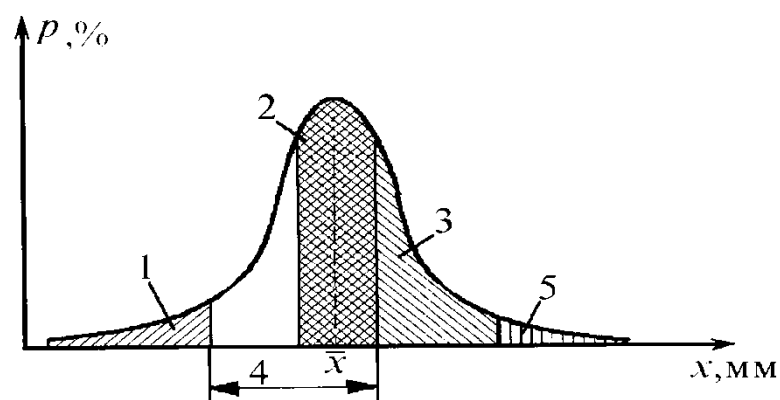


Рис. 2. Размерные фракции для шлифпорошка

За номер зернистости принимается размер нижней для шлифзерна или верхней для шлифпорошков границы основной размерной фракции. На практике с небольшой погрешностью считают, что зернистость соответствует среднему размеру зерен фракции.

В Российской Федерации для обозначения фракций абразивов могут использоваться два стандарта – европейзированный ГОСТ Р 52381-2005 и ГОСТ 3647-80, маркировка в которых существенно отличается. Так, согласно ГОСТ 3647-80, в зависимости от размеров вся номенклатура фракций абразивов подразделяется на:

зернистости	200–16 – шлифзерно;
	12–4 – шлифпорошки;
	M63–M14 – микрошлифпорошки;
	M10–M3 – тонкие микрошлифпорошки.

Зернистость измеряется в десятках микрометров, например, средний размер зерна абразива зернистости № 32 равен 320 мкм (№ 40 – 400 мкм, № 63 – 630 мкм). Если перед номером зернистости стоит буква М (M16, M8 и т. п.), то это – микрошлифпорошок и в его обозначении указан размер основной фракции в микрометрах (M16 – 16 мкм). Кроме того, согласно ГОСТ 3647-80, для шлифовальных зерен и шлифпорошков существует 4 индекса качества рассева по размеру – В, П, Н, Д – обозначающие, соответ-

ственно, высокое ( $\geq 55\%$ ), повышенное ( $\geq 50\%$ ), нормальное ( $\geq 45\%$ ), и допустимое ( $\geq 40\%$ ), содержание основной размерной фракции и соответствующие ограничения на содержание остальных. Чем выше содержание основной фракции, тем выше эксплуатационные свойства фракции абразива, но вместе с тем она дороже. В обозначение зернистостей, согласно ГОСТ 3647–80, всегда указывается один из упомянутых индексов, например, 13А 40Н – это нормальный электрокорунд марки 13А зернистостью 40 с нормальным качеством отсева.

Второй стандарт – ГОСТ Р 52381–2005, представляет собой русифицированную версию стандарта европейских производителей абразивов (FEPA), где в шкале зернистостей, чем меньше номер, тем крупнее абразив. Например, зернистость F10 (по ГОСТ Р 52381) приблизительно соответствует зернистости 200Н (по ГОСТ 3647), F40 – 40Н, F220 – 5Н. Шкала приблизительных соответствий указана в упомянутом ГОСТ Р 52381. Соответствия зернистостей приблизительные и неполные, поскольку отличаются не только маркировки, но и размеры сит, используемых в РФ и европейскими производителями. Отечественные сита имеют коэффициент увеличения размера ячейки смежных сит 1,25, а европейские – 1,21. Поэтому в европейской шкале зернистостей на несколько номеров больше. Кроме того, зерна для шлифовальных кругов здесь обозначают номером с буквой F или без нее (например, F40 или 40), а зерна для шлифовальных шкур и лепестковых кругов – с буквой Р (Р120, Р180...). Зерна для шкур изготавливаются по технологиям ускоренного охлаждения расплава и имеют более игольчатую форму.

Для шлифовальных материалов из СТМ, независимо от страны изготовления, вместо условного индекса зернистости указываются истинный диапазон предельных размеров зерен основной фракции в микрометрах (например, 160/125), причем содержание основной фракции у СТМ составляет более 90 % от общего объема зерен. Для этих материалов введены два диапазона границ основной размерной фракции – широкий и узкий. Фракции узкого диапазона более качественные и дорогие, чем широкого. Кроме того, зерна СТМ разделяются на сепараторах и нормируются по форме через коэффициент, равный отношению длины к ширине зерна. Более 90 % зерен во фракциях СТМ должны иметь коэффициент формы из заданного диапазона.

### **2.3. Контроль гранулометрического состава абразивов**

Сущность контроля гранулометрического состава фракции абразива сводится к определению тем или иным способом относительного содержания по массе в нем всех размерных фракций и сравнению их со значениями, оговоренными стандартом.

Существуют два метода контроля гранулометрического состава – ситовой и микроскопический. При ситовом методе контрольную навеску абразивного материала просеивают через набор сит, причем размеры ячеек сит соответствуют границам размерных фракций для данной зернистости. Так, например, если 97 % зерен исследуемой фракции прошли через сито с ячей-

кой 800 мкм, большинство зерен (48 %) задержалось на сите с ячейкой 630 мкм, а остальные зерна распределились по ситам с меньшими ячейками, то это – абразив с зернистостью 63Н (по ГОСТ 3647–80). Относительные массы ситовых остатков будут равны относительным содержаниям соответствующих размерных фракций.

Для шлифпорошков ситовой метод дает большую погрешность, поэтому приходится применять трудоемкий микроскопический метод. При данном методе готовится препарат из суспензии зерен в жидкости и помещается под микроскоп. Измеряются поперечные размеры единичных зерен (рис. 3).

