

Проект «Инженерные кадры Зауралья»

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Технология машиностроения,  
металлорежущие станки и инструменты»

## **СИЛА РЕЗАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по дисциплине  
«Основы абразивной обработки»  
для студентов направления 151900.62  
«Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
(профиль «Технология машиностроения»)

Курган 2013

Кафедра: «Технология машиностроения металлорежущих станков и инструментов»

Дисциплина: «Основы абразивной обработки»

направление 151900.62 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
(профиль «Технология машиностроения»)

Составили: д-р техн. наук, проф. В.И. Курдюков,  
канд. техн. наук, доц. А.А. Андреев

Утверждены на заседании кафедры «7» ноября 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета в рамках проекта «Инженерные кадры Зауралья» «22» ноября 2013 г.

## **1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить основные закономерности силового и теплового взаимодействия между абразивным инструментом и обрабатываемым материалом. Ознакомиться с методиками измерения сил и температур при шлифовании. Уяснить характер зависимостей силы резания и температуры от параметров режима шлифования и характеристик абразивного инструмента.

## **2 ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА**

- 1 Шлифовальный станок.
- 2 Универсальный динамометр УДМ-100 с комплектом регистрирующей аппаратуры.
- 3 Шлифовальные круги.
- 4 Термопара и комплект регистрирующей аппаратуры.
- 5 Образцы обрабатываемых материалов.

## **3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

- 1 Ознакомиться с правилами техники безопасности при проведении работ.
- 2 Изучить методику выполнения лабораторной работы.
- 3 Овладеть техникой и приемами работы с лабораторным оборудованием и измерительной аппаратурой.
- 4 Провести эксперименты по исследованию зависимости составляющих силы резания от параметров режима шлифования.
- 5 Исследовать зависимость температуры шлифования от параметров режима резания.
- 6 Составить отчет по работе, где изложить суть работы, ее результаты, проиллюстрированные соответствующими таблицами и графиками. Сформулировать основные выводы.

## **4 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИНАМИКИ И ТЕПЛОФИЗИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ**

### **4.1 Сила резания при шлифовании**

Сила резания при шлифовании является результатом суммарного воздействия со стороны обрабатываемого материала на большое количество абразивных зерен, одновременно снимающих мельчайшие стружки. Естественно, что силы, действующие на отдельно взятые на рабочей поверхности инструмента зерна, незначительны, но ввиду массовости процесса суммарная сила резания может достигать значительных величин. Иногда мощность привода главного движения шлифовального станка становится ограничивающим фактором при назначении режима шлифования.

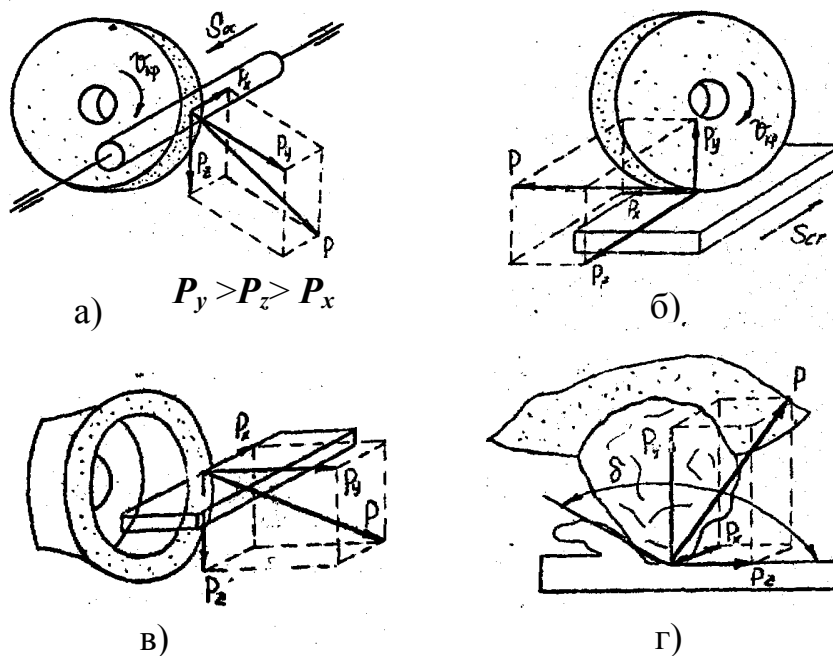
Увеличение силы резания при шлифовании отрицательно сказывается на весь ход процесса: возрастают деформации в технологической системе шлифовального станка, увеличивается скорость изнашивания абразивного инструмента и сокращается период его стойкости, повышается температура в зоне резания и в поверхностных слоях детали, увеличивается шероховатость обрабатываемой поверхности, снижается точность обработки.

