

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

**ДИНАМИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
П О В Е Р Х Н О С Т Е Й
П Р И М Е Х А Н И Ч Е С К О Й О Б Р А Б О Т К Е**

Методические указания
к выполнению практических работ
для студентов направления 15.04.05
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

Севастополь
СевГУ
2017

УДК 621.001

Р е ц е н з е н т:

А.О. Харченко - к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения»

Ответственный за выпуск:

*С.М. Братан - д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой «Технология машиностроения»*

Составители: Новоселов В.К., Сазонов С.Е.

Динамика формообразования поверхностей при механической обработке: метод. указания к выполнению практических работ по дисциплине для студентов направления 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» всех форм обучения / Сост. Ю.К. Новоселов, С.Е. Сазонов. – Севастополь: СевГУ, 2017. – 30 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении практических работ по курсу. Методические указания составлены в соответствии с требованиями программы дисциплины «Динамика формообразования поверхностей при механической обработке».

УДК 621.001

Методические указания утверждены на заседании кафедры «Технология машиностроения», протокол № 1 от 29 августа 2016 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 1. Абразивные процессы материалы и инструменты	4
Практическое занятие № 2. Анализ формы абразивного зерна	12
Практическое занятие № 3. Декомпозиция операций при описании их структуры	15
Практическое занятие № 4. Исследование зависимостей вероятности съема материала при шлифовании	18
Практическое занятие № 5. Исследование баланса перемещений в технологической системе	22
Практическое занятие № 6. Изучение динамики съема материала в зоне контакта заготовки с кругом	26
Список использованных источников	28
Приложение А	29

Практическое занятие № 1

АБРАЗИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, МАТЕРИАЛЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

(Продолжительность выполнения – 2 часа)

Цель занятия: ознакомиться с основными терминами и определениями, материалами и инструментами, применяемыми для процесса абразивной обработки.

1.1. Краткие сведения из теории

Абразивная обработка это процесс формирования поверхности резанием при помощи абразивного инструмента, режущими элементами которого являются зерна абразивного материала. Абразивная обработка может выполняться закрепленными и свободными абразивными зернами.

По назначению все процессы обработки деталей абразивными инструментами принято делить на обдирочные, черновые, чистовые и отделочные.

Обдирочное шлифование применяют при обработке поверхностей имеющих значительные отклонения формы, большую глубину дефектного слоя.

Черновое шлифование выполняют под последующую чистовую обработку. Обеспечивается точность обработки 8-го...10-го квалитетов и шероховатость поверхности $Ra = 0,4...6,3$ мкм.

Чистовое шлифование используют как окончательный метод обработки и под последующую отделочную обработку поверхностей. Обеспечивается точность обработки 6-го...8-го квалитетов и шероховатость поверхности $Ra = 0,16...3,2$ мкм.

Отделочные методы применяют с целью повышения точности обработки, снижения шероховатости поверхности, улучшения физико-механических свойств поверхностного слоя. К ним относятся: тонкое шлифование, полирование, притирка, суперфиниширование, хонингование. Обеспечивается получение точности 5-го...6-го квалитетов и шероховатости поверхности $Ra = 0,04...0,16$ мкм.

Абразивные инструменты классифицируют по следующим признакам [3, 4]: 1) по геометрической форме – шлифовальные круги, головки, сегменты, бруски, абразивные ленты; 2) по виду основы – жесткая (шлифовальные круги, головки, сегменты, бруски); гибкая (эластичные круги, абразивные ленты); жидкая (пасты, суспензии); 3) по роду абразивного материала – абразивные, алмазные, эльборовые и др. (рис. 1.1).

Обозначение типов абразивных кругов приведено в прил. А.

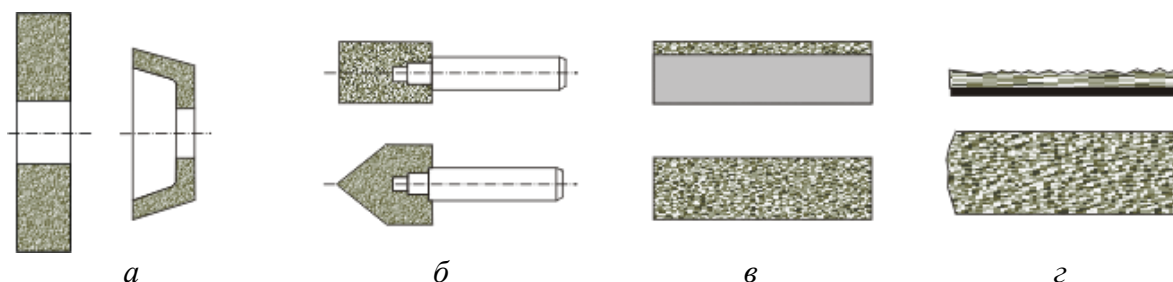


Рис. 1.1. Виды абразивных инструментов: а) абразивные круги;
б) шлифовальные головки; в) шлифовальные бруски; г) абразивные ленты

К абразивным материалам относят вещества природного, искусственного или синтетического происхождения высокой прочности и твердости, порошки которых способны обрабатывать поверхности других твердых тел.

Шлифовальные материалы – это абразивные материалы, подвергнутые сортировке, дроблению, измельчению и очистке от посторонних веществ. Из природных абразивных материалов применяют алмаз, кварц, корунд, наждак, кремнь, гранат. К искусственным и синтетическим абразивным материалам относятся: электрокорунд нормальный, электрокорунд белый, электрокорунд хромистый, электрокорунд титанистый, монокорунд, карбид кремния зеленый и черный, карбид бора, синтетические алмазы, кубический нитрид бора и др.

Шлифовальный порошок: абразивный материал, размеры зерен которого находятся в пределах 4750 – 45 мкм.

Зернистость: условная числовая характеристика зернового состава шлифовальных порошков.

Зерновой состав: распределение абразивных зерен по размерам, выраженное в массовых долях и определяемое путем рассева шлифовальных порошков на контрольных ситах.

Для изготовления абразивного инструмента, исключая инструмент на гибкой основе, а также для использования шлифовальных порошков при обработке свободным абразивным зерном, изготавливают шлифовальные порошки зернистостей: F4 – F220.

Для изготовления абразивного инструмента на гибкой основе изготавливают шлифовальные порошки зернистостей: P12 – P220 [5].

Ориентировочное соответствие зернистостей по настоящему стандарту и ГОСТ 3647 приведено в табл. 1.1.