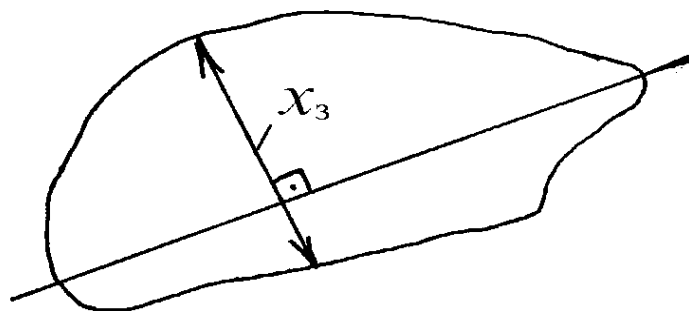


Рис. 3. Схема измерения проекции зерна

Объем выборки берется 750–1500 зерен для достоверного анализа. Определив по ГОСТу границы размерных фракций для данной зернистости, каждое зерно относят к той или иной размерной фракции. После анализа всех зерен рассчитываются объем зерен всей проанализированной выборки и объем зерен в каждой размерной фракции в отдельности. Относительные содержания размерных фракций определяются отношениями объемов зерен в этих фракциях к общему объему зерен выборки.

Развитие систем графического распознавания образов при помощи ЭВМ в настоящее время позволяет создать измерительные системы на базе микроскопов, автоматически измеряющие размеры проекций зерен и выполняющие все расчеты при контроле гранулометрического состава. Применение таких систем позволяет резко повысить производительность контроля состава шлифпорошков.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя навеску абразива, лупу Бринелля или распечатки проекций зерен и масштабную линейку либо набор сит.
2. Определить число рассматриваемых зерен (объем выборки)  $n$ . Рекомендуется объем выборки 200–400 штук (либо массу не менее 100 г).
3. Подготовить таблицу для записи результатов.
4. Для каждого из  $n$  зерен произвести измерение (рис. 3) наибольшего поперечного размера  $x_{zi}$ , значение которого занести в таблицу, либо измерить массы фракций, задержавшихся на различных ситах.

Таблица 1

Фракция абразива:

Объем выборки  $n =$ 

№	$x_{zi}$ , мм	$x_i$ , мм	$x_i^2$	$V_i$ , мм <sup>3</sup>

5. Скорректировать размер зерна

$$x_i = \frac{x_{zi}}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

определить  $x_i^2$  и условный объем зерна

$$V_i = x_i^3. \quad (2)$$

Полученные значения занести в таблицу.

6. Найти выборочное среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3)$$

а также среднеквадратическое отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)}. \quad (4)$$

7. Подготовить таблицу количественной оценки гранулометрического состава (см. приложение, табл. 3). Путем анализа данных найти наибольшее и наименьшее значение размера зерна в данной выборке. Принять такое значение величины интервала  $\Delta$ , чтобы весь диапазон размеров зерен в данной выборке укладывался в 12–15 интервалов (в табл. 2 показано 2 интервала при  $\Delta = 0,05$  мм). Рассчитать границы интервалов и занести их в таблицу. По данным выборки найти количества зерен  $n_i$ , попавших в каждый из интервалов по размеру. Для удобства пометку о принадлежности зерна определенному интервалу можно делать в графе «подсчет» таблицы. Определить относительное содержание зерен по интервалам по формуле

$$p_i = \frac{n_i}{n} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Полученные данные занести в таблицу.

Таблица 2

Гранулометрический состав фракции

№	Границы интервала	Подсчет	$n_i$ , шт.	$p_i$ , %
1	[0,3–0,35)			
2	[0,35–0,4)			

8. На основании полученных данных построить график (гистограмму) гранулометрического состава данной фракции (рис. 4).

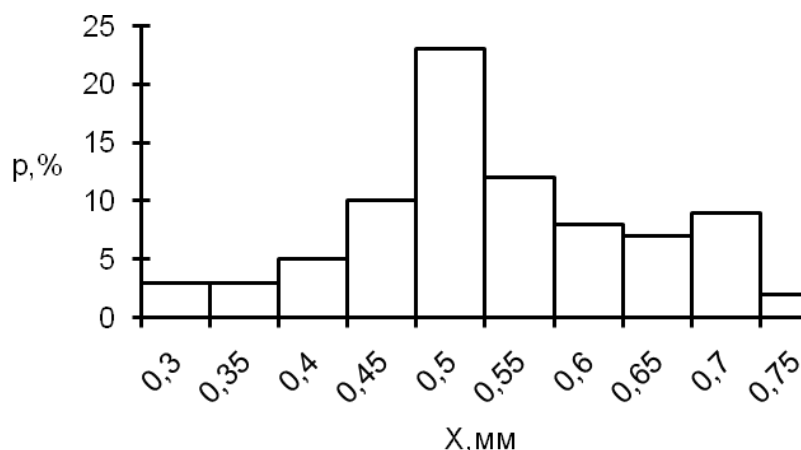


Рис. 4. Гистограмма гранулометрического состава

9. Подготовить таблицу для проверки соответствия выборки нормальному закону распределения по критерию Пирсона  $\chi^2$ .

Таблица 3

Проверка выборки на нормальность распределения

№	Границы		$n_i$	Границы		$p_i$	$\chi^2_i$
	$x_{i\text{ниж}}$	$x_{i\text{вер}}$		$z_{i\text{ниж}}$	$z_{i\text{вер}}$		
1	0,3	0,35					
2	0,35	0,4					

10. Из табл. 2 в табл. 3 переписать границы интервалов по размеру зерна и числа зерен, попавшие в интервалы. Если в интервале число зерен менее 5, такой интервал объединяется с соседним с соответствующей коррекцией границ.

11. Для каждого интервала определить величины:

$$z_{i\text{ниж}} = \frac{x_{i\text{ниж}} - \bar{x}}{s}, \quad (6)$$

$$z_{i\text{вер}} = \frac{x_{i\text{вер}} - \bar{x}}{s}, \quad (7)$$

$$p_i = \Phi(z_{i\text{вер}}) - \Phi(z_{i\text{ниж}}), \quad (8)$$

$$\chi^2_i = \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (9)$$



Для первого интервала принять  $z_{\text{ниж}} = -\infty$ , для последнего  $z_{\text{вер}} = \infty$ . Значения функции Лапласа  $\Phi(z)$  приведены в приложении. Следует учесть, что  $\Phi(-z) = -\Phi(z)$ . Полученные результаты занести в таблицу.

