

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
Д. Б. Шатько

АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Методические указания к практическим занятиям

Рекомендовано учебно-методической комиссией по направлению
подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспече-
ние машиностроительных производств
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2025

Рецензент

Рябов С. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов

Коротков Виталий Александрович

Шатько Дмитрий Борисович

Алмазно-абразивные материалы : методические указания к практическим занятиям : для обучающихся по направлению 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, Д. Б. Шатько. – Кемерово : КузГТУ, 2025. – 1 файл (2072 КБ). – Текст : электронный.

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

Назначение издания – помощь обучающимся в получении знаний в области материаловедения.

© Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2025

© Коротков В. А., Шатько Д. Б.,
составление, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Практическая работа №1 «Методика контроля качества абразивных материалов»	4
Практическая работа №2 «Оценка гранулометрического состава абразивного материала»	22
Практическая работа №3 «Оценка разновидностей форм абразивных зёрен»	33
Практическая работа №4 «Определение передних углов у единичных зёрен алмазно-абразивных шлифовальных инструментов»	45
Практическая работа №5 «Контроль прочности шлифовальных материалов и инструментов»	50
Практическая работа №6 «Методы математической обработки экспериментальных данных»	63
Список литературы	68

Практическая работа №1

Методика контроля качества абразивных материалов

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;
- ознакомление с одним из показателей качества шлифовальных кругов – уравновешенностью;
- 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;
- изучение методов оценки прочности абразивных инструментов;
- изучение путей повышения прочности шлифовальных кругов;
- ознакомление с понятием режущей способности шлифовальных инструментов;
- освоение методов оценки режущей способности различных абразивных инструментов, а также свободного абразива.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Абразивные инструменты в целях контроля их эксплуатационных показателей подвергают соответствующим испытаниям на предприятиях-изготовителях.

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.

Уравновешенность является одним из основных комплексных показателей качества абразивных кругов. Большое значение имеет степень уравновешенности кругов в связи с все более широким внедрением в практику скоростного и сверхскоростного шлифования.

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

Твердость абразивных инструментов является важной характеристикой абразивного инструмента. Под твердостью абразивного 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.

3. КОНТРОЛЬ ТВЕРДОСТИ, РАЗМЕРОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ

Контроль проводится в соответствии с ГОСТ Р 52781-2007). Контроль размеров и повреждений предусматривает точность исполнения основных и вспомогательных размеров, определяет условия, допускающие отклонения от норм точности, допускае-

мые погрешности геометрической формы инструментов, требования к их внешнему виду.

Твердость абразивных инструментов является важной характеристикой абразивного инструмента. Под твердостью абразивного инструмента понимают свойство оказывать сопротивление проникновению в него другого тела. Установлено семь классов твердости – мягкий, средне-мягкий, средний, средне-твердый, твердый, весьма твердый, чрезвычайно-твердый.

Степень твердости абразивного 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 ГОСТ Р 52587-2006). 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. Твердость кругов на вулканитовой связке определяют в соответствии с ГОСТ Р 52587-2006.

В ряде случаев для повышения плотности и твердости кругов последние изготавливают из смеси зерен двух или трех номеров. Этим достигается более плотная укладка зерен при прессовании.

После изготовления круги проверяют на точность размеров и степень уравнированности. Далее круги, в соответствии со стандартом (ГОСТ 2424-83, ГОСТ 12.3.028-82), 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.

4. КОНТРОЛЬ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ КРУГОВ

Согласно требованиям 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. Для кругов точности АА (абразивные круги общего назначения изготавливают трех классов точности: АА, А и Б – в порядке снижения точности) класс неуравновешенности должен быть первым, для кругов точности А – первым или вторым и для кругов точности Б – вторым или третьим.

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

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

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

Из сравнения формул (2.11) и (2.12) видно, что величина B_c 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 (2.14) и (2.15) позволяют рассчитать величину B_n . Правкой инструмента невозможно устранить неуравновешенную массу B_n , хотя по мере съема абразива эта величина будет уменьшаться.

Таблица 1

Зависимость неуравновешенности шлифовального круга от погрешностей
его установки и геометрической формы

Неуравновешенные массы (г)		
вызванные зазором между посадочным диаметром круга и планшайбой	вызванные эксцентриситетом посадочного диаметра круга относительно наружного	вызванные непараллельностью торца круга
		
До правки круга		
$B_c = 785 \cdot 10^{-6} \frac{(D^2 - d^2) H \gamma c}{D} \quad (2.11)$	$B_e = 157 \cdot 10^{-5} D H \gamma e \quad (2.13)$	$B_H = 196 \cdot 10^{-6} \frac{D^4 - d^4}{D^2} \frac{H \gamma \Delta H}{2H + \Delta H} \quad (2.14)$
После правки круга		
$B_c = 785 \cdot 10^{-6} \frac{d^2 H \gamma c}{D} \quad (2.12)$	$B_e = 0$	$B_H = 196 \cdot 10^{-6} \frac{D^4 - d^4}{D^2} \frac{H \gamma \Delta H_1}{2H + \Delta H_1} \quad (2.15)$

Примечание: γ – плотность абразива, г/см³ (средняя плотность кругов на связках К (керамическая) и Б (бакели-то-вая) составляет 2,0÷2,6 г/см³, на связке В (вулканитовая) – 2,6÷3 г/см³); c – диаметральный зазор между посадочными поверхностями круга и планшайбы, мм; e – эксцентриситет посадочной поверхности круга относительно наружной поверхности, мм; ΔH – непараллельность торцов круга, мм.

Если при правке круга снимают слой абразива с размером ΔD на сторону, то после правки значение B_n определяют выражением (2.15), где

$$\Delta H_1 = (1 - \frac{\Delta D}{D}); \quad (2.9)$$

$$D_1 = D - 2\Delta D. \quad (2.10)$$

На величину неуравновешенности круга B_γ , 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 неуравновешенность круга определяют векторной суммой:

$$\bar{B} = \bar{B}_e + \bar{B}_c + \bar{B}_n + \bar{B}_\gamma + \bar{B}_o, \quad (2.16)$$

где \bar{B}_o – неуравновешенная масса, определяемая прочими причинами.

Рассчитать величину \bar{B} по формуле (2.16) можно, если известно взаимное расположение векторов. В противном случае следует принимать во внимание худший вариант и определять наибольшее значение суммы.

5. КОНТРОЛЬ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Контроль проводится в соответствии ГОСТ Р 52588-2011.

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. Все круги, подлежащие последующему испытанию вращением, проверяют на отсутствие трещин внешним осмотром и легкими ударами (простукиванием) деревянным молотком по торцевой поверхности. Для этого круг предварительно надевают на какой-либо стержень. Перед простукиванием инструменты должны быть просушены и очищены. Инструмент без повреждений должен издавать чистый звук (на керамической связке более звонкий, чем на органических). Инструменты с дребезжащим звуком бракуются.