Корунд – минерал, который состоит из кристаллической окиси алюминия Al_2O_3 (глинозем) с различными примесями. Небольшие запасы корунда в природе позволяют применять его ограниченно для доводочных операций и для обработки оптического стекла [1].

Таблица 1.1 – Соответствие зернистостей

Обозначение зернистостей		Обозначение зернистостей	
ГОСТ Р 52381	ГОСТ 3647	ГОСТ Р 52381	ГОСТ 3647
F4	—	F36, P36	50
F5		F40, P40	—
F6		F46	40
F7		F54, P50	32
F8		F60, P60	25
F10	200	F70	20
F12, P12	160	F80, P80	—
F14	—	F90, P100	16
F16, P16	125	F100, P120	12
F20, P20	100	F120, P150	10
F22	—	F150, P180	8
F24, P24	80	F180, P220	6
F30, P30	63	F220	5

Электрокорунд получают при плавке шихты из естественных бокситов и других веществ, представляет собой корунд с незначительными примесями других минералов. Электрокорунд выпускают в следующих разновидностях: нормальный, белый, хромистый, титанистый, циркониевый, монокорунд, сферокорунд. Электрокорунд нормальный получают плавкой боксита в электродуговых печах. В зависимости от содержания окиси алюминия различают марки электрокорунда: 12А, 13А, 14А, 15А, 16А. Электрокорунд белый отличается от нормального более высоким содержанием окиси алюминия от 98 до 99 %. Выпускается белый электрокорунд следующих марок: 22А, 23А, 24А, 25А. Электрокорунд хромистый (технический рубин) получают при плавке глинозема с добавлением в шихту окиси хрома. Сферокорунд содержит более 99 % Al_2O_3 и получают искусственным путем из корунда в виде полых сфер разного диаметра с толщиной стенки 30...200 мкм.

Карбид кремния получают в электропечах сопротивления, он содержит 97...99 % SiC. Промышленность выпускает две разновидности карбида кремния – зеленый и черный. Зеленый карбид кремния имеет повышенную хрупкость. Его цвет – от светло-зеленого до зеленого с отдельными прозрачными кристаллами. Карбид кремния черный имеет черный или темно-синий цвет.

Карбид бора получают в дуговых электрических печах, представляет собой соединение бора с углеродом. Он содержит 93 % B_4C и 1,5 % свободного углерода.

Природные и синтетические алмазы. Природный алмаз имеет условное обозначение А, а синтетические – АС. Природный алмаз состоит из углерода с незначительным количеством примесей. Он добывается из коренных

или россыпных месторождений. Для абразивных инструментов используют в основном синтетические алмазы, которые получают путем синтеза их из углеродосодержащих веществ. Выпускают порошки следующих марок: АС4, АС6, АС15 и т.д. Числа 4, 6, 15, ... определяют силу, при которой зерно разрушается при раздавливании между пластинами из корунда.

Кубический нитрид бора (КНБ) на 100 % является синтетическим продуктом, в природе как таковой он не встречается. Впервые синтез КНБ был произведен в 1957 году фирмой «Дженерал Электрик». Синтез КНБ осуществляется таким же образом, как и синтетических алмазов. КНБ обладает высокой твердостью и теплопроводностью.

Основными свойствами абразивных материалов являются их твердость, абразивная способность, прочность и износостойкость.

По международным стандартам приняты следующие обозначения: электрокорунд – А; эльбор – В; карбид кремния – С; алмаз – D. Перед обозначением может стоять (но не обязательно) вводный символ изготовителя, указывающий конкретный вид абразивного материала.

Связка абразивных инструментов [1, 2] служит для скрепления зерен шлифовальных материалов и удержания их от преждевременного выкрашивания в процессе шлифования. Она оказывает большое влияние на работоспособность кругов. От количества, вида, качества и равномерности распределения связки в абразивном круге зависят твердость, прочность, структура, неуравновешенность круга и допускаемая скорость шлифования.

Для изготовления абразивных кругов применяют неорганические (керамические, силикатные, металлические и т.д.) и органические (бакелитовые, вулканитовые и т.д.) связки (табл. 1.2). Из них наиболее распространены керамическая, бакелитовая и вулканитовая связки, а при производстве алмазного инструмента – металлическая связка.

Таблица 1.2 – Обозначение связки на маркировке круга

Связка		
По действующему стандарту	По старому стандарту	Вид связки
V	K	керамическая связка
R	B	вулканитовая
RF	BU	вулканитовая с упрочняющими элементами
B	B	бакелитовая связка
BF	BU	бакелитовая связка с упрочняющими элементами
E	Ш	шеллаковая
MG	M	магнезиальная
PL	ПФ	полимерная
BE	ГФ	глифталевая

Структура абразивного инструмента характеризует строение абразивного инструмента в зависимости от количественного соотношения между зернами, связкой и порами в единице объема и обозначается номерами от 0 до 12, но открытая структура может обозначаться цифрами более 12 (табл. 1.3). С увеличением номера структуры число зерен уменьшается, а объем связки – увеличивается. Абразивные инструменты структуры 0-3 имеют очень плотное расположение зерен и используются для профильного шлифования. Абразивные инструменты структуры 5-8 позволяют работать на повышенных режимах и предотвращать появление дефектов на обработанной поверхности.

Таблица 1.3 – Виды структур абразивного инструмента

Структура абразивов	
1-2-3-4	закрытая структура
5-6-7	средняя структура
8-9-10-11-12...	открытая структура

Концентрация зерен в абразивном слое является условной характеристикой режущей способности алмазных и эльборовых кругов. За 100%-ную концентрацию принимают содержание 0,878 г (4,4 карата) зерен алмаза или эльбора в 1 см³ абразивного слоя, что составляет 25 % его объема. С увеличением концентрации повышается режущая способность и стойкость кругов. Для окончательного шлифования и доводки рекомендуются круги 100%-ной и 150%-ной концентраций, а для профильного шлифования и заточки твердосплавных инструментов 150...200% -ной концентрации.

Твердость абразивных инструментов – это способность связки удерживать зерно в инструменте при воздействии на него внешних сил. Чем меньше твердость инструмента, тем легче и быстрее из него удаляются затупившиеся зерна, и наоборот [6].

Установленная шкала степеней твердости абразивных инструментов и ориентировочное соответствие обозначений по стандарту ГОСТ Р 52587 – 2006 и ГОСТ 18118, ГОСТ 19202, ГОСТ 21323 приведена в табл. 1.4.

Цифры 1, 2 и 3 характеризуют твердость в порядке ее возрастания.