12. Определить значение  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^e \chi_i^2, \quad (10)$$

где  $e$  – число интервалов после объединения.

Определив число степеней свободы  $k = e - 3$  и задавшись доверительной вероятностью  $P$  (можно принять 0,9 или 0,95) по таблице приложения находим критическое значение  $\chi_P^2$ .

Если  $\chi^2 \leq \chi_P^2$ , то выборку можно считать распределенной по нормальному закону.

13. Подготовить таблицу для определения относительного содержания размерных фракций в выборке (прил., табл. 4).

Таблица 4

Относительное содержание размерных фракций

Фракция	Границы	$V_{\phi i}$	$P_{\phi i}$

14. По зернистости исследуемой фракции выписать в табл. 4 границы всех размерных фракций (приведены в приложении). Для зерен, размеры которых соответствуют каждой размерной фракции (табл. 1) найти величину

$$V_{\phi i} = \sum_{i=1}^k V_i. \quad (11)$$

15. Определить относительное содержание размерных фракций в исследуемой выборке:

$$P_{\phi i} = \frac{\sum_{i=1}^4 V_{\phi i}}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (12)$$

Полученные данные занести в таблицу.

16. По рассчитанному содержанию размерных фракций и данным таблицы приложения присвоить данной выборке буквенный индекс минимального содержания основной размерной фракции.

17. На основании полученных данных сделать выводы:

- существует ли разброс размеров зерен в исследованной выборке;
- подчиняется ли распределение размеров зерен нормальному закону;

– соответствует ли присвоенный индекс разброса размеров зерен заявленному в характеристике абразива.

#### **4. ОБОРУДОВАНИЕ**

1. Навески абразивных материалов (шлифзерна) различных видов и зернистостей по 15–20 г (12–15 шт.).
2. Лупа Бринелля (3–4 шт.).
3. Комплекты распечаток форм проекций абразивных материалов различных видов и зернистостей (10–12 шт.).
4. Линейки (4–5 шт.).
5. Набор сит.

#### **5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет выполняется на отдельных листах формата А4. Все измерения и расчеты производятся в соответствии с вышеприведенной методикой и вносятся в отчет. При защите работы отчет проверяется и подписывается преподавателем.

#### **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Для каких целей выпускается широкая номенклатура фракций абразивов с зёрнами различной крупности?
2. Какие существуют технологии разделения зёрен по крупности?
3. На какие группы делятся абразивы по своему составу и почему?
4. Вследствие чего появляется различие размеров зёрен в одной фракции?
5. Что такое зернистость абразива?
6. Перечислить размерные фракции для шлифзерна и шлифпорошков.
7. Что обозначает индекс минимального содержания основной фракции?
8. Как контролируется гранулометрический состав фракций абразивов?

#### **7. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Ознакомиться с методикой контроля гранулометрического состава зёрен фракции по ГОСТ 3647–80 (Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 304 с.). 1 ч.

2. Изучить пример исследования, показывающего влияние крупности зёрен абразивного материала на эксплуатационные характеристики шлифовального инструмента (Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – Машиностроение, 1974. – 320 с., с. 211–235). 1 ч.

## **Лабораторная работа №15**

### **ОЦЕНКА РАЗНОВИДНОСТЕЙ ФОРМ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН**

#### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью данной работы является освоение студентами методов определения формы единичного зерна абразива качественным и количественным способами, а также методики интегральной оценки совокупности форм зерен для фракций абразивных материалов.

#### **2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРМЕ ЗЕРЕН АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

##### **2.1. Параметр формы зерен в стандартных фракциях абразивов**

Абразивные зерна в составе шлифовального инструмента выполняют роль режущих элементов, поэтому эксплуатационные характеристики инструмента в целом сильно зависят от характеристик входящих в него зерен – их размера, формы, вида материала и т. д.

При производстве шлифовального инструмента используются выпускаемые заводами фракции абразивных материалов с определенными ГОСТом параметрами. В производстве абразивных материалов в первую очередь материал сортируется на фракции по размеру (крупности) его зерен. Более крупное шлифовальное зерно подвергается рассеву на ситах, более мелкие шлифовальные порошки разделяются посредством гидравлической классификации.

Эти технологии разделения не обеспечивают одинаковых размеров и формы зерен в выделенных фракциях, хотя эти параметры подчиняются определенным статистическим закономерностям. В то же время практикой эксплуатации шлифовального инструмента и исследованиями установлено, что форма зерен абразива оказывает достаточно сильное влияние на характеристики инструмента. Для разных инструментов в различных условиях обработки наиболее эффективно работают зерна различных форм.

Таким образом, контроль формы зерен при производстве абразивов является существенным резервом для улучшения шлифовального инструмента.

Для этого необходимо решить ряд задач:

- разработать методику оценки формы единичного зерна и совокупности зерен;
- разработать технологию стабилизации формы зерен в стандартных фракциях или технологию разделения зерен по форме;
- исследовать работу зерен разной формы в разных условиях резания для создания специализированного инструмента и т. д.

В настоящее время делаются первые шаги в решении этой проблемы. Контроль формы зерен введен в ГОСТ 14706–78, ГОСТ 9206–80 и

ГОСТ Р 52370–2005 на шлифовальные материалы из алмаза и эльбора. Стандартом определяется методика интегральной оценки форм зерен фракции, а также нижний предел процентного содержания в ней зерен изометрической формы. Если содержание зерен данной формы меньше допустимого, фракция бракуется. Для других видов абразивных материалов проблема контроля формы зерен находится в стадии исследования и разработки.

## 2.2. Методика оценки формы единичного абразивного зерна

Абразивное зерно является объемным телом, однако для оценки его формы достаточно рассмотреть его проекцию, полученную в отраженном или проходящем свете при помещении зерна на гладкую горизонтальную поверхность.