При шлифовании различают два типа суммарной силы резания:

- а) шлифовальным инструментом;
- б) одним шлифующим зерном.

Суммарная сила резания  $P$  при шлифовании по аналогии с другими процессами резания, считается составленной из сил: нормальной или радиальной  $P_y$ , тангенциальной  $P_z$  и подачи  $P_x$  (рисунок 1). Ввиду специфики геометрии углы резания  $\delta$  (рисунок 1 г) у преобладающего большинства режущих абразивных зерен значительно больше  $90^\circ$ . Поэтому при шлифовании нормальная составляющая силы резания  $P_y$  всегда больше тангенциальной –  $P_z$  ( $P_y / P_z = 1,0 \div 4,0$ ) и тем более силы  $P_x$ , которой в большинстве случаев можно вообще пренебречь.

Результаты, полученные при исследовании динамики шлифования, используются для расчетов точности обработки, мощности станков, жесткости технологической системы, износостойкости абразивного инструмента, интенсивности теплообразования в зоне шлифования и температурного поля шлифуемой детали.



- а) при круглом шлифовании периферией круга;
- б) при плоском шлифовании периферией круга;
- в) при плоском шлифовании торцом круга;
- г) схема сил резания, действующих на отдельное зерно.

**Рисунок 1 – Сила резания  $P$  при шлифовании и ее составляющие**

## 4.2 Температура при шлифовании

Высокая скорость микрорезания при шлифовании способствует тому, что практически вся механическая работа, совершаемая абразивными зернами, преобразуется в тепло. Это создает большое число высокотемпературных очагов в поверхностном слое детали, обуславливающих его интенсивный нагрев.

Полученная тепловая энергия распределяется между деталью, инструментом, стружкой и окружающей средой. При этом в деталь уходит до 80% этого тепла.

Высокие температуры шлифования могут вызывать дефекты в поверхностном слое шлифуемой детали (прижоги, трещины и т.п.), снижающие ее качество. В связи с этим, температурный фактор приобретает важнейшее значение.

При шлифовании различают три вида температур:

- 1) мгновенную, развивающуюся в зоне микрорезания шлифующим зерном и являющуюся самой высокой и кратковременной;
- 2) контактную, установившуюся в зоне контакта инструмента с деталью (в зоне шлифования);
- 3) среднюю поверхностную, установившуюся на обработанной поверхности детали.

Уровень мгновенной температуры очень трудно установить экспериментально, но при определенных условиях она может достигать температуры плавления обрабатываемого материала.

Контактная температура значительно меньше мгновенной (особенно при шлифовании с охлаждением) -  $200 \div 1100^\circ \text{C}$  из-за с интенсивного теплоотвода из зоны шлифования внутрь детали. Эта температура определяет возможность повышения остаточного напряжения и прижогов в поверхностном слое.

Средняя поверхностная температура ( $20 \div 350^\circ \text{C}$ ) ниже контактной и вызывает, в основном, только тепловые изменения размеров шлифуемой детали.

Уровень температур, в общем случае, зависит от всех условий шлифования: характеристики абразивного инструмента и обрабатываемого материала, значений элементов режима резания, свойств смазочно-охлаждающего средства и др. Причем характер этой взаимосвязи в большинстве случаев сложен и неоднозначен. Например, при увеличении скорости резания толщина срезаемого слоя снижается, но растет число тепловых импульсов при одновременном сокращении времени их действия и изменении условий трения шлифующих зерен по обрабатываемому материалу. В результате взаимодействия всех этих явлений с увеличением скорости резания температура шлифуемой детали повышается.

## 5 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Для экспериментального исследования величины и характера силы резания при шлифовании применяют различные методы и измерительные средства, в частности:

1 *Измерение эффективной мощности*, потребляемой электродвигателем привода главного движения, с последующим расчетом величины тангенциальной составляющей силы резания по выражению:

$$P_z = 998 \frac{N_2}{v} \text{ [Н]}, \quad (1)$$

где  $N_2 = N_{p.x.} - N_{x.x.}$  – эффективная мощность в кВт, развиваемая на шпинделе станка;

$N_{p.x.}$  и  $N_{x.x.}$  – мощность, потребляемая двигателем на холостом и рабочем ходу соответственно;

$v$  – скорость резания в м/с.

Метод прост, но не позволяет определить другие составляющие силы резания.