Кроме рассмотренных характеристик при производстве абразивного инструмента нормируются точность и дисбаланс. Выпускают круги трех классов точности: АА, А и Б. Круги класса АА применяют для прецизионной обработки, круги класса А – высокоскоростного и окончательного шлифования.

Допустимые рабочие скорости для абразивных кругов приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.4 – Шкала степеней твердости абразивных инструментов и ориентировочное соответствие обозначений

Обозначение твердости		
По действующему ГОСТ Р 52587-2006	По ГОСТ 18118, ГОСТ 19202, ГОСТ 21323	Твердость абразивов
F	BM1	весьма мягкие
G	BM2	
H	M1	мягкие
I	M2	
J	M3	
K	CM1	среднемягкие
L	CM2	
M	C1	средние
N	C2	
O	CT1	среднетвердые
P	CT2	
Q	CT3	
R	T1	твердые
S	T2	
T, U	BT	весьма твердые
V, W, X, Y, Z	CT	чрезвычайно твердые

Таблица 1.5 – Допустимые рабочие скорости для абразивных кругов

Рабочая скорость абразивов	
Тип круга	рабочая скорость, м/с
1, 3, 4, 5, 7	35, 40, 50, 63
2	25, 32, 35, 63
6, 11, 12, 14	32, 40, 50, 63
35, 36	32, 35, 63
38, 39	40, 63

Маркировка шлифовальных инструментов наносится на одной из сторон круга водостойкой краской.

Пример условного обозначения круга типа 1 наружным диаметром $D = 300$ мм, высотой $H = 20$ мм, диаметром посадочного отверстия $d = 76,2$ мм, из белого электрокорунда марки 25А, зернистостью F60, твердостью К, номером структуры 6, на керамической связке V, с предельной рабочей скоростью 40 м/с, 2-го класса неуравновешенности:

Круг 1 300x20x76,2 25А F60 К 6 V 40 м/с 2 кл.

Пример условного обозначения алмазного круга с формой сечения корпуса 1, формой сечения алмазоносного слоя А, расположением алмазоносного слоя на корпусе круга 1, диаметром $D = 300$ мм, диаметром посадочного отверстия $d = 76$ мм, высотой $H = 5$ мм, толщиной алмазного слоя $S = 5$ мм

из алмазных порошков марки АС4, зернистостью 100/80, относительной концентрацией алмазов 100, на металлической связке марки М2 – 01:

Круг 1 А 1 300x40x76x5 АС4 100/80 100 М2-01

При установке шлифовальных кругов на станок производят обязательную их балансировку вместе с планшайбой. После первой правки рекомендуется проводить повторную балансировку. При выполнении наиболее ответственных операций применяют динамическую балансировку непосредственно на станке. Правку круга производят обтачиванием алмазными карандашами, алмазными иглами, методом обкатывания, шлифованием, накатыванием [1]. Алмазный карандаш представляет собой стальной цилиндр, в котором в определенном порядке размещены кристаллы технических алмазов. Обкатывание проводят абразивными, твердосплавными и стальными дисками. Правка шлифованием выполняется медленно вращающимся абразивным кругом либо алмазным роликом.

1.2. Последовательность выполнения работы, варианты заданий

Практическую работу рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

Получить у преподавателя задание. Варианты заданий приведены в таблице:

№ вар.	Обозначение инструмента
1	Круг 1 450x40x80 15А F40 N 6 В 35 м/с 2 кл. Круг 5 300x40x60 64С F22 L 4 ВF 50 м/с 1 кл. Круг 2 А 1 100x40x30x7 АС50 63/50 125 М3-12
2	Круг 2 350x20x75 15А F20 О 5 К 35 м/с 1 кл. Круг 3 400x30x82 55С F24 М 7 В 40 м/с 2 кл. Круг 1 А 2 200x20x55x6 А5 100/80 50 В1-01
3	Круг 4 370x25x90 45А F36 Q 4 ВF 35 м/с 1 кл. Круг 7 500x60x100 53С F30 Р 8 К 40 м/с 2 кл. Круг 2 А 2 220x25x50x4 АРС4 125/100 35 В2-01
4	Круг 1 450x40x80 15А F20 О 6 В 35 м/с 1 кл. Круг 7 500x60x100 53С F22 L 4 К 40 м/с 2 кл. Круг 1 А 2 200x20x55x6 АС50 63/50 50 М3-12
5	Круг 5 300x40x60 64С F36 Q 4 ВF 35 м/с 1 кл. Круг 4 370x25x90 45А F24 М 7 В 40 м/с 1 кл. Круг 1 А 2 200x20x55x6 АСН 50/40 50 В1-01

Расшифровать обозначения абразивного инструмента с подробным описанием характеристик.

Оформить отчет по выполненной работе.

1.3. Вопросы для контроля знаний

1. В чем заключается сущность процесса абразивной обработки? Виды абразивной обработки и область её применения.
2. Абразивные материалы, применяемые для абразивной обработки.
3. Характеристики абразивного инструмента.
4. Маркировка абразивного инструмента.

Практическое занятие № 2

АНАЛИЗ ФОРМЫ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА

(Продолжительность выполнения – 2 часа)

Цель занятия: выполнить анализ возможности математического моделирования формы абразивного зерна.

2.1. Краткие сведения из теории

Описание базового участка рабочей поверхности абразивного инструмента предусматривает определение геометрических размеров, числа, распределения формообразующих элементов. Форма элементов зависит от их природы и вида. Для процессов обработки лезвийным инструментом она задается в виде неслучайных параметров. Для процессов второй группы элементы не имеют регулярной геометрии, их форма может быть смоделирована случайными функциями. Например, радиус-вектор точек контура абразивного зерна $R_g(\varphi)$, по данным А.В. Королева, является случайной функцией угла φ (рис. 2.1, а):

$$R_g(\varphi, 0) = r_g + \sum_{k=2}^p (x_k \sin(\omega_k \varphi) + y_k \cos(\omega_k \varphi)), \quad (2.1)$$

где r_g – радиус средней окружности профиля, определяемый как среднее значение функции $R_g(\varphi, 0)$; x_k , y_k – случайные некоррелированные амплитуды, соответствующие k -й гармонике и имеющие равные дисперсии; ω_k – произвольно выбранная частота.