Существует две методики оценки формы зерна – качественная и количественная. Качественная методика, быстрая и менее трудоемкая, применяется для первичной оценки совокупности форм зерен. Количественная оценка применяется для более точной оценки совокупности форм зерен, но является и значительно более трудоемкой. Как качественная, так и количественная оценки производятся на основе изучения проекций зерен.

При качественной оценке оператор визуально оценивает форму проекции и относит зерно к одной из трех групп: к зернам изометрической, промежуточной или пластинчатой формы. При этом он может пользоваться эталонами форм проекций.

Количественная оценка формы зерна заключается в расчете числового параметра – коэффициента формы зерна  $K_{\phi}$ .

Коэффициент формы рассчитывается по геометрическим параметрам проекции, которые измеряются тем или иным способом (рис. 1).

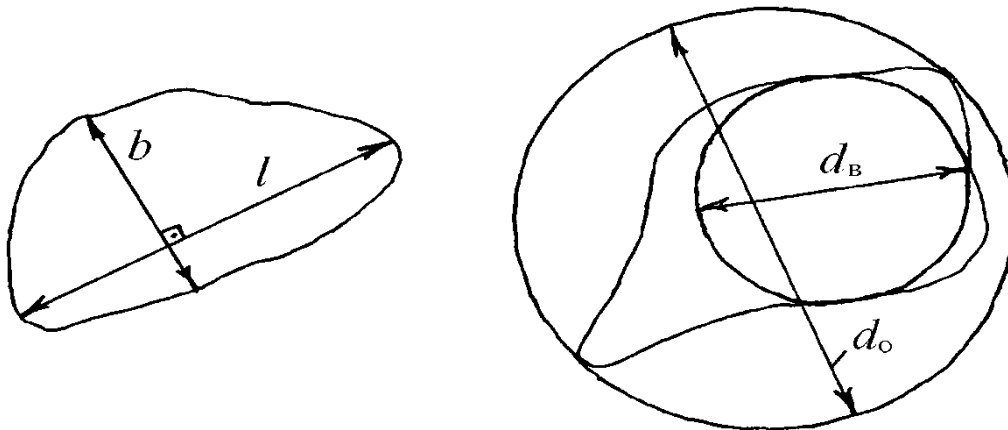


Рис. 1. Геометрические параметры проекции зерна

Коэффициент формы зерна может определяться, как

$$K_{\phi} = \frac{l}{b}, \quad (1)$$

где  $l$  – наибольший размер проекции зерна (длина);  $b$  – наибольший размер в направлении, перпендикулярном длине проекции.

Существует другая методика для расчета  $K_{\phi}$ :

$$K_{\phi} = \frac{d_o}{d_b}, \quad (2)$$

где  $d_o$  – диаметр описанной вокруг проекции окружности;  $d_b$  – диаметр вписанной в проекцию окружности.

Коэффициенты формы единичных зерен практически лежат в диапазоне 1,0 – 4,0. Чем ближе форма зерна к правильной сфере, тем ближе коэффициент его формы к единице. Формула (1) менее точна, чем формула (2), так как завышает число зерен изометрической формы. С другой стороны, применение формулы (1) менее трудоемко при измерении размеров проекции. С развитием автоматизации оценки форм зерен посредством применения ЭВМ целесообразно использовать формулу (2) как более точную. В существующем ГОСТе  $K_{\phi}$  определяется по формуле (1).

Измерение размеров проекций зерен производят разными методами, главной трудностью здесь являются малые размеры зерна абразива. Для мелких шлифпорошков используют измерительные микроскопы с большим увеличением, для которых готовят специальный препарат – взвесь зерен абразива в воде. Для более крупного шлифзерна используются переносные измерительные лупы, устанавливаемые на единичное зерно, вручную помещенное на подходящую подложку. Сканирование шлифзерна с применением ЭВМ и последующее получение распечатки проекций в увеличенном виде позволяет легко измерять их линейкой и шаблонами.

### 2.3. Методика оценки совокупности форм зерен у фракции абразива

Совокупность коэффициентов форм единичных зерен фракции составляет распределение (спектр форм), подчиняющееся определенному закону. При качественной оценке находят относительного количества зерен разных разновидностей форм.

Рассматривая коэффициент формы как случайную величину, при интегральной количественной оценке форм зерен фракции необходимо определить ее статистические характеристики и закон распределения. Для этого нужно обработать выборку достаточного объема, пользуясь методами математической статистики.

Обработка выборок большого объема (например, ГОСТом требуется объем не менее 700 зерен) связан с большим количеством вычислений. Для ускорения процесса в настоящее время для расчетов широко используется ЭВМ. Совершенствование систем графического распознавания образов позволяет создать программные комплексы, автоматически измеряющие размеры проекций при сканировании зерен и выполняющие все расчеты при оценке спектра форм зерен.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя навеску абразива и лупу Бринелля или распечатки проекций зерен и масштабную линейку.

2. Определить число рассматриваемых зерен (объем выборки)  $n$ . Рекомендуется объем выборки 200–400 штук.

3. Подготовить таблицу для записи результатов.

Таблица 1

Фракция абразива:

Объем выборки  $n =$

№	Длина $l$ , мм	Ширина $b$ , мм	$K_{\phi}$	$K_{\phi}^2$	Качественная оценка

4. Для каждого из  $n$  зерен произвести измерение (рис. 1) наибольшей длины  $l$  и ширины  $b$  проекции зерна, значения которых занести в таблицу.

5. Сравнивая проекцию зерна с эталонами форм проекций (рис. 2, 3, 4), качественно определить форму зерна, сделав пометку в соответствующей графе таблицы.