Получающийся при испытании вращением гарантированный коэффициент запаса прочности n зависит от того, насколько испытательная скорость превышает рабочую. Для напряжения $\sigma_{\text{исп}}$, возникшего при испытании на скорости $v_{\text{исп}}$:

$$\sigma_{\text{исп}} = C \frac{\gamma}{g} v_{\text{исп}}^2, \quad (2.3)$$

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

$$\sigma_{\text{раб}} = C \frac{\gamma}{g} v_{\text{раб}}^2, \quad (2.4)$$

следовательно, гарантированный коэффициент запаса прочности

$$n = \sigma_{\text{исп}} / \sigma_{\text{раб}} = v_{\text{исп}}^2 / v_{\text{раб}}^2. \quad (2.5)$$

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

Тогда

$$n = v_{\text{исп}}^2 / v_{\text{раб}}^2 = (1,5 v_{\text{раб}})^2 / v_{\text{раб}}^2 = 1,5^2 = 2,25. \quad (2.6)$$

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 $1,25 \div 2,25$ 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 $2,3 \div 2,9$.

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. 1, а, б.

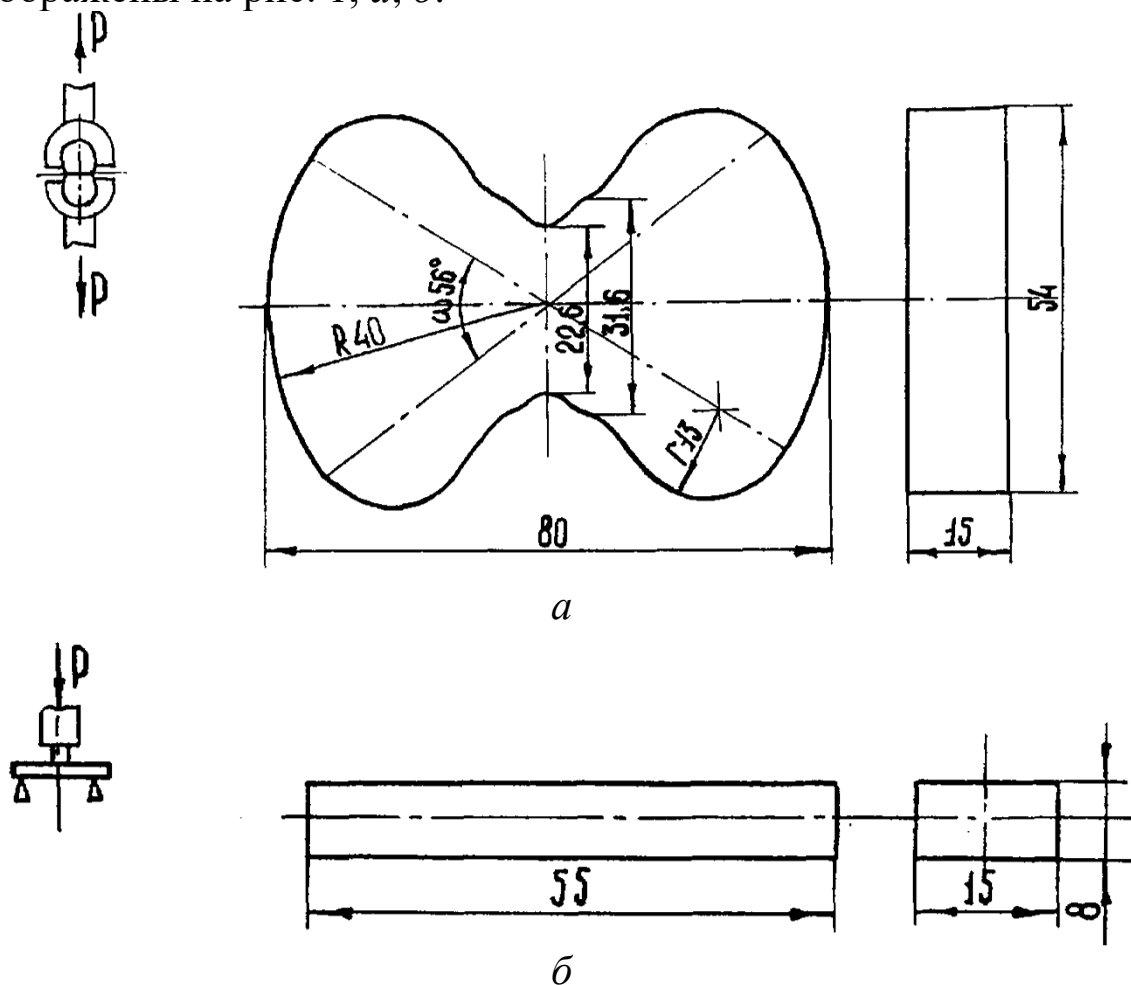


Рис. 1. Вид и размеры образцов для определения прочности на растяжение (а) и изгиб (б)

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. 2.

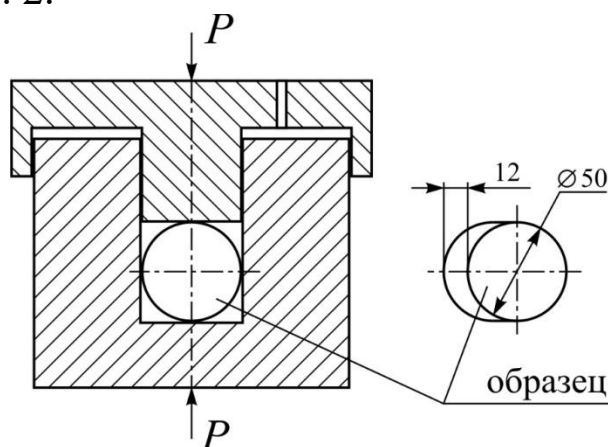


Рис. 2. Схема устройства для испытания образцов на сжатие

6. КОНТРОЛЬ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Режущая способность шлифовальных кругов рассчитывается по определенной формуле (ГОСТ Р 52781-2007).

6.1. 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.

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 абра-

живных 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.

Режущая способность абразива определяется после совершения планшайбой определенного числа оборотов 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.

*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.

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. 3.

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.

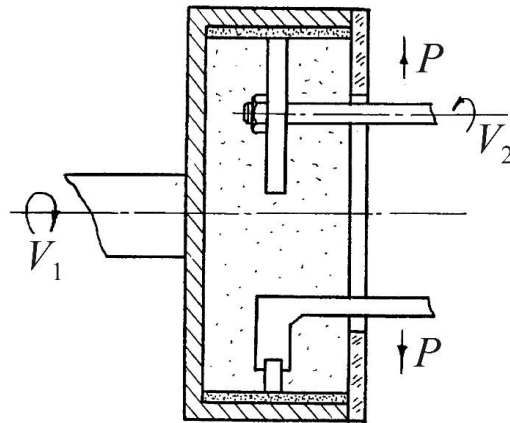


Рис. 3. Обработка шлифовальным слоем неподвижной и вращающейся деталей

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.

6.2. 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 , мм³/мин, рассчитывается по формуле (ГОСТ Р 52781–2007):

$$Q_M = \frac{W_M}{t_M B_K}, \quad (2.21)$$

где W_M – объем снятого металла, мм³;

t_M – машинное время шлифования, мин;

B_K – высота круга, мм.