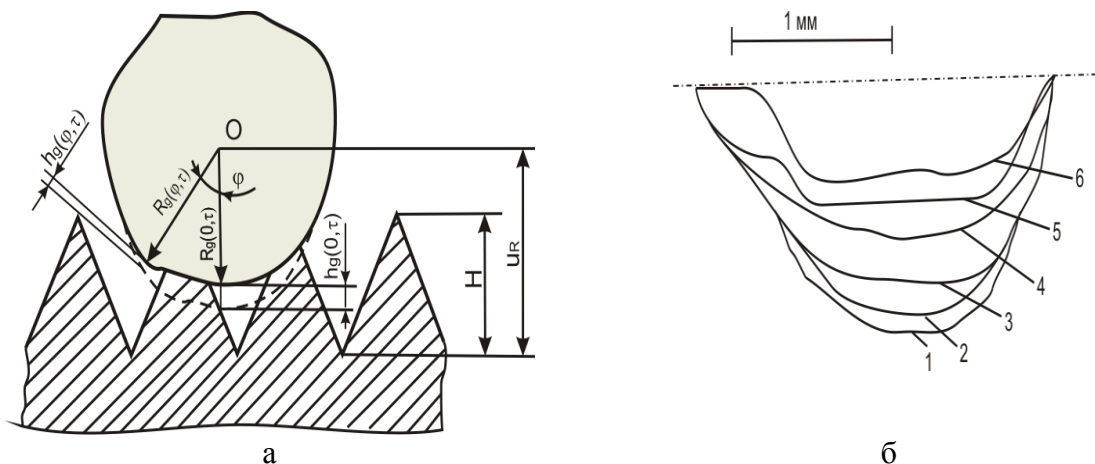


Рис. 2.1. Изменение контура абразивного зерна: а) схема к расчету; б) контур вершины зерна из карбида кремния зеленого после одного, двух, ..., пяти проходов (кривые 2, 3, ..., 5 соответственно)

Уравнение (2.1) является результатом разложением случайной функ-

ции в ряд Фурье и приемлемо для описания формы практически любых единичных элементов рабочей поверхности инструмента.

При записи уравнения (2.1) в виде

$$R_g(\varphi, 0) = r_g + \sum_{k=2}^p A_k \sin(k\varphi + \psi_k), \quad (2.2)$$

где $A_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2}$; $\operatorname{tg} \psi_k = \frac{y_k}{x_k}$.

Математическое ожидание и корреляционная функция радиус-вектора точек контура абразивного зерна

$$M[R_g(\varphi, 0)] = r_{g0}; \quad (2.3)$$

$$k_R(\varphi_1, \varphi_2) = \sigma_r^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^p (A_{ok}^2 + \sigma_{ok}^2) \cos k(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2.4)$$

где r_{g0} и σ_r^2 – математическое ожидание и дисперсия средней окружности контура зерна; A_{ok} и σ_{ok}^2 – математическое ожидание и дисперсия амплитуды синусоид.

Вычисление текущего радиус-вектора профиля абразивного зерна требует накопления большого объема экспериментальных данных по измерению геометрических параметров абразивных зерен.

При анализе операций обработки деталей абразивными инструментами предполагают, что вершина зерна, выступающая над уровнем связки, имеет форму конуса, конуса с закругленной вершиной, конуса с усеченной вершиной.

Всесторонний анализ существующих моделей режущих элементов абразивных зерен, выполненный профессором Л.В. Худобиным, показал, что модель в виде параболы более соответствует экспериментальным геометрическим параметрам абразивных зерен, чем другие модели. Если обозначить расстояние от вершины зерна до рассматриваемого уровня за h , то ширина профиля вершины b_g на этом уровне (рис 2.2, а, б) определится как

$$b_g = 2\sqrt{2\rho_g h}, \quad (2.5)$$

где ρ_g – радиус округления при вершине зерна.

Учитывая многообразие форм абразивных, алмазных, эльборовых зерен, уравнение (2.5) записывают в более общем виде:

$$b_g = C_b h^m, \quad (2.6)$$

в котором коэффициенты C_b и m определяются экспериментально.

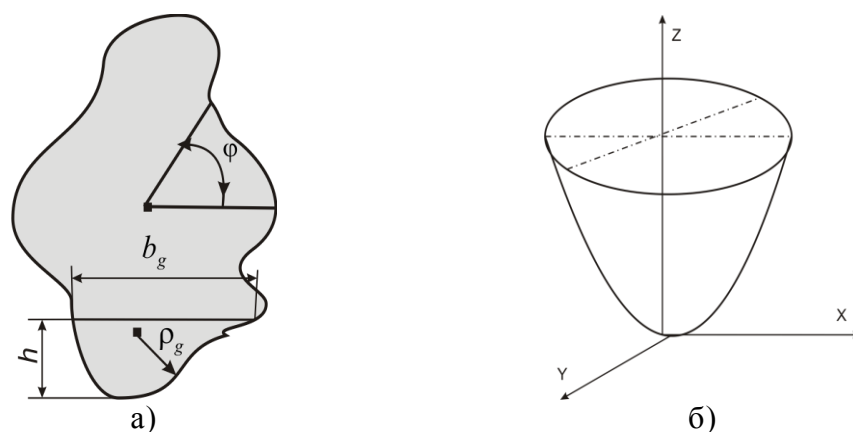


Рис. 2.2. Абразивного зерно: а) контур зерна; б) параболоид вращения

2.2. Последовательность выполнения работы, варианты заданий

Практическую работу рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Получить у преподавателя задание. Варианты заданий приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты заданий

№ варианта	Амплитуда, мкм			Фаза, градусы		
	A_2	A_3	A_4	ψ_2	ψ_3	ψ_4
1	10	10	0	0	45	-
2	15	0	10	90	-	45
3	10	15	0	0	90	-
4	20	0	20	90	-	90

2. Построить графики функций $y = A_k \sin(k\varphi + \psi_k)$.

3. Построить график функции

$$y = A_2 \sin(2\varphi + \psi_2) + A_3 \sin(3\varphi + \psi_3) + A_4 \sin(4\varphi + \psi_4).$$

Построить в полярных координатах контур абразивного зерна $R_g(\varphi, 0) = r_g + A_2 \sin(2\varphi + \psi_2) + A_3 \sin(3\varphi + \psi_3) + A_4 \sin(4\varphi + \psi_4)$. При построении контура в полярных координатах принять шаг 5° .

Оформить отчет по выполненной работе. В отчете должны быть отражены пункты 1 – 4 последовательности выполнения работы.

2.3. Вопросы для контроля знаний

1. Можно ли моделировать форму абразивного зерна?
2. Зависит ли форма абразивного зерна от вида абразивного материала?
3. Можно ли считать амплитуды и фазы уравнения (2.2) при моделировании зерна постоянными величинами?
4. Что такое корреляционная функция?