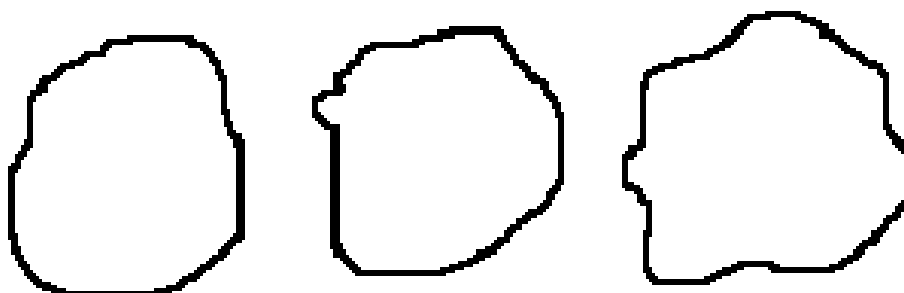


Рис. 2. Проекция зерен изометрической формы



Рис. 3. Проекция зерен промежуточной формы



Рис. 4. Проекции зерен пластинчатой формы

6. Рассчитать по формуле (1) значения коэффициентов формы зерен  $K_{\phi}$ , а также величины  $K_{\phi}^2$ . Значения занести в таблицу.

7. Подготовить таблицу качественной оценки совокупности форм исследуемой фракции.

Таблица 2

Качественная оценка спектра форм зерен

Форма	Изометрическая	Промежуточная	Пластинчатая
$n_i$ , шт.			
$p_i$ , %			

8. Подсчитать по выборке отдельно количества  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  соответственно зерен изометрической, промежуточной и пластинчатой формы. Определить относительное содержание различных форм зерен:

$$p_i = \frac{n_i}{n} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Полученные данные занести в таблицу.

9. Найти выборочное среднее:

$$\bar{K}_{\phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\phi i} , \quad (4)$$

а также среднеквадратическое отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n K_{\phi i}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n K_{\phi i} \right)^2 \right)} . \quad (5)$$

10. Подготовить таблицу количественной оценки совокупности форм исследуемой фракции.

Таблица 3

Количественная оценка спектра форм зерен

№	Границы интервала	Подсчет	Количество зерен $n_i$ , шт.	Содержание, %
1	(1–1,1)			
2	(1,1–1,2)			

11. Наименьшим возможным значением коэффициента формы будет единица. По табл. 1 найти наибольшее значение коэффициента формы в данной выборке. Принять такое значение величины интервала  $\Delta$ , чтобы весь диапазон коэффициентов форм в данной выборке укладывался в 12–15 интервалов (в табл. 3 показано два интервала при  $\Delta = 0,1$ ). Рассчитать границы интервалов и занести их в таблицу.

12. По данным табл. 1 найти количества зерен  $n_i$ , попавших в каждый из интервалов. Для удобства пометку о принадлежности зерна определенному интервалу можно делать в графе «подсчет» таблицы 3. Определить относительное содержание зерен по интервалам по формуле (3), полученные данные занести в таблицу.

13. На основании полученных данных построить гистограмму совокупности форм зерен выборки (рис. 5).

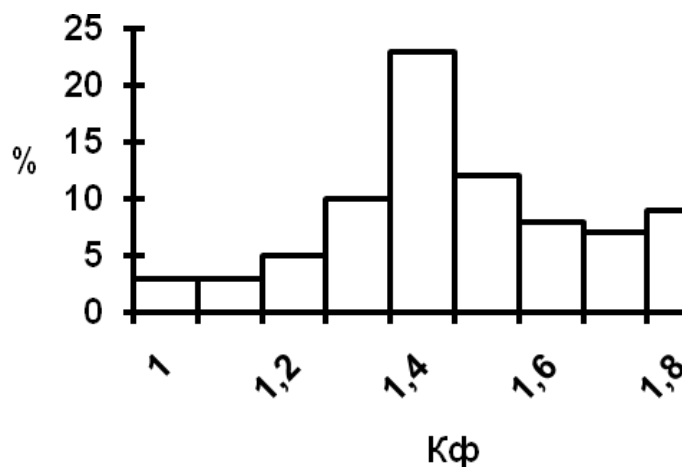


Рис. 5. Гистограмма совокупности форм зерен

14. Подготовить таблицу для проверки соответствия выборки нормальному закону распределения по критерию Пирсона  $\chi^2$ .

Таблица 4

Проверка выборки на нормальность распределения

№	Границы		$n_i$	Границы		$p_i$	$\chi^2_i$
	$K_{\text{фниж}}$	$K_{\text{фвер}}$		$z_{\text{ниж}}$	$z_{\text{вер}}$		
1	1	1,1					
2	1,1	1,2					

15. Из табл. 3 в табл. 4 переписать границы интервалов по коэффициенту формы и числа зерен, попавшие в интервалы. Если в интервале число зерен менее 5, такой интервал объединяется с соседним с соответствующей коррекцией границ.

16. Для каждого интервала определить величины:



$$z_{\text{ниж}} = \frac{K_{\text{фниж}} - \bar{K}_{\text{ф}}}{s}, \quad (6)$$

$$z_{\text{вер}} = \frac{K_{\text{фвер}} - \bar{K}_{\text{ф}}}{s}, \quad (7)$$

$$p_i = \Phi(z_{\text{вер}}) - \Phi(z_{\text{ниж}}), \quad (8)$$

$$\chi^2_i = \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}. \quad (9)$$

Для первого интервала принять  $z_{\text{ниж}} = -\infty$ , для последнего  $z_{\text{вер}} = \infty$ . Значения функции Лапласа  $\Phi(z)$  приведены в приложении. Следует учесть, что  $\Phi(-z) = -\Phi(z)$ . Полученные результаты занести в таблицу.

17. Определить значение  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^e \chi_i^2, \quad (10)$$

где  $e$  – число интервалов после объединения.

Определив число степеней свободы  $k = e - 3$  и задавшись доверительной вероятностью  $P$  (можно принять 0,9 или 0,95) по таблице приложения находим критическое значение  $\chi_P^2$ .

Если  $\chi^2 \leq \chi_P^2$ , то выборку можно считать распределенной по нормальному закону.

18. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы:

- однороден ли спектр форм зерен исследованной фракции абразива;
- подчиняется ли спектр форм нормальному закону распределения.

#### 4. ОБОРУДОВАНИЕ

1. Навески абразивных материалов различных видов и зернистостей по 15–20 г (12–15 шт.).
2. Лупа Бринелля, сканер, либо смартфон с фотокамерой (3–4 шт.).
3. Комплекты распечаток форм проекций абразивных материалов различных видов и зернистостей (10–12 шт.).
4. Линейки и шаблоны окружностей (4–5 шт.).