По массовому методу режущая способность определяется следующим образом:

$$Q = \frac{m_1}{m_2}, \quad (2.22)$$

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

$$K = \frac{W_M}{W_a}, \quad (2.23)$$

где W_M – объем снятого металла, мм²;

W_a – объем изношенной части шлифовального круга, мм².

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 (см³/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 (см³/см³, мм³/мм³,

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.

6.3. 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 определения режущей способности шлифовальных шкурок на тканевой основе заключается в следующем. Производят шлифование эталонного стержня из калиброванной стали марки 45 образцом шлифовальной шкурки в течение определенного времени (рис. 4). Затем производят измерение длины сошлифованного участка стержня. Режущую способность Q , мм³/мин, определяют как отношение объема сошлифованной части эталонного стержня к продолжительности цикла шлифования:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.24)$$

где V – объем сошлифованной части эталонного стержня, мм³;
 t – продолжительность цикла шлифования, с.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h = \pi r^2 h, \quad (2.25)$$

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

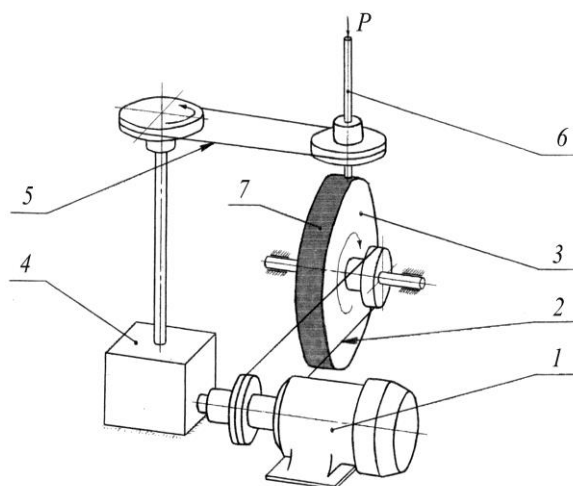


Рис. 4. Схема прибора для контроля режущей способности шлифовальных шкурок на тканевой основе

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*.

7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Оформить отчет. Отчет должен содержать: наименование и цель работы; ответы на контрольные вопросы по теме практической работы.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит суть метода контроля твердости, размеров и повреждений?
2. В чем состоит суть метода контроля неуравновешенности кругов?
3. Назовите основные причины, вызывающие появление неуравновешенности у шлифовальных кругов.
4. Как проводится оценка неуравновешенности кругов?

5. В чем состоит суть метода контроля на механическую прочность?

6. В чем суть метода контроля режущей способности?

9. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

1. 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).

2. Изучить методы балансировки алмазных и эльборовых кругов. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под редакцией А. Н. Резникова. – Москва: Машиностроение, 1977. – 391 с. ; §2.3, С. 88. (1 час).

3. Подробно ознакомиться с нормами неуравновешенности шлифовальных кругов. Теория и практика балансировочной техники : сб. статей. – Москва: Машиностроение, 1973. – 456 с. ; с. 382-387 (статья Захарова В. П.). (1 час).

4. 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).

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

6. 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).

7. Ознакомиться с методикой определения режущей способности бумажной шлифовальной шкурки. ГОСТ 6456-82 (прил. 2). (1 час).

Практическая работа №2

Оценка гранулометрического состава абразивного материала

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель данной работы – освоение студентами методики определения гранулометрического состава для различных фракций абразивных материалов.

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 ГОСТом параметрами. В процессе получения абразивного материала его дробят, получая совокупность зерен различных размеров. Затем материал сортируется на фракции по размеру (крупности) зерен. Более крупное шлифзерно подвергается рассеву на пакете сит с последовательно уменьшающимися просветами ячеек. 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 шлифовальном инструменте наиболее эффективно будут работать зерна определенного размера. Наличие в реальных фракциях зерен 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 абразив. Поэтому заводы выпускают фракции абразива с разным разбросом размеров зерен относительно среднего, разной стоимости, для производства шлифовального инструмента для соответствующих работ.

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 две группы – сверхтвердые материалы (СТМ), к которым относятся алмаз и эльбор и обычные абразивы. Так как эти группы материалов сильно отличаются по свойствам, технологии 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.

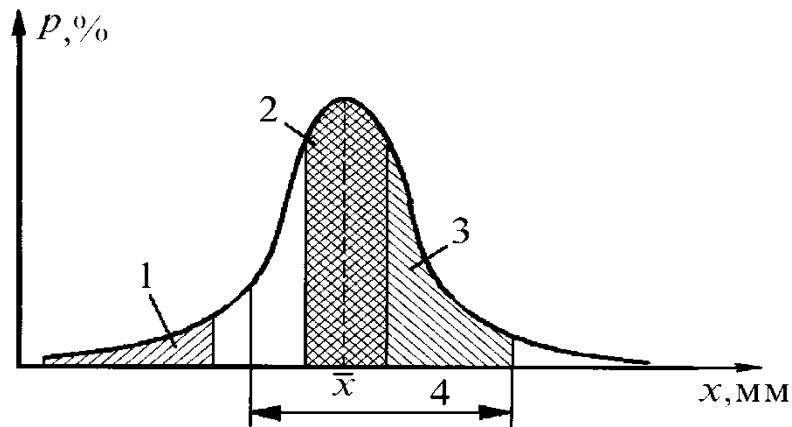


Рис. 1. Размерные фракции для шлифзерна

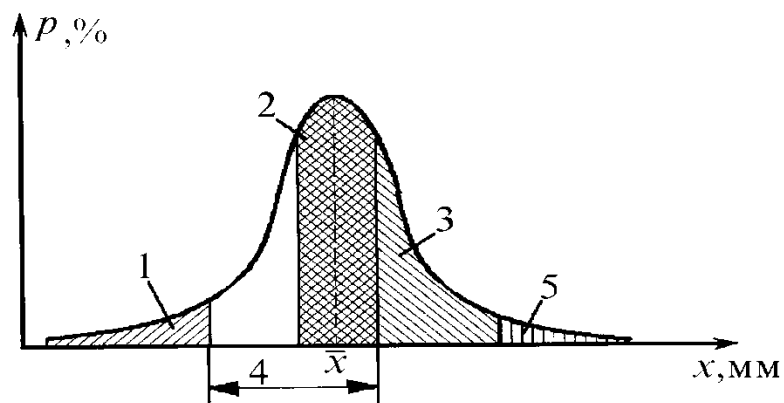


Рис. 2. Размерные фракции для шлифпорошка

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. Зернистость измеряется в десятках микрометров, например, средний размер зерна абразива зернистости № 32 равен 320 мкм. Если перед номером зернистости стоит буква М (М16, М8 и т. п.), зернистость измеряется в микрометрах (для мелкозернистых фракций).

В зависимости от номера зернистости вся номенклатура фракций абразивов подразделяется на:

зернистость 200 – 16 – шлифзерно;
 12,5 – 4 – шлифпорошки;
 М63 – М14 – микрошлифпорошки;
 М10 – М3 – тонкие микрошлифпорошки.