Практическое занятие № 3

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ОПИСАНИИ ИХ СТРУКТУРЫ (Продолжительность выполнения – 2 часа)

Цель занятия: освоение методики декомпозиции операций технологического процесса изготовления изделия и ознакомление с методами описания структуры операций.

3.1. Краткие сведения из теории

При описании технологической операции как технической системы используются модели двух видов. К первому относят модели, описывающие поведение системы, ко второму – модели, отражающие ее структуру. При описании поведения системы не рассматривают её внутреннее содержание. Систему представляют в виде чёрного ящика, устанавливают связь выходных переменных $Y(t)$ с входными переменными X и управляющим воздействием $U(t)$,

$$Y(t) = f(X; U(t)). \quad (3.1)$$

При описании структуры систему разбивают на составляющие подсистемы и элементы, устанавливают закономерности работы каждой из подсистем и законы их совместного функционирования.

Математическая модель системы записывается в виде функций переходов и выходов вида

$$Z(t) = F(X; U(t)); \quad (3.2)$$

$$Y(t) = G(Z(t)), \quad (3.3)$$

где $Z(t)$ – вектор параметров состояния технической системы.

Моделирование структуры сложных технических систем по данным Н.П. Бусленко включает в себя следующие основные этапы:

1. Декомпозиция системы или ее расчленение на подсистемы до требуемого уровня.
2. Содержательное описание работы каждой из подсистем и системы в целом.
3. Принятие допущений.
4. Разработка формализованных схем и моделей.
5. Переработка формализованных схем в математическую модель системы.

Необходимым условием декомпозиции является установление всех связей каждой из подсистем с окружающей средой и другими подсистемами. Декомпозиция является достаточно сложным и трудоёмким этапом. Пример декомпозиции операции круглого наружного шлифования приведен на рис. 3.1.

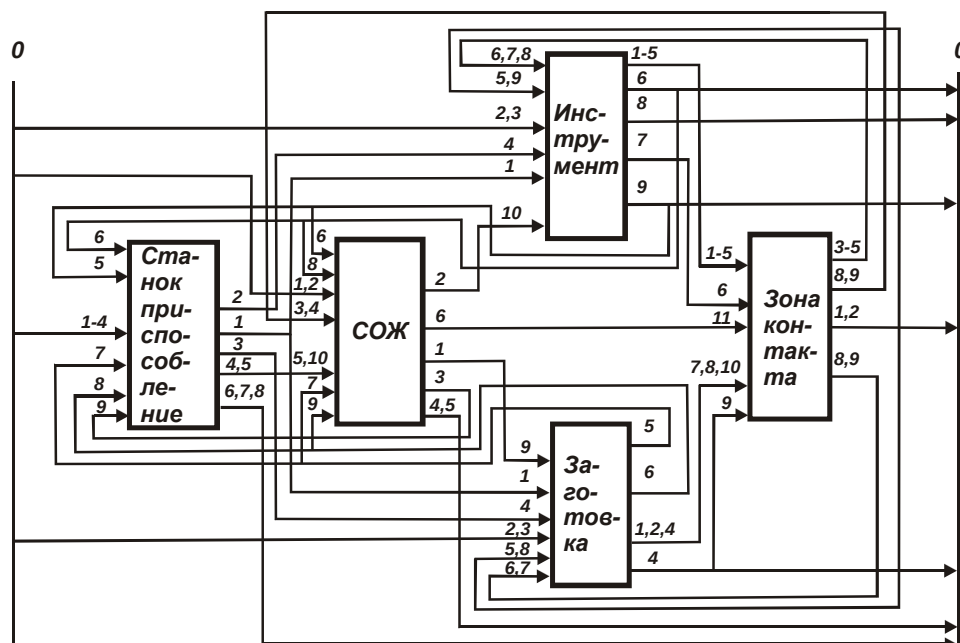


Рис. 3.1. Схема связей между подсистемами операции шлифования (цифрами обозначены входные и выходные переменные, перечень которых необходимо составить при выполнении работы)

По функциональным признакам операция может быть разбита на подсистемы станка, приспособления, инструмента, заготовки, СОЖ [2]. Каждая из подсистем имеет свой набор свойств, параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, вектор возмущающих воздействий. Управление процессом осуществляется подсистемой станка, в которую может быть включена и подсистема приспособления. При обработке на автоматизированном оборудовании в целях организации управления необходимо выделять также подсистему числового программного управления. При включении станка его узлы и исполнительные элементы начинают перемещаться, изменяются координаты (параметры состояния) подсистем. Через узлы приспособлений движущие силы и моменты передаются на вход подсистем заготовки, инструмента, СОЖ. При сближении инструмента и заготовки вследствие упругих деформаций в технологической системе появляется радиальное давление инструмента на изделие [2], под действием которого абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал, возникает зона контакта инструмента с заготовкой. В свою очередь зона контакта оказывает воздействие как на заготовку, так и на инструмент. В структурной схеме (см. рис. 3.1) [2] это отражено обратными связями, без учета которых часто бывает невозможна качественная и, в особенности, количественная оценка процесса. При выполнении системно-структурного анализа необходимо описание свойств подсистем, связей между ними, законов функционирования подсистем и системы в целом. Свойства подсистем включают: временные, пространственные, пространственно-временные, физико-механические и химические характе-

ристики. Входные и выходные переменные отражают связи (отношения) в системе и образуют ее структуру. Переход входных переменных к выходным осуществляется через параметры состояния подсистем.

Последовательный анализ свойств, связей, состояний, законов функционирования подсистем обеспечивает их полное пространственно-временное описание.

3.2. Последовательность выполнения работы, варианты заданий

Практическую работу рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Получить у преподавателя задание. Варианты заданий приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты заданий

№ варианта	Наименование операций	Подсистема
1	Шлифование	Станок, приспособление
2		Инструмент (шлифовальный круг)
3		Заготовка
4		Смазочно-охлаждающая жидкость
5		Зона контакта заготовки с инструментом

2. Дать описание для всех входных, выходных переменных и параметров состояния заданной для анализа преподавателем подсистемы.

3. Представить связи исследуемой подсистемы со средой и другими подсистемами в виде схемы, подобной рис. 3.1.

4. Дать содержательное описание закономерностям работы подсистемы.

5. Представить формализованную запись функциям переходов и выходов для рассматриваемой подсистемы.

6. Оформить отчет по выполненной работе. В отчете должны быть отражены пункты 1-5 последовательности выполнения работы.