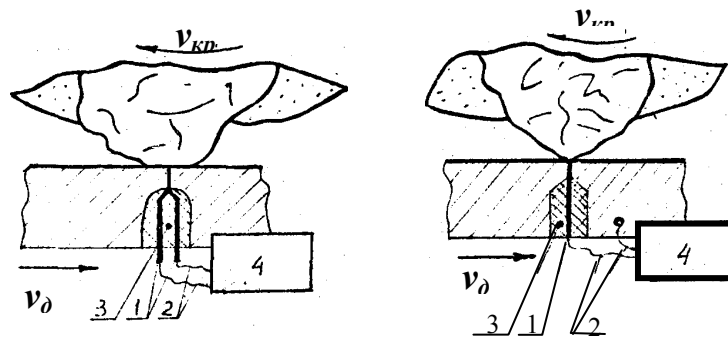
2 *Измерение составляющих силы резания с помощью динамометров*. Наиболее совершенные из них позволяют одновременно измерить все три составляющие силы резания с достаточно высокой степенью точности и основаны на принципе преобразования механических параметров (чаще всего – упругих деформаций несущих элементов) в электрические, с регистрацией последних с помощью самописцев или стрелочных приборов. К таким динамометрам относится и используемый в данной работе универсальный динамометр Мухина (УДМ-100) с максимально допустимой величиной составляющей силы резания в 1000 Н.

## 6 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ШЛИФОВАНИЯ

Температуру шлифуемой детали измеряют:

- а) при помощи термопар (рисунок 2);
- б) по структурным изменениям в поверхностном слое шлифуемой детали;
- в) используя дистанционные датчики (фоторезисторы, пирометры, тепловизоры и т.п.) – рисунок 3;
- г) с помощью термокрасок.

Наиболее широко для измерения температур используют искусственные и полуискусственные термопары (рисунок 2).



а) искусственная;

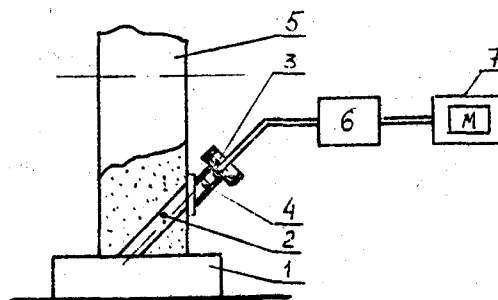
б) полуискусственная

- 1 – термоэлектроды,
- 2 – проводники,
- 3 – электроизоляция термостойкая (слюда),
- 4 – прибор для регистрации термо э.д.с.

**Рисунок 2 – Схемы закладных термопар**

Искусственную термопару чаще всего изготавливают из хромелевой и копелевой или медной и константановой проволочек диаметром 0,1 мм. Диаметр головки термопары делают обычно 0,2 – 0,3 мм.

Полуискусственную термопару легче монтировать в разрезной образец, т.к. здесь используется только один искусственный термоэлектрод, а в качестве второго выступает образец обрабатываемого материала. Она позволяет получить гораздо меньшие размеры горячего спая (до 0,1 x 0,1 мм), что повышает точность измерения. Однако чувствительность ее зависит от свойств обрабатываемого материала и применение ее возможно только при шлифовании токопроводящего материала.



- 1 – деталь,
- 2 – отверстие в шлифовальном круге,
- 3 – фоторезистор,
- 4 – волновод,
- 5 – шлифовальный круг,
- 6 – усилитель,
- 7 – регистрирующий прибор, например, осциллограф

**Рисунок 3 – Схема измерения температуры шлифования бесконтактным методом**

Принцип измерения температуры по структурным изменениям в поверхностном слое шлифуемой детали основан на том, что под действием

температур различного уровня характер этих изменений различен. Например, при нагреве карбидов снижается их твердость и повышается пластичность. Определив степень пластической деформации карбидов в поверхностном слое шлифованной детали, можно сказать об уровне температур, действовавших в зоне шлифования.

Недостаток метода заключается в его относительно высокой трудоемкости и практической невозможности изучения тепловых явлений во времени. Бесконтактные методы, хотя и очень привлекательны своей простотой, страдают низкой точностью из-за непредсказуемого распределения тепловых потоков, различной излучательной способности материалов, экранирования отходами шлифования приемника инфракрасного излучения.