Стандартом для обычных абразивов вводятся 4 индекса разброса – В, П, Н, Д – обозначающие соответственно высокое, повышенное, нормальное и допустимое содержание основной размерной фракции и соответствующие ограничения на содержание остальных. Чем выше содержание основной фракции, тем соответственно выше эксплуатационные свойства фракции абразива, но вместе с тем она дороже.

Для шлифматериалов из СТМ вместо индекса разброса указывается два размера зернистости, соответствующие обеим границам основной размерной фракции (например, 160/125), причем они могут изменяться. Для этих материалов введены два диапазона границ основной размерной фракции – широкий и узкий. Фракции узкого диапазона более качественные и дорогие, чем широкого.

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 контрольную навеску абразивного материала просеивают через набор сит, причем размеры ячеек сит соответствуют границам размерных фракций для данной зернистости. 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 суспен-

зии зерен в жидкости и помещается под микроскоп. Оператор измеряет поперечные размеры единичных зерен (рис. 3).

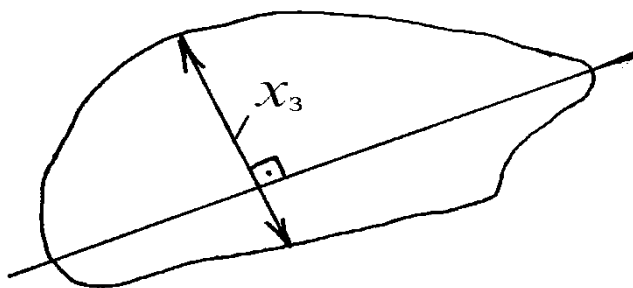


Рис. 3. Схема измерения проекции зерна

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

3.1. Получить у преподавателя навеску абразива и лупу Бринеля или распечатки проекций зерен и масштабную линейку.

3.2. Определить число рассматриваемых зерен (объем выборки) n . Рекомендуются объем выборки 200–400 штук.

3.3. Подготовить таблицу для записи результатов.

3.4. Для каждого из n зерен произвести измерение (рис. 3) наибольшего поперечного размера x_{zi} , значение которого занести в таблицу.

Таблица 1

Фракция абразива:

Объем выборки $n =$

№	x_{zi} , мм	x_i , мм	x_i^2	V_i , мм ³

3.5. 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.

3.6. Найти выборочное среднее:

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

а также среднеквадратическое отклонение:

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

3.7. 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 Δ , 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 табл. 2.

Таблица 2

Гранулометрический состав фракции

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

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

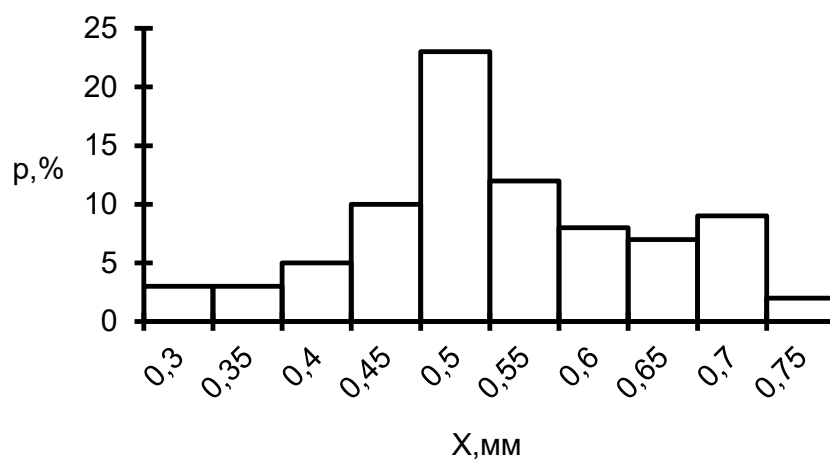


Рис. 4. Гистограмма гранулометрического состава

3.9. Подготовить таблицу для проверки соответствия выборки нормальному закону распределения по критерию Пирсона χ^2 .

Таблица 3

Проверка выборки на нормальность распределения

№	Границы		n_i	Границы		p_i	χ^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					

3.10. 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.

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

3.12. Определить значение χ^2 :

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

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 χ^2_P .

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

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

Таблица 4

Относительное содержание размерных фракций

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

3.14. 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:

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

3.15. 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.

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

3.17. 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

4.1. Навески абразивных материалов (шлифзерна) различных видов и зернистостей по 15–20 г (12–15 шт.).

4.2. Лупа Бринелля (3–4 шт.).

4.3. Комплекты распечаток форм проекций абразивных материалов различных видов и зернистостей (10–12 шт.).

4.4. Линейки (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. Для каких целей выпускается широкая номенклатура фракций абразивов с зернами различной крупности?
2. Какие существуют технологии разделения зерен по крупности?
3. На какие группы делятся абразивы по своему составу и почему?
4. Вследствие чего появляется различие размеров зерен 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 зерен фракции по ГОСТ [1, с. 23–31; 2; 3] (1 ч).
2. Изучить пример исследования, показывающего влияние крупности зерен абразивного материала на эксплуатационные характеристики шлифовального инструмента [5, с. 211–235] (1 ч).

Практическая работа №3

Оценка разновидностей форм абразивных зёрен

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 шлифзерно подвергается рассеву на ситах, более мелкие шлифпорошки 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 ГОСТе 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 проекции абразивного зерна.

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_{ϕ} .

Коэффициент формы рассчитывается по геометрическим параметрам проекции, которые измеряются тем или иным способом (рис. 1).

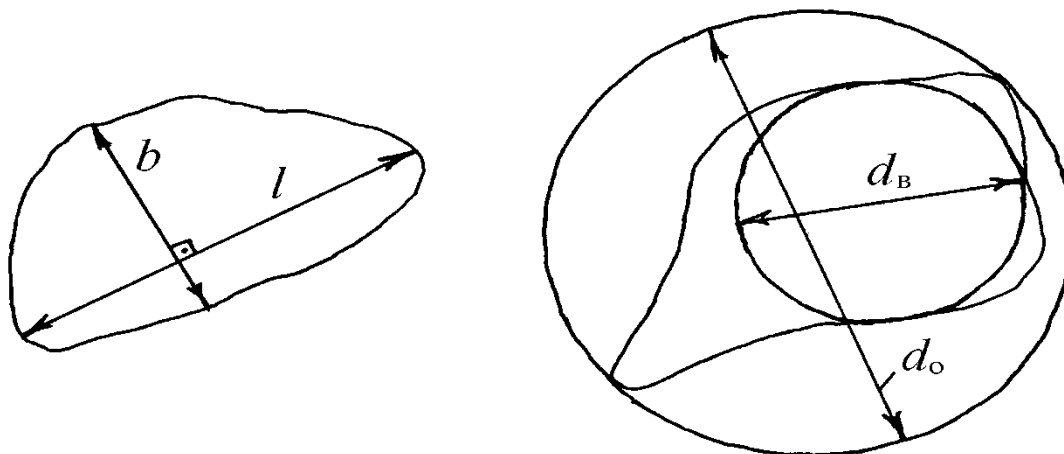


Рис. 1. Геометрические параметры проекции зерна

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_{ϕ} :

$$K_{\phi} = \frac{d_o}{d_b}, \quad (2)$$

где d_o – диаметр описанной вокруг проекции окружности; d_b – диаметр вписанной в проекцию окружности.