3.3. Вопросы для контроля знаний

1. В чем заключается сущность системного подхода, что такое техническая система?

2. С какой целью выполняют декомпозицию операции?

3. Какие подсистемы выделяют при декомпозиции операций обработки материалов резанием?

4. В какой последовательности проводится анализ при описании структуры технической системы?

5. Чем отличаются функции переходов от функций выходов?

Практическое занятие № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ СЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

(Продолжительность выполнения – 4 часа)

Цель занятия: освоение методик аналитического расчета вероятности удаления материала для операций механической обработки заготовок.

4.1. Краткие сведения из теории

Для анализа процессов динамики обработки заготовок необходимо иметь статистический критерий, с помощью которого можно было бы проследить закономерности отображения поверхностей резания в материале заготовки. Для выбора такого критерия рассмотрим в переходной (граничной) области материал-среда (рис. 4.1) произвольную точку M . Состояние в точке характеризуется двумя событиями: материал в точке может быть либо удален, либо не удален. Каждое событие имеет свою вероятность. Сумма вероятностей событий как событий противоположных равна единице, а значения вероятностей в общем случае могут зависеть от положения точки в граничной области. Назовем вероятность первого события вероятностью удаления материала, второго – вероятностью неудаления материала, введя соответствующие обозначения: $P(M)$ и $P(\bar{M})$. Если профиль обработанной поверхности стационарен и относительно начала координат по оси x жестко не закреплен, то вероятность неудаления материала на уровне y (рис. 4.1) определяется по пределу отношений суммы длин отрезков b_i , заполненных материалом, к длине сечения l , стремящейся к бесконечности,

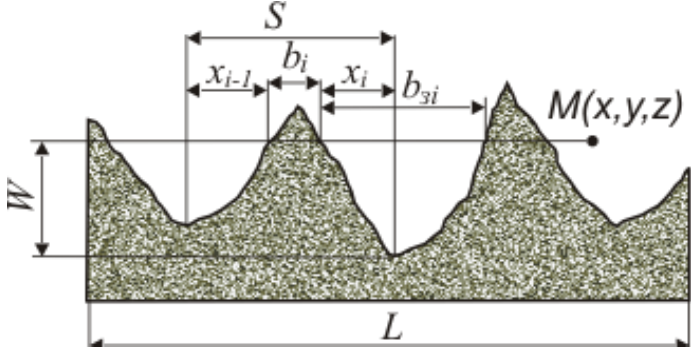
$$P(\bar{M}) = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\sum b_i}{l} \cdot \quad (4.1)$$


Рис. 4.1. Схема к расчету вероятности удаления материала

Поскольку сумма выступов, заполненных материалом при $l \rightarrow \infty$

стремится к $l \cdot \lambda \cdot M[b]$, уравнение (4.1) может быть записано в виде

$$P(\bar{M}) = \lambda M[b], \quad (4.2)$$

где λ – математическое ожидание числа выступов на единицу длины сечения; $M[b]$ – математическое ожидание ширины выступа шероховатости поверхности на заданном уровне.

Для расчета вероятности неудаления материала по зависимости (4.2) необходимо определить λ и $M[b]$. Математическое ожидание числа выступов шероховатости с учетом выступов с размерами $b = 0$ равно математическому ожиданию числа впадин и определяется конструкцией инструмента и кинематикой процесса.

Для точения (рис. 4.1)

$$\lambda = \frac{1}{S_o}, \quad (4.3)$$

где S_o – продольная подача резца на один оборот заготовки.

Для торцового фрезерования

$$\lambda = \frac{1}{S_z}, \quad (4.4)$$

где S_z – подача на один зуб фрезы.

Для шлифования λ равно среднему числу зерен, проходящих через единицу сечения.

Ширину единичного выступа вычисляем, когда формообразующие элементы имеют одинаковую геометрию и внедряются на одинаковую глубину

$$b = \begin{cases} s - x_{i-1} - x_i & \text{при } x_{i-1} + x_i < s \\ 0 & \text{при } x_{i-1} + x_i \geq s \end{cases}, \quad (4.5)$$

где S – расстояние между двумя соседними впадинами поверхностей резания.

Поскольку сумма расстояний x_{i-1} и x_i равна ширине сечения поверхности резания b_g на рассматриваемом уровне, уравнение (4.5) может быть записано:

$$b = \begin{cases} s - b_g & \text{при } b_g < s \\ 0 & \text{при } b_g \geq s \end{cases}. \quad (4.6)$$

Для токарной обработки все переменные, входящие в уравнение (4.6) можно считать детерминированными величинами и поэтому в пределах слоя шероховатости поверхности

$$P(\bar{M}) = \frac{1}{s_o} b = 1 - \frac{w}{s_o} (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1), \quad (4.7)$$

где w – расстояние до уровня от впадины поверхности резания; φ и φ_1 – соответственно главный и вспомогательный углы в плане.

Для процесса торцового фрезерования расстояние между двумя соседними поверхностями резания является величиной случайной в связи с наличием биения зубьев фрезы. По данным выполненных исследований расстояние от центра вращения фрезы до вершин режущих элементов распределено по нормальному закону с параметрами среднего радиуса r_ϕ и среднеквадратическим отклонением σ . Из теории вероятностей известно, что если случайная величина Y является функцией случайной величины X , то математическое ожидание Y вычисляется по зависимости

$$M[Y] = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) f(x) dx, \quad (4.8)$$

где $f(x)$ – плотность вероятностей распределения случайной величины X .

Для фрезерования зависимость (4.8) для расчета математического ожидания размера выступа шероховатости принимает вид

$$M[b] = \int_{b_3}^{\infty} (s_z - b_g) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(s_z - \bar{s}_z)^2}{2\sigma^2}} ds_z, \quad (4.9)$$

где $\bar{s}_z$ – среднее расстояние между поверхностями резания.

В работе [2] теоретически и экспериментально доказано, что для процессов шлифования расстояние между поверхностями резания распределено по показательному закону

$$f(s) = \lambda e^{-\lambda s}. \quad (4.10)$$

При этом зависимость (4.8) принимает вид

$$M[b] = \int_{b_3}^{\infty} (s - b_g) \lambda e^{-\lambda s} ds = \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda b_g}. \quad (4.11)$$

Соответственно зависимости для расчета вероятностей неудаления материала для процессов фрезерования и шлифования запишутся

$$P(\bar{M}) = \frac{1}{\bar{s}_z \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{b_g}^{\infty} (s_z - b_g) e^{-\frac{(s_z - \bar{s}_z)^2}{2\sigma^2}} ds_z, \quad (4.12)$$

$$P(\bar{M}) = e^{-\lambda b_g}. \quad (4.13)$$

4.2. Последовательность и варианты выполнения работы

Рекомендуется следующая последовательность выполнения работы:

1. Для заданного преподавателем варианта при трех – четырех уровнях w рассчитать вероятности удаления и неудаления материала при выполнении токарной, фрезерной, шлифовальной операций.