#### 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет выполняется на отдельных листах формата А4. Все измерения и расчеты производятся в соответствии с вышеприведенной методикой и вносятся в отчет. При защите работы отчет проверяется и подписывается преподавателем.

## **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Обеспечивает ли современная технология производства абразивных материалов однородность формы зерен?
2. Почему важен контроль формы зерен абразивных материалов?
3. Для каких видов шлиф-материалов установлен контроль формы зерен?
4. Назвать разновидности методик определения формы единичного зерна и их особенности.
5. Что такое коэффициент формы и как он рассчитывается?
6. Как производится количественная интегральная оценка спектра форм зерен фракции абразива?

## **7. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**

1. Ознакомиться с методикой контроля форм зерен во фракциях по ГОСТ 14706–78, ГОСТ 9206–80 и ГОСТ Р 52370–2005 для шлифовальных материалов из алмаза и кубического нитрида бора (0,5 ч).
2. Изучить теоретические основы сортировки зерен по размеру при производстве абразивов и источники неоднородности форм зерен во фракции (Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 304 с., с. 23-31) (0,5 ч).
3. Изучить пример исследования, показывающего влияние спектра форм зерен абразивного материала на эксплуатационные характеристики шлифовального инструмента (Нетребко, В. П. Прочность шлифовальных кругов / В. П. Нетребко, А. Н. Коротков. – Москва : Агентство российской печати «Николь», 1992. – 104 с., с. 51-80) (1 ч).

## Значения функции Лапласа

$z$	$\Phi(z)$	$z$	$\Phi(z)$	$z$	$\Phi(z)$	$z$	$\Phi(z)$
0	0	0,76	0,2765	1,52	0,4355	2,28	0,4885
0,02	0,008	0,78	0,2825	1,54	0,439	2,3	0,4895
0,04	0,016	0,8	0,288	1,56	0,4405	2,32	0,49
0,06	0,024	0,82	0,294	1,58	0,443	2,34	0,4905
0,08	0,032	0,84	0,2995	1,6	0,445	2,36	0,491
0,1	0,04	0,86	0,305	1,62	0,4475	2,38	0,4915
0,12	0,048	0,88	0,3105	1,64	0,4495	2,4	0,492
0,14	0,0555	0,9	0,316	1,66	0,4515	2,42	0,492
0,16	0,0635	0,92	0,321	1,68	0,4535	2,44	0,4925
0,18	0,0715	0,94	0,3265	1,7	0,4555	2,46	0,493
0,2	0,0795	0,96	0,3315	1,72	0,4575	2,48	0,4935
0,22	0,087	0,98	0,3365	1,74	0,459	2,5	0,494
0,24	0,095	1	0,3415	1,76	0,461	2,52	0,494
0,26	0,1025	1,02	0,346	1,78	0,4625	2,54	0,4945
0,28	0,1105	1,04	0,351	1,8	0,464	2,56	0,495
0,3	0,118	1,06	0,3555	1,82	0,4655	2,58	0,495
0,32	0,1255	1,08	0,36	1,84	0,467	2,6	0,4955
0,34	0,133	1,1	0,3645	1,86	0,4685	2,65	0,496
0,36	0,1405	1,12	0,3685	1,88	0,47	2,7	0,4965
0,38	0,148	1,14	0,373	1,9	0,4715	2,75	0,497
0,4	0,1555	1,16	0,377	1,92	0,4725	2,8	0,4975
0,42	0,163	1,18	0,381	1,94	0,474	2,85	0,4975
0,44	0,17	1,2	0,385	1,96	0,475	2,9	0,498
0,46	0,177	1,22	0,389	1,98	0,476	2,95	0,4985
0,48	0,1845	1,24	0,3925	2	0,4775	3	0,4986
0,5	0,1915	1,26	0,396	2,02	0,4785	3,1	0,4986
0,52	0,1985	1,28	0,4	2,04	0,4795	3,2	0,4993
0,54	0,2055	1,3	0,403	2,06	0,4805	3,3	0,4995
0,56	0,2125	1,32	0,4065	2,08	0,481	3,4	0,4996
0,58	0,219	1,34	0,41	2,1	0,482	3,5	0,4997
0,6	0,2255	1,36	0,413	2,12	0,483	3,6	0,4998
0,62	0,2325	1,38	0,416	2,14	0,484	3,7	0,4999
0,64	0,239	1,4	0,419	2,16	0,4845	3,8	0,4999
0,66	0,2455	1,42	0,422	2,18	0,4855	4	0,4999
0,68	0,252	1,44	0,425	2,2	0,486	5	0,49999
0,7	0,258	1,46	0,428	2,22	0,487		
0,72	0,264	1,48	0,4305	2,24	0,4875		
0,74	0,2705	1,5	0,433	2,26	0,488		

## Значения критических величин для критерия Пирсона

$k$	Вероятность $P$			
	0,99	0,98	0,95	0,9
	$\chi_P^2$			
4	0,3	0,43	0,71	1,06
6	0,87	1,13	1,63	2,2
9	2,09	2,53	3,32	4,17
14	4,7	5,4	6,6	7,8
19	7,6	8,6	10,1	11,7
24	10,9	12	13,8	15,7
29	14,3	15,6	17,7	19,8

## Лабораторная работа №16

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДНИХ УГЛОВ У ЕДИНИЧНЫХ ЗЕРЕН АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомить студентов с методикой оценки геометрических параметров шлифовальных зерен на примере измерения их передних углов.