Коэффициенты формы единичных зерен практически лежат в диапазоне [1; 7]. 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_{ϕ} 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 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

3.1. Получить у преподавателя навеску абразива и лупу Бринелля или распечатки проекций зерен и масштабную линейку.

3.2. Определить число рассматриваемых зерен (объем выборки) n . Рекомендуется объем выборки 200–400 штук.

3.3. Подготовить таблицу для записи результатов.

Таблица 1

Фракция абразива:

Объем выборки $n =$

№	Длина l , мм	Ширина b , мм	K_ϕ	K_ϕ^2	Качественная оценка

3.4. Для каждого из n зерен произвести измерение (рис. 1) наибольшей длины l и ширины b проекции зерна, значения которых занести в таблицу.

3.5. 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

3.6. Рассчитать по формуле (1) значения коэффициентов формы зерен K_{ϕ} , а также величины K_{ϕ}^2 . Значения занести в таблицу 1.

3.7. Подготовить таблицу качественной оценки совокупности форм исследуемой фракции (табл. 2).

Таблица 2

Качественная оценка спектра форм зерен

Форма	Изометрическая	Промежуточная	Пластинчатая
n_i , штук			
p_i , %			

3.8. 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.

3.9. Найти выборочное среднее:

$$\bar{K}_{\phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\phi i} , \quad (4)$$

а также среднеквадратическое отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n K_{\phi i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n K_{\phi i} \right)^2 \right)} . \quad (5)$$

3.10. Подготовить таблицу количественной оценки совокупности форм исследуемой фракции (табл. 3).

Таблица 3

Количественная оценка спектра форм зерен

№	Границы интервала	Подсчет	Количество зерен n_i , штук	Содержание, %
1	[1–1,1)			
2	[1,1–1,2)			

3.11. Наименьшим возможным значением коэффициента формы будет единица. По табл. 1 найти наибольшее значение коэффициента формы в данной выборке. Принять такое значение величины интервала Δ , 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.

3.12. 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.

3.13. На основании полученных данных построить гистограмму совокупности форм зерен выборки (рис. 5).

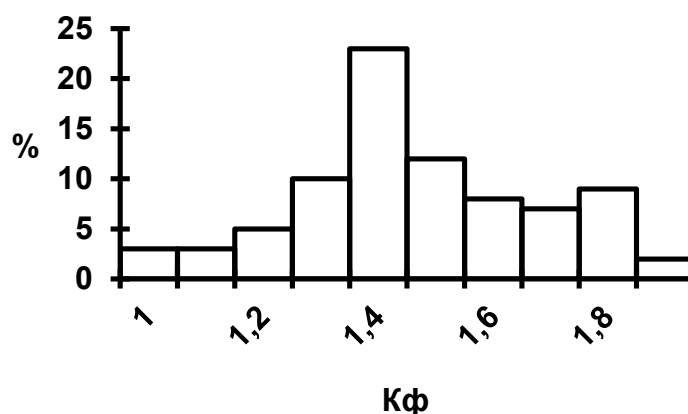


Рис. 5. Гистограмма совокупности форм зерен

3.14. Подготовить таблицу для проверки соответствия выборки нормальному закону распределения по критерию Пирсона χ^2 .

Таблица 4

Проверка выборки на нормальность распределения

№	Границы		n_i	Границы		p_i	χ^2_i
	$K_{\text{фниж}}$	$K_{\text{фвер}}$		$z_{\text{ниж}}$	$z_{\text{вер}}$		
1	1	1,1					
2	1,1	1,2					

3.15. 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.

3.16. 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 4.

3.17. Определить значение χ^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 χ_P^2 .

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

3.18. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы:

- однороден ли спектр форм зерен исследованной фракции абразива;
- подчиняется ли спектр форм нормальному закону распределения.

4. ОБОРУДОВАНИЕ

4.1. Навески абразивных материалов различных видов и зернистостей по 15–20 г (12–15 шт.).

4.2. Лупа Бриннеля (3–4 шт.).

4.3. Комплекты распечаток форм проекций абразивных материалов различных видов и зернистостей (10–12 шт.).

4.4. 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 шлифматериалов 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 фракции по ГОСТ для шлифматериалов из алмаза и эльбора [2] (0,5 ч).

2. Изучить теоретические основы сортировки зерен по размеру при производстве абразивов и источники неоднородности форм зерен фракции [1, с. 23–31] (0,5 ч).

3. Изучить пример исследования, показывающего влияние спектра форм зерен абразивного материала на эксплуатационные характеристики шлифовального инструмента [3, с. 50–80] (1 ч).

Приложение

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	1,00	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	0,4775	3,0	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	0,4999
0,68	0,252	1,44	0,425	2,2	0,486	5,0	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
	χ^2_P			
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

Практическая работа №4

Определение передних углов у единичных зёрен
алмазно-абразивных шлифовальных инструментов

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомить студентов с методикой оценки геометрических параметров шлифовальных зерен на примере измерения их передних углов.

2. ВВЕДЕНИЕ

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 зерни-

стостей 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 её 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° к плоскости резания) (рис. 1).

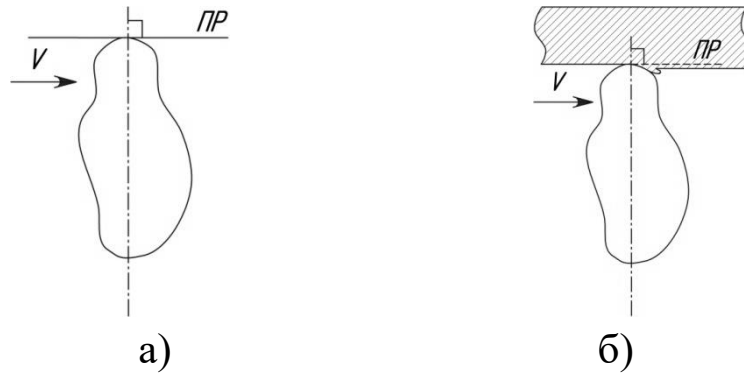


Рис. 1. Ориентация зерна под углом 90° к плоскости резания

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.

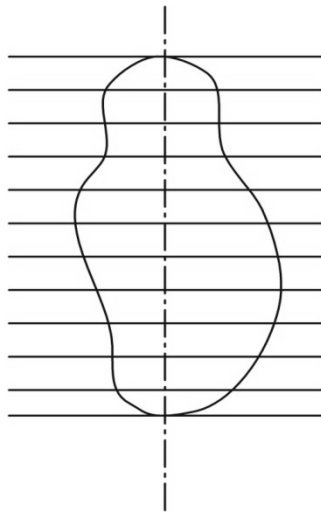


Рис. 2. Возможные варианты расположения плоскости резания в процессе износа зерна

6. В каждой точке пересечения контура зерна с постепенно перемещающейся плоскостью резания провести касательные и измерить передние углы, как показано на рис. 3.