2. Построить для заданных условий обработки экспериментальные

профили обработанных поверхностей, методика построения профилей разрабатывается студентом и согласовывается с преподавателем.

3. Определить по построенным профилям для принятых уровней вероятности неудаления и удаления материала.

4. Сделать выводы по работе, оформить отчет. Отчет должен содержать все пункты рассмотренной последовательности работы.

Варианты заданий приведены в таблице:

№ варианта	Математическое ожидание числа формообразующих элементов χ , 1/м	Форма элемента
1	50 на одном уровне	Конус с углом при вершине 90° градусов
2	100 на одном уровне	
3	50·103 на одном уровне	
4	100 на двух уровнях	
5	50·103 на двух уровнях	
6	50 на одном уровне	Параболоид вращения
7	100 на одном уровне	
8	50·103 на одном уровне	
9	100 на двух уровнях	
10	50·103 на двух уровнях	

4.4. Вопросы для контроля знаний

1. Дайте определение понятиям «вероятность удаления материала» и «вероятность неудаления материала».

2. Как рассчитывается вероятность неудаления материала для операций: точение, фрезерование, шлифование.

3. В чем заключаются особенности методики построения экспериментальных профилей поверхности?

4. Как изменятся зависимости для расчета вероятностей, если профили режущих элементов инструмента будут случайными?

Практическое занятие № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

(Продолжительность выполнения – 4 часа)

Цель занятия: исследовать изменение взаимного расположения инструмента и заготовки и параметров зоны контакта в процессе механической обработки.

5.1. Основные теоретические положения

Для анализа особенностей взаимодействия заготовки и инструмента при абразивной обработке определим некоторые понятия, которые относятся к процессу резания [1, 2]:

Условная наружная поверхность круга, (рис. 5.1), – поверхность геометрически правильной формы, которая проведена через вершины наиболее выступающих зерен.

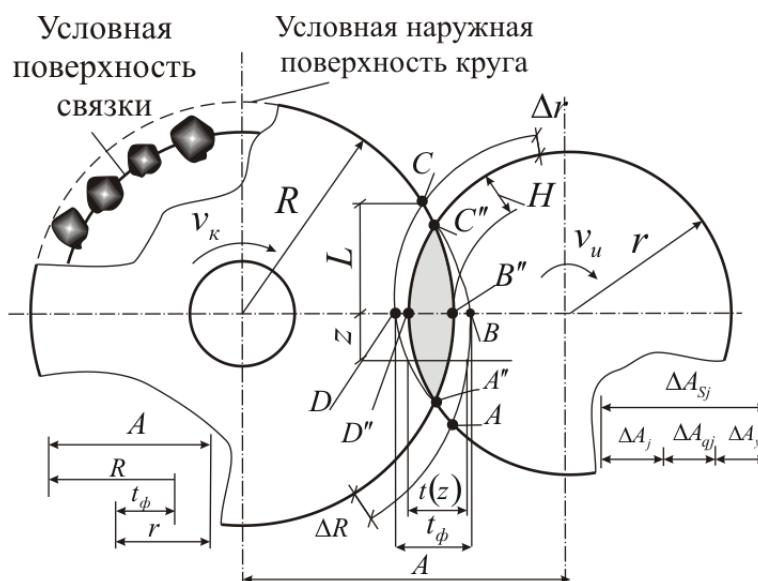


Рис. 5.1. К расчету баланса перемещения в технологической системе

Обрабатываемая поверхность – поверхность, с которой удаляется материал при данном проходе инструмента.

Условная поверхность связки – поверхность геометрически правильной формы, которая заменяет с наибольшим приближением фактическую поверхность связки.

Зона контакта заготовки с инструментом – область пересечения условной наружной поверхности инструмента и обрабатываемой поверхности.

В сечении плоскостью, перпендикулярной оси детали, зона контакта имеет форму двух сегментов с общей хордой, сегменты ABC и CDA. При шлифовании после выхода из зоны радиус заготовки уменьшается на величину радиального съема материала Δr . На поверхности остается слой шероховатости поверхности H (граничная область материал-среда). Радиус круга в зоне контакта уменьшается на величину износа ΔR . Это приводит к изменению формы самой зоны. Обрабатываемая поверхность встречается с абразивными зернами, наиболее удаленными от центра его вращения, не в точке A, а в точке A'', процесс микрорезания заканчивается не в точке C, а в точке C''. С учетом радиального съема материала и износа круга зона контакта будет иметь форму двух криволинейных сегментов, сегмент A''B''C'' и сегмент C''D''A''. С уменьшением радиального съема материала линия C''D''A'' приближается к линии CDA. Форма зоны будет меняться и за счет возникновения упругих деформаций круга и заготовки.

Так как положение линии A''D''C'' определяется условиями выполнения процесса шлифования, то за начало отчета необходимо брать дугу ADC, которая соответствует траектории движения наиболее выступающих вершин исходной шероховатости. Положение линии A''D''C'' вычисляется аналитически.

Ширину зоны контакта t_f (максимально возможную фактическую глубину микрорезания) определим в плоскости, которая проходит перпендикулярно оси вращения круга и заготовки (основная плоскость). Глубина t_f на три порядка меньше размеров круга и заготовки. Это позволяет определить геометрические параметры зоны по приближенным зависимостям Е.Н. Маслова.

$$t(z) = t_f - \frac{z^2 \cdot (D + d)}{D \cdot d} = t_f - \frac{z^2}{D_9}, \quad (5.1)$$

$$L = \sqrt{t_f \cdot D_9}, \quad (5.2)$$

где z – расстояние сечения от основной плоскости; D и d – диаметры круга и заготовки, соответственно; D_9 – эквивалентный диаметр.

Для анализа выделим на обрабатываемой поверхности базовый участок с радиус-вектором r . При одном обороте заготовки базовый участок встречается с инструментом один раз и его радиус-вектор уменьшается на величину радиального съема материала. При наличии подачи изменяется и межцентровое расстояние A между осью вращения круга и детали на величину ΔA . В соответствии с размерной цепью, (рис. 5.1), имеем

$$\left. \begin{aligned} t_{fj} &= R_j + r_j - A_j \\ t_{fj-1} &= R_{j-1} + r_{j-1} - A_{j-1} \end{aligned} \right\}, \quad (5.3)$$

где индексами j и $j-1$ соответственно обозначены параметры j -го и $j-1$ -го контактов.