#### 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Шлифование* – это процесс механической обработки деталей, осуществляемый абразивными инструментами. При изготовлении таких инструментов шлифовальные зерна равномерно смешивают со связкой и наполнителем, после чего формуют и спекают. При работе шлифовального инструмента каждое зерно срезает с поверхности заготовки микростружки, работая в прерывистом режиме. Производительность шлифования и качество обрабатываемой поверхности достигается за счет большого числа участвующих в работе зерен и их малых размеров, а также больших скоростей резания. В последнее время шлифовальные инструменты занимают все более важное место в машиностроительном производстве, в связи с тем, что они обеспечивают высокую стойкость, производительность и качество обработки поверхностей. Известно, что у абразивных инструментов (как и у других инструментов) геометрия их режущей части непосредственно влияет на все указанные показатели. Однако до настоящего времени не придавалось большого значения изучению и контролю геометрических параметров шлифовальных зерен, формирующих режущую часть абразивных инструментов. Контролируя, а также целенаправленно задавая оптимальные геометрические параметры единичных шлифовальных зерен, можно изготавливать инструменты с улучшенными эксплуатационными показателями (стойкостью, режущей способностью), обеспечивающими высокое качество обрабатываемых поверхностей. Исследуя передние углы зерен конкретных марок и зернистостей при фиксированном угле их ориентации к плоскости резания, можно оценить средний передний угол режущих микроклиньев в шлифовальном инструменте с ориентированными шлифовальными зернами.

Знание величин средних передних углов зерен при их заданном расположении относительно плоскости резания уже на этапе проектирования шлифовальных инструментов с ориентированными зернами позволяет предвидеть и задавать их эксплуатационные показатели.

С учетом того, что способы изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами активно развиваются и совершенствуются, оценка передних углов шлифовальных зерен и использование ее результатов в проектировании инструментов становится весьма актуальной.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для измерения передних углов шлифовальных зерен необходимо выполнить следующее:

1. Получить изображения исследуемых зерен (например, фотографируя цифровым фотоаппаратом через стереомикроскоп с 200 кратным увеличением).
2. Распечатать полученные изображения единичных зерен на листы формата А4, либо установить их в файл чертежных программ («Компас», «AutoCAD» и т. д.).
3. На изображении отдельного зерна найти и прочертить его наибольшую ось (диагональ) – линию между двумя наиболее удаленными точками на поверхности зерна.
4. Ориентировать изображение зерна вместе с главной осью под требуемым углом относительно плоскости резания (например, когда главная ось зерна расположена под углом  $90^\circ$  к плоскости резания) (рис. 1.).

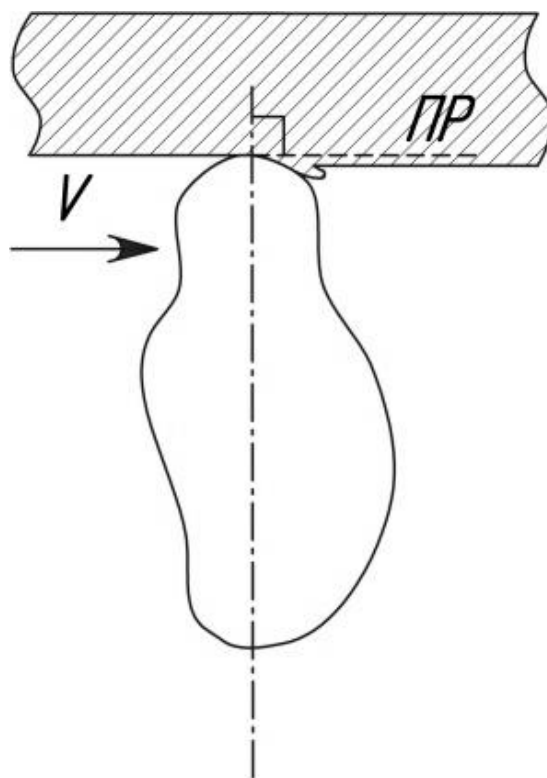


Рис. 1. Ориентация зерна под углом  $90^\circ$  к плоскости резания

5. Перпендикулярно к главной оси зерна через равные промежутки (например, 10 мм) провести секущие (параллельно плоскости резания), начиная от вершины, выступающей на поверхности инструмента до части зерна, заглубленной в связку (рис. 2.). Указанное расположение секущих плоскостей позволяет оценить изменения переднего угла в процессе износа зерна.

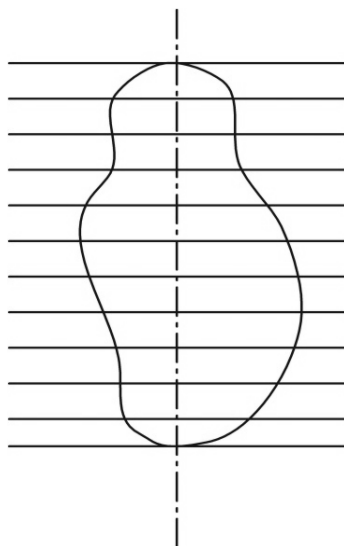


Рис. 2. Возможные варианты расположения плоскости резания в процессе износа зерна

6. В каждой точке пересечения контура зерна с постепенно перемещающейся плоскостью резания провести касательные и измерить передние углы, как показано на рис. 3.

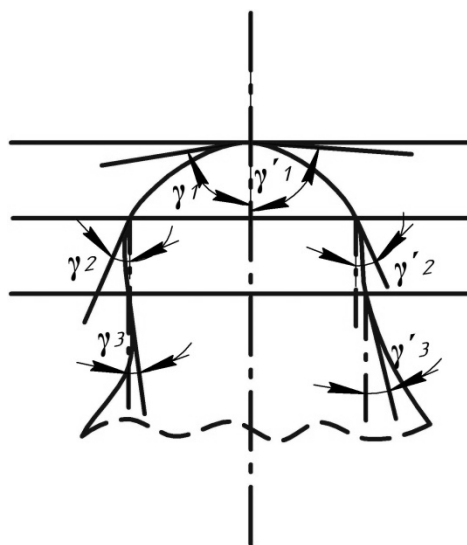


Рис. 3. Определение передних углов

7. Обработать полученные данные. А именно:
  - определить среднюю величину переднего угла зерна из предположения, что оно будет работать до  $1/3$  по главной оси, после чего будет удалено из инструмента;
  - до  $1/2$  по главной оси;
  - до  $2/3$  по главной оси.
8. С учетом того, что режущим клином зерна, участвующим в процессе резания, может быть любая из его вершин, изображение исследуемого зерна вновь распечатать, принимая за рабочую вершину ту, которая в предыдущем случае ей не являлась и последовательность измерения передних углов повторить.