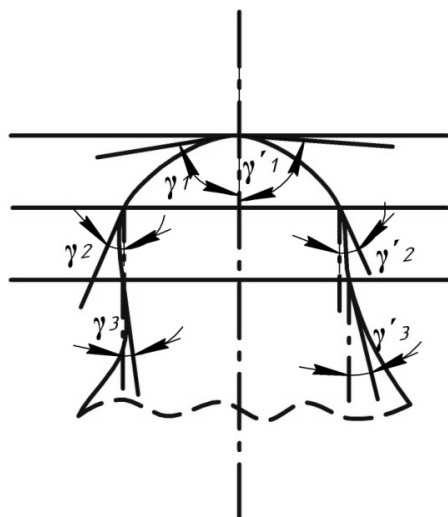


Рис. 3. Определение передних углов

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, транспортер, калькулятор.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

1. Увеличенные снимки единичных шлифовальных зерен с установленными значениями передних углов, в количестве не менее 5 шт.
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?

7. СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Используя в п. 8 литературу:

1. Изучить параметры, характеризующие эксплуатационные свойства шлифовальных зерен: форму зерна; рельеф и микрорельеф поверхности зерен; геометрию зерна; дефекты структуры [2, с. 71–94], [1, с. 3–34] (1 ч).
2. Подготовить отчет по лабораторной работе (0,5 ч).
3. Подготовиться к защите лабораторной работы (0,5 ч).

Практическая работа №5

Контроль прочности шлифовальных материалов и инструментов

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 ГОСТ Р 52588-2011). 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 м/с и более. 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.

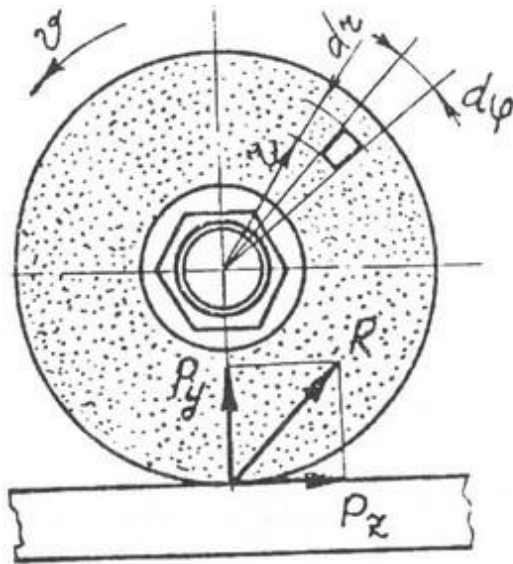
Другие связки менее прочны, чем аналогичные им из выше-рассмотренных трех, имеющих наибольшее промышленное применение. Так, например, магнезиальная и силикатовая связки, сходные с керамической по хрупкости, менее прочны.

2.1.2. Напряжения от усилий резания

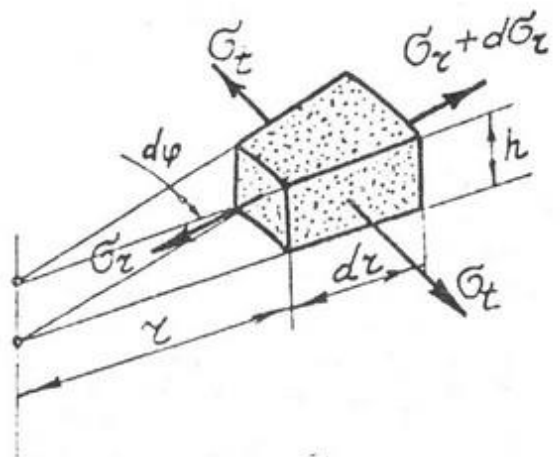
В процессе работы абразивный инструмент должен быть прижат к обрабатываемому изделию и оба должны перемещаться один относительно другого. Таким образом, во время работы инструмент оказывает на изделие, во-первых, давление, направленное по нормали к их соприкасающейся поверхности, и, во-вторых, давление 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 .



a



б

Рис. 1. Силы резания (*a*) 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

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

где 0,1 – коэффициент для перевода размерностей, кг/см²; γ – объемный вес круга, г/см³; g – ускорение силы тяжести (9,81 м/с²); 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 различающиеся 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 σ_r и σ_t – соответственно радиальное и тангенциальное напряжения в некоторой точке круга; γ – удельный вес шлифовального круга; ω – угловая скорость вращения круга; g – ускорение свободного падения; μ – коэффициент Пуассона шлифовального круга (μ 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 $\sigma_{\text{исп}}$, возникшего при испытании на скорости $v_{\text{исп}}$:

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

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

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

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

следовательно, гарантированный коэффициент запаса прочности.

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

Тогда

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

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.

Получение данных о прочности кругов путем испытания их на разрыв является довольно трудоемкой и дорогостоящей операцией. 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, рав-

ный 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.

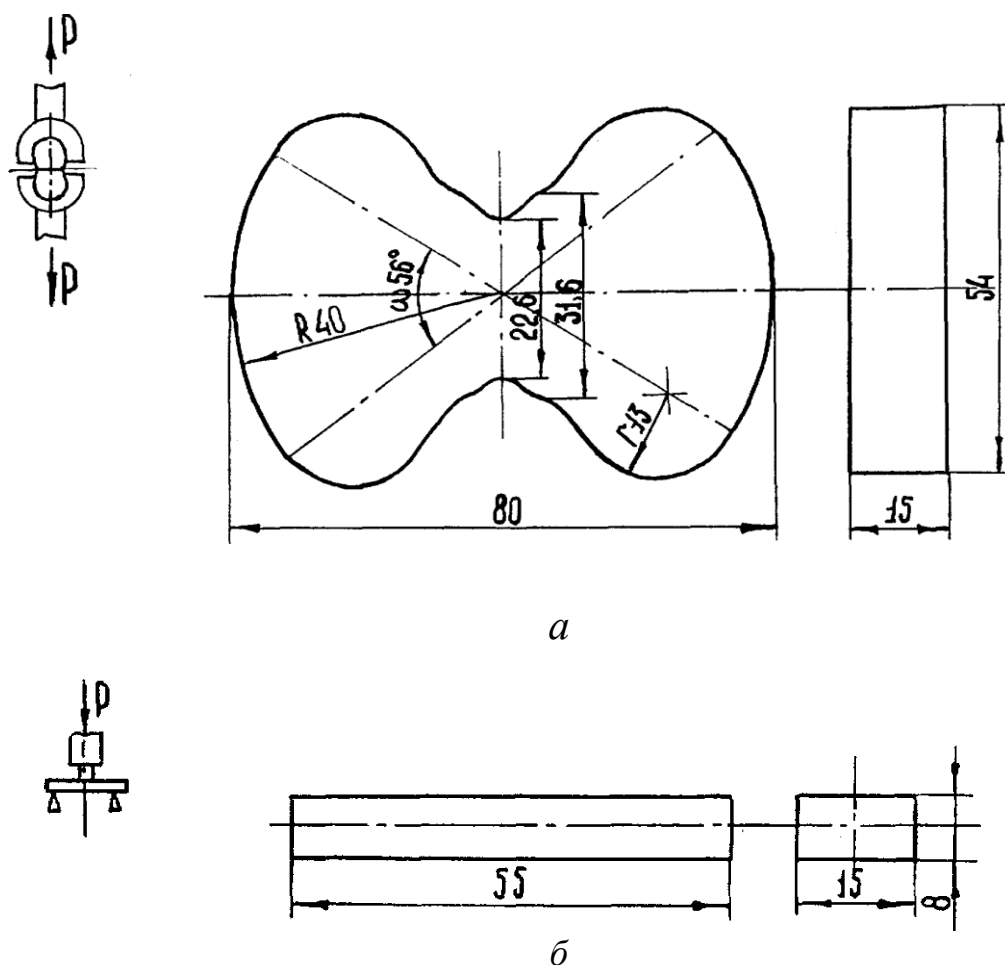


Рис. 2. Вид и размеры образцов для определения прочности на растяжение (а) и изгиб (б)

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.