Выразив параметры j -го контакта через параметры $j-1$ -го контакта и их приращения. $R_j = R_{j-1} - \Delta R$; $r_j = r_{j-1} - \Delta r$; $A_j = A_{j-1} - \Delta A$; $t_{fj} = t_{fj-1} + \Delta t_f$. Система уравнений (5.3) запишется

$$\left. \begin{aligned} t_{fj-1} + \Delta t_{fj} &= R_{j-1} - \Delta R_j + r_{j-1} - \Delta r_j - A_{j-1} + \Delta A_j \\ t_{fj-1} &= R_{j-1} + r_{j-1} - A_{j-1} \end{aligned} \right\}. \quad (5.4)$$

Вычтем из второго уравнения первое и после несложных преобразований получим:

$$\Delta A_j = \Delta t_{fj} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1}. \quad (5.5)$$

В уравнении (5.3) величины ΔA_j , ΔR_j , Δr_{j-1} определены с учетом упругих и температурных деформаций. За период между j -м и $j-1$ -м контактами межцентровое расстояние при отсутствии деформаций должно измениться на величину подачи за оборот заготовки ΔA_{sj} , которая в общем случае определяется определенным интегралом от скорости подачи S . За это же время упругие деформации в технологической системе в связи с изменением сил резания могут измениться на величину ΔA_{yj} . Возможны также и изменения межцентрового расстояния за счет температурных деформаций технологической системы. С учетом упругих и температурных деформаций фактическое приращение межцентрового расстояния при выполнении j -го контакта, как следует из размерной цепи (рис. 5.1), вычислится:

$$\Delta A_j = \Delta A_{sj} - \Delta A_{sj} - \Delta A_{yj} - \Delta A_{qj}. \quad (5.6)$$

Аналогичные зависимости для круга и заготовки запишутся в виде

$$R_j = R_{j-1} - \Delta R_{uj} + \Delta R_{qj} - \Delta R_{yj}, \quad (5.7)$$

$$r_j = r_{j-1} - \Delta r_{j-1} + \Delta r_{qj-1} + \Delta r_{yj-1}, \quad (5.8)$$

где ΔR_{uj} , ΔR_{qj} , ΔR_{yj} – соответственно радиальный износ, температурные и упругие деформации радиус-вектора круга; Δr_{j-1} , Δr_{qj-1} , Δr_{yj-1} – радиальный съем материала, температурные и упругие деформации радиус-вектора заготовки.

С учетом упругих и температурных деформаций уравнение (5.5) запишется

$$\Delta A_{sj} = \Delta t_{fj} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \Delta A_{yj} + \Delta A_{qj}, \quad (5.9)$$

где ΔA_{yj} и ΔA_{qj} – приращения упругих и температурных деформаций элементов технологической системы, вычисляются суммированием приращений деформаций отдельных элементов. При суммировании знак плюс

присваивается, если приращение уменьшает глубину резания и знак минус – если увеличивает глубину резания.

5.2. Последовательность и варианты выполнения работы

Рекомендуется следующая последовательность выполнения работы:

1. Рассмотреть последовательность вывода уравнений баланса перемещений в технологической системе.
2. Предложить методику расчета баланса в технологической системе.
3. Рассчитать для заданных преподавателем условий баланс перемещений в технологической системе.
4. Построить графики баланса перемещений, выполнить их анализ.
5. Сделать выводы по работе, оформить отчет. Отчет должен содержать все пункты рассмотренной последовательности работы.

Варианты заданий приведены в таблице.

№ варианта	Начальное состояние				Зависимости модели
	A_0	R_0	r_0	ΔA_s	
1	0,35	0,30	$50 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$\Delta R_u = 0,01 \cdot t_f, \quad \Delta r = 0,3 \cdot t_f,$ $\Delta A_y = 0,4 \cdot \Delta t_f, \quad \Delta R_t = 0,$ $\Delta R_y = 0, \Delta r_t = 0, \Delta r_y = 0$
2	0,40	0,35	$50,02 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
3	0,35	0,30	$50 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-6}$	
4	0,40	0,35	$50,02 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	
5	0,60	0,50	$50 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-6}$	
6	0,35	0,30	$50 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$\Delta R_u = 0,01 \cdot t_f, \Delta r = 120 \cdot t_{f1},$ $\Delta A_y = 140 \cdot \Delta t_{f1}, \quad \Delta R_t = 0,$ $\Delta R_y = 0, \Delta r_t = 0, \Delta r_y = 0$
7	0,40	0,35	$50,02 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	
8	0,35	0,30	$50 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-6}$	
9	0,40	0,35	$50,02 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	
10	0,60	0,50	$50 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-6}$	

5.3. Вопросы для контроля знаний

1. С какой целью выполняется анализ баланса перемещений в технологической системе?
2. Можно ли прогнозировать результаты обработки поверхности без анализа баланса перемещений в технологической системе?
3. На что расходуется подача при шлифовании?
4. Каким методом решается разностное уравнение перемещений при анализе процессов шлифования?
5. Можно ли рассчитать параметры качества при механической обработке без анализа баланса перемещений?
6. Можно ли представить уравнение баланса в виде дифференциального уравнения?
7. Как можно записать уравнение баланса для таких методов обработки как точение и фрезерование?

Практическое занятие № 6

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ СЪЕМА МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ КОНТАКТА ЗАГОТОВКИ С КРУГОМ

(Продолжительность выполнения – 4 часа)

Цель занятия: исследовать закономерности съема материала в зоне контакта заготовки с инструментом, предложить динамические модели изменения размеров обрабатываемой поверхности

6.1. Основные теоретические положения и варианты заданий

Для процессов абразивной обработки заготовок вероятность удаления материала вычисляется по зависимости

$$P(M) = 1 - P_0(\overline{M}) \cdot P(\overline{M}), \quad (6.1)$$

где $P_0(\overline{M})$ – вероятность неудаления материала на заданном уровне на предшествующих операциях; $P(\overline{M})$ – вероятность неудаления материала на выполняемой операции, вычисляется для многопроходного процесса шлифования по зависимости

$$P(\overline{M}) = e^{-a_1 - a_2 - \dots - a_{j-1} - a_j(y)}, \quad (6