## 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ АБРАЗИВНОМ ШЛИФОВАНИИ

Основной задачей экспериментального определения сил является получение эмпирической зависимости составляющих силы резания от параметров режима шлифования в виде выражений типа:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= C_{Pz} \cdot v^{X_{Pz}} \cdot t^{Y_{Pz}} \cdot S_x^{Z_{Pz}} \\ \theta^\circ &= C_\theta v_\theta^{X_\theta} t^{Y_\theta} S_n^{Z_\theta} \end{aligned} \right\}, (A)$$

где  $v_\theta$  – скорость перемещения детали;

$t$  – глубина шлифования,

$S_n$  – подача; постоянные  $C_{Pz}$ ,  $X_{Pz}$ ,  $Y_{Pz}$ ,  $Z_{Pz}$ ,  $C_\theta$ ,  $X_\theta$ ,  $Y_\theta$ ,  $Z_\theta$  учитывают конкретные условия шлифования: обрабатываемый материал, характеристику шлифовального инструмента, скорость резания, характеристику среды, станка, вида шлифования и многое другое. В зависимости от конкретных целей исследования, в эти формулы добавляют дополнительные параметры, например, скорость круга  $v_{кр}$ , площадь контакта круга с деталью при торцевом шлифовании и т.п., влияющие на уровень сил и температур при шлифовании.

Методика получения степенных выражений типа А заключается в следующем. Поочередно изменяют один из параметров и фиксируют на постоянном уровне остальные, сводя таким образом задачу к получению зависимости функции, например, силы резания, каждый раз только от одного аргумента, например,  $v_\theta$ :

$$P_z = C \cdot v_\theta^{X_{Pz}}. \quad (2)$$

Графически такая зависимость аппроксимируется в двойных логарифмических координатах прямой линией, а тангенс угла наклона этой линии к оси абсцисс дает значение показателя степени  $X_{Pz}$ , т.к. после логарифмирования степенная функция превращается в линейную:

$$\lg P_z = \lg C + X_{Pz} \lg v_\theta. \quad (3)$$

Известно, что для построения прямой линии достаточно двух точек, то и



значения функции экспериментально определяют для 2÷5 значений переменного параметра (увеличение числа значений увеличивает трудоемкость эксперимента, но повышает точность).

Аналогичную процедуру выполняют для всех переменных, входящих в выражение  $A$ , получая значения показателей степеней при каждом из них. Значение постоянных  $C_{P_z}$ ,  $C_\theta$  вычисляют по уравнению  $A$ , которое получают после проведения дополнительного эксперимента по определению значения функции для произвольно выбранного сочетания параметров режима резания. Используя эти экспериментальные данные и полученные ранее значения показателей степеней, записывают уравнение  $A$ , где неизвестным будет только постоянная  $C_{P_z}$  или  $C_\theta$ , если это касается исследования температуры.

Теперь, имея выражение  $A$ , можно вычислить ожидаемые значения составляющих силы резания или контактной температуры для любого сочетания параметров режима шлифования, например, для оценки уровня необходимой жесткости технологической системы или возможности возникновения недопустимых структурных изменений в поверхности обрабатываемой детали и т.п.

## 8 ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Экспериментально получить выражения зависимостей составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$  и среднеконтактной температуры  $\theta$  от глубины, продольной и поперечной подач при плоском шлифовании образца обрабатываемого материала определенной марки кругом заданной характеристики без охлаждения при постоянной скорости резания.

*Примечание.* Допускается эксперименты по исследованию температуры шлифования проводить на другом рабочем месте и при других условиях (обрабатываемый материал, характеристики круга, диапазон изменения режима шлифования и пр.).

## 9 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Какие последствия вызывают рост сил и температур при шлифовании?
- 2 Какой из параметров режима резания наиболее существенно влияет на изменение сил и температуры при шлифовании и почему?
- 3 Перечислите и охарактеризуйте известные методы определения сил и температур при шлифовании.
- 4 В чем суть методики экспериментального получения степенных зависимостей?

## Содержание

1	Цель работы	3
2	Лабораторное оборудование и оснастка	3
3	Порядок выполнения работы	3
4	Основные положения динамики и теплофизики процесса шлифования	3
4.1	Сила резания при шлифовании	3
4.2	Температура при шлифовании	5
5	Методы измерения силы резания и ее составляющих	6
6	Методы измерения температуры в зоне шлифования	6
7	Экспериментальное определение силовых и температурных зависимостей при абразивном шлифовании	8
8	Задание на проведение лабораторной работы	9
9	Контрольные вопросы	9

Курдюков Владимир Ильич  
Андреев Андрей Анатольевич

## **СИЛА РЕЗАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по дисциплине  
«Основы абразивной обработки»  
для студентов направления 151900.62  
«Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
(профиль «Технология машиностроения»)

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано к печати 20.01.14	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать цифровая	Усл. печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 9	Тираж 22	Не для продажи

---

Редакционно-издательский центр КГУ.  
640646, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.