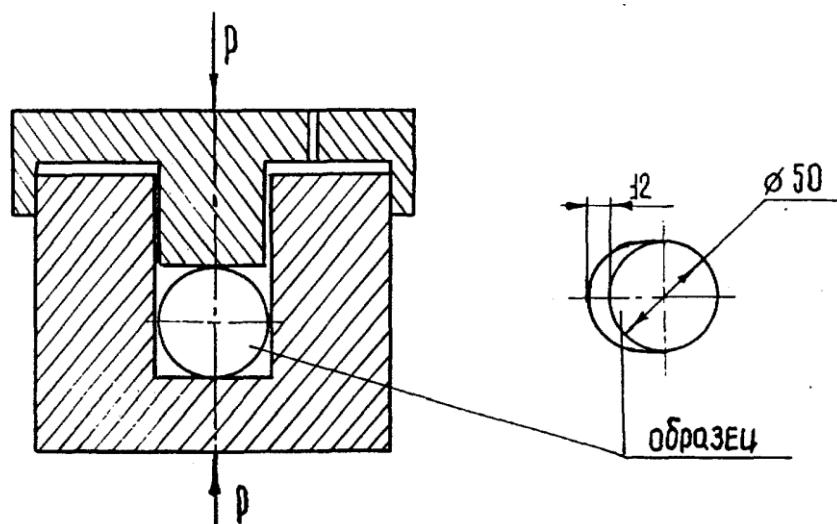


Рис. 3. Схема устройства для испытания образцов на сжатие

1.1. 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.

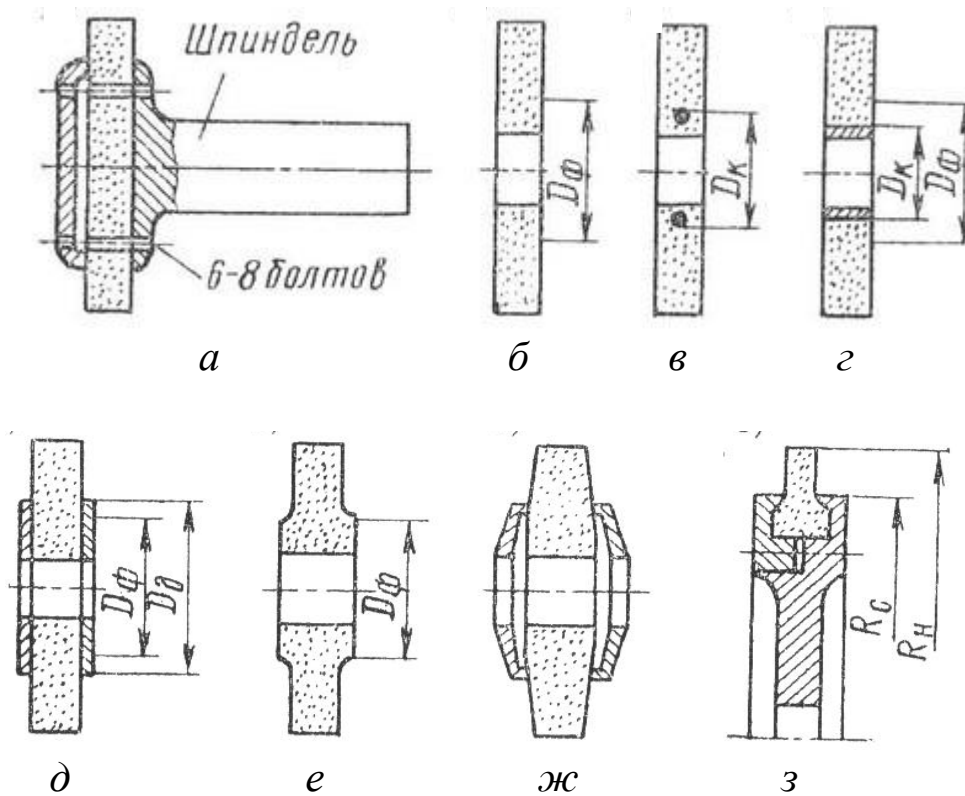


Рис. 4. Высокоскоростные шлифовальные круги

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

2. 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 / А. Н. Коротков. – 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 / А. Н. Коротков. – Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1992. – 122 с.; гл. 1. (1 час).

Практическая работа №6

Методы математической обработки экспериментальных данных

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научить студентов основам математической обработки опытных данных, полученных в результате проведения экспериментов.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для большого числа исследований в области механической обработки деталей характерно проведение однофакторных экспериментов. Как правило, исследование влияния одного изменяемого параметра на некий интегральный показатель. Например, влияние подачи S на шероховатость обрабатываемой поверхности. Результатом таких исследований как правило, графики в двухмерных координатах, а также однофакторные математические модели. Возможно также проведение многофакторных экспериментов (чаще всего двухфакторных), в частности, изучение совместного влияния двух изменяемых параметров на один выходной показатель. Например, изучение совместного влияния глубины резания t и подачи S на шероховатость обрабатываемой поверхности. В этом случае выходными данными являются двухфакторные трехмерные графики и двухфакторные модели.

Для математической обработки экспериментальных данных в технической сфере наиболее часто используется корреляционно-регрессионный анализ. Сущность анализа состоит в установлении корреляционной взаимосвязи между изменяемыми параметрами и исследуемым показателем. Например, выдвигается гипотеза о том, что исследуемый показатель и изменяемый параметр связаны между собой линейной зависимостью (линейной математической моделью) вида

$$y = kx + b, \quad (1)$$

где y – исследуемый показатель; x – изменяемый параметр.

Далее, методом последовательных итераций (подбором), строится такая модель, графическое изображение которой находится наиболее близко ко всем точкам выборки (т. е. данным, полученным в результате проведения экспериментов).

Затем производится оценка разброса экспериментальных точек относительно теоретической кривой с помощью коэффициента корреляции R^2 . Если этот коэффициент равен 1,0, то все экспериментальные точки укладываются на теоретическую кривую (100 % совпадений). Если $R^2 < 1,0$, то часть точек не совпадают с теоретической кривой. Чем больше разброс точек, тем меньше коэффициент корреляции. Принято считать, что если $R^2 \geq 0,5$, то полученная математическая модель достаточно адекватна и ее можно использовать для оценки исследуемой зависимости. На практике, как правило, используются модели с коэффициентом корреляции не меньше 0,6–0,7.