#### **4. ОБОРУДОВАНИЕ**

Цифровой фотоаппарат, приспособленный для работы с микроскопом, набор единичных шлифовальных зерен, линейка, карандаш, транспортир, калькулятор.

#### **5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет должен содержать:

1. Увеличенные снимки единичных шлифовальных зерен с установленными значениями передних углов, в количестве не менее 5шт.
2. Графики изменения передних углов, с расчетами их средних значений для абразива данной марки и зернистости.

#### **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что служит режущими элементами у шлифовальных инструментов?
2. Как можно измерить текущий передний угол вдоль контура режущей кромки единичного шлифовального зерна?
3. Какую роль играет геометрия и ориентирование единичных зерен в шлифовальных инструментах?
4. Каким образом можно повысить эксплуатационные возможности шлифовальных инструментов?



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / под. ред. В. Н. Тыркова. – Москва : ВНИИТЭМР, 1986. – 358 с.
2. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных показателей шлифовальных кругов путем упорядочения геометрии используемых абразивных зерен : монография / В. А. Коротков. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 230 с.
3. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов / В. А. Коротков. – Москва : Машиностроение, 2009. – 178 с.
4. Коротков, В. А. Процессы формообразования и инструменты : учебное пособие для студентов специальности 151002 «Металлообрабатывающие станки и комплексы» / В. А. Коротков ; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т имени Т. Ф. Горбачева», Каф. металлорежущих станков и инструментов. – Кемерово, 2011. – 84 с. URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90670&type=utchposob:commono> (дата обращения: 02.03.2026).
5. Коротков, А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов / А. Н. Коротков; Кузбас. регион. отд-ние РАЕН, Кемер. регион. отд-ние Акад. проблем качества, Кемер. центр Сиб. отд-ния Акад. наук высш. школы. – Кемерово, 2006. – 232 с.
6. Коротков, А. Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов : монография / А. Н. Коротков. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 122 с.
7. Нетребко, В. П. Прочность шлифовальных кругов / В. П. Нетребко, А. Н. Коротков. – Москва : Агентство российской печати «Николь», 1992. – 104 с.
8. Коротков, А. Н. Повышение работоспособности лепестковых шлифовальных кругов : монография / А. Н. Коротков, Д. Б. Шатько ; ГУ Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 2005. – 184 с.
9. Коротков, А. Н. Повышение работоспособности шлифовальных лент / А. Н. Коротков, В. С. Люкшин; ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т», РАЕ, Кузбас. регион. отд-ние, Акад. проблем качества, Кемер. регион. отд-ние. – Кемерово : «Фирма Полиграф», 2009. – 195 с.
10. Короткова, Л. П. Контроль качества инструментальных материалов: учебное пособие / Л. П. Короткова, Д. Б. Шатько; ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово, 2010. – 164 с. – URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90451&type=utchposob:common> (дата обращения: 02.03.2026).
11. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – Москва : Машиностроение, 1974 – 280 с.
12. Зубарев, Ю. М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : учебное пособие / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемы-

шев. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 304 с. – ISBN 978-5-8114-0973-0. – URL: <https://e.lanbook.com/book/210254> (дата обращения: 02.03.2026).

13. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 304 с.

14. Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – Москва : – Машиностроение, 1974. – 320 с.

15. Абразивные материалы и инструменты : Каталог-справочник / коллектив авторов ; под ред. В. А. Рыбакова. – Москва, 1976. – 390 с.

16. Попов, М. Е. Автоматизация проектирования технологических процессов вибрационной обработки : учебное пособие / М. Е. Попов, М. А. Тамаркин. – Ростов-на-Дону : Ин-т сельхоз. машиностроения, 1990. – 65 с.

17. Бабищев, А. П. Вибрационная обработка деталей / А. П. Бабищев. – Москва : Машиностроение, 1974. – 136 с.

18. Вырезуб, В. Н. Шлифование абразивными лентами / В. Н. Вырезуб. – Москва : Машиностроение, 1972. – 104 с.

19. Анахин, В. Д. Вибрационные сепараторы / В. Д. Анахин, Д. А. Плисс, В. Н. Монахов. – Москва : Недра, 1991. – 157 с.

20. Анахин, В. Д. Вибрационная сепарация порошкообразных материалов / В. Д. Анахин. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1993. – 207 с.

21. Димов, Ю. В. Обработка деталей свободным абразивом / Ю. В. Димов. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2000. – 293 с.

22. Гаршин А. П. Абразивы и материалы конструкционного назначения на основе карбида кремния / А. П. Гаршин, В. М. Шумячер, О. И. Пушкарев. – Волжский : ВолГАСУ, 2008. – 188 с.

23. Евсеев, Д. Г. Модели шлифования. Теория и эксперимент / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Москва : Известия, 2018. – 311 с.

24. Кожевников, Д. В. Металлорежущие инструменты / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 392 с. – URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOVN/academic/Tab1/Tab/8\\_Textbook\\_Cutting\\_Tools\\_Kirsanov\\_rus.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOVN/academic/Tab1/Tab/8_Textbook_Cutting_Tools_Kirsanov_rus.pdf) (дата обращения: 02.03.2026).

25. Кремь, З. И. Технологии шлифования в машиностроении / З. И. Кремь, В. Г. Юрьев, А. В. Бабошкин ; под. общ. ред. З. И. Кремья. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 424 с.

26. Носенко, В. А. Технология шлифования металлов : монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко. – 3-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2020. – 615 с.

27. Пушкарев О. И. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер. – Волгоград : Волжский институт строительства и технологий, 2004. – 142 с.

28. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 247 с.

29. Абразивные материалы, инструменты, пасты, суспензии и их использование. Учебно-терминологический словарь / В. М. Шумячер, С. А. Крюков, Н. В. Байдакова, [и др.]. – Санкт-Петербург : Научные технологии, 2019. – 153 с.