При обработке экспериментальных данных строят математические модели нескольких стандартных типов: линейные, логарифмические, степенные, экспоненциальные, многочлены n -ой степени. Из этих моделей для дальнейшего применения выбирают ту, которая обладает наибольшим коэффициентом корреляции.

Помимо оценки разброса точек с помощью коэффициента корреляции также производят оценку адекватности полученной математической модели. Указанная оценка проводится в тех случаях, когда требуется гарантированная точность исследуемых экспериментальных зависимостей. Оценка адекватности может производиться несколькими способами, основанными на сопоставлении с так называемыми «критериями». Чаще всего осуществляется оценка адекватности по критерию Фишера. Суть такой оценки состоит в проведении дополнительной серии опытов, аналогичных по характеру первоначальной серии, т. е. получению дополнительной независимой выборки экспериментальных данных, а в дальнейшем – получению математической модели по результатам этой серии опытов и установлению совпадения с первоначальной моделью. Например, если две кривые на графике, полученные по двум выборкам, совпадают или находятся близко друг от друга, то первоначальная модель адекватна. Если эти кривые не совпадают, то модель неадекватна. Количественным показателем адекватности модели по критерию Фишера служит коэффициент Фишера, который должен быть меньше табличного значения, взятого из специального справочника. Чем меньше коэффициент Фишера табличного значения, тем выше адекватность построенной модели.

Существуют и другие критерии оценки адекватности (Снедекора-Кочрена, Стьюдента, Краскела-Валлиса и др.). При оценке адекватности моделей по данным критериям выборки экспериментальных данных могут быть зависимыми (выделенными из исходного массива экспериментальных данных), выборок может быть не две, а больше (например, пять). Применение того или иного критерия для оценки адекватности моделей определяется особенностями проведения экспериментов и сложившейся практикой в конкретной области науки.

В последнее время построение математических моделей, подсчет коэффициентов корреляции, оценка адекватности моделей, а также построение соответствующих графиков, как правило, производится на ЭВМ с помощью специальных прикладных программ. Например, программ Excel, Statistica, MatCad, MatLab и др. Все необходимые математические алгоритмы и справочные данные имеются в данных программных продуктах. В результате расчеты, которые ранее проводились вручную, были весьма трудоемкими и продолжительными по времени, сейчас производятся на ЭВМ в течение нескольких секунд. Для этого достаточно представить таблицу с исходными данными в электронном виде и воспользоваться соответствующими функциями программы.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Оценка адекватности математических моделей с помощью коэффициента корреляции

По имеющимся экспериментальным данным строятся и сравниваются по коэффициентам корреляции несколько математических моделей стандартного вида: линейная, логарифмическая, степенная и экспоненциальная.

Такие модели в данном случае имеют, соответственно, следующий вид:

$$Q_m = 1,2162 \times V - 47,73 \quad R^2 = 0,9512 \quad (3)$$

$$Q_m = 89,58 \times \ln(V) - 342,48 \quad R^2 = 0,9402 \quad (4)$$

$$Q_m = 0,0043 \times V^{2,133} \quad R^2 = 0,9592 \quad (5)$$

$$Q_m = 4,8163 \times e^{0,0288 \times V} \quad R^2 = 0,9581 \quad (6)$$

Из полученных моделей (3–6), наибольший коэффициент корреляции имеет степенная функция (5). Ее и следует выбрать как наиболее достоверную для оценки исследуемой зависимости.

3.2. Оценка адекватности математических моделей с помощью критерия Фишера

Имеются две нормальные выборки объемом n_1 и n_2 с дисперсиями S_1^2 и S_2^2 . Требуется проверить нуль-гипотезу: обе выборочные дисперсии являются оценками одной и той же генеральной дисперсии. F -статистика со степенями свободы числителя $f_1 = (n_1 - 1)$ и знаменателя $f_2 = (n_2 - 1)$ имеет вид

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad S_1^2 > S_2^2. \quad (7)$$

Нуль-гипотеза отклоняется, если найденное значение F -статистики превосходит критическое (табл. 1).

Таблица 1

Критические значения для F -статистики

f_2	f_1								
	4	6	8	10	20	30	40	60	∞
4	6,39	6,16	6,04	5,96	5,80	5,75	5,72	5,69	5,63
6	4,53	4,28	4,15	4,06	3,87	3,81	3,77	3,74	3,67
8	3,84	3,58	3,44	3,35	3,15	3,08	3,04	3,01	2,93
10	3,48	3,22	3,07	2,98	2,77	2,70	2,66	2,62	2,54
20	2,87	2,60	2,45	2,65	2,12	2,04	1,99	1,95	1,84
30	2,69	2,42	2,27	2,16	1,93	1,84	1,79	1,74	1,62
40	2,61	2,34	2,18	2,08	1,84	1,74	1,69	1,64	1,51
60	2,53	2,25	2,10	1,99	1,75	1,65	1,59	1,53	1,39
∞	2,37	2,10	1,94	1,83	1,57	1,46	1,39	1,32	1,00

4. ОБОРУДОВАНИЕ

1. Набор экспериментальных данных.
2. Персональный компьютер с установленными программами Microsoft Excel, Statistica, Matlab, MathCAD или др.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах формата А4 и должен содержать все элементы и разделы, указанные в п. 3 «Порядок выполнения работы».

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие эксперименты называются однофакторными, а какие многофакторными?
2. Что такое корреляционно-регрессионный анализ?
3. Как производится оценка разброса экспериментальных значений с помощью коэффициента корреляции?
4. Как строятся математические модели?
5. В чем состоит сущность проверки математических моделей на адекватность?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Коротков, А. Н. Инструментальные материалы : учебник для студентов машиностроительных направлений подготовки / А. Н. Коротков, Л. П. Короткова ; Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 188 с. – ISBN 978-5-9729-1997-0.
2. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов / В. А. Коротков. – Москва : Машиностроение, 2009. – 178 с. – ISBN 9785942754884.
3. Короткова, Л. П. Контроль качества инструментальных материалов : учебное пособие / Л. П. Короткова, Д. Б. Шатько; Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 2010. – 164 с. – ISBN 978-5-89070-743-7. – URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90451&type=utchposob:common> (дата обращения: 18.04.2025).

Дополнительная литература:

1. Зубарев, Ю. М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : учебное пособие / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 304 с. –

ISBN 978-5-8114-0973-0. – URL : <http://e.lanbook.com/book/153>
(дата обращения: 18.04.2025).

2. Коротков, А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов / А. Н. Коротков ; Кузбасское региональное отделение РАЕН, Кемеровское региональное отделение Академии проблем качества, Кемеровский центр Сибирского отделения Академии наук высшей школы. – Кемерово, 2006. – 233 с. – ISBN 5890705091. – URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90189&type=utchposob:common>
(дата обращения: 18.04.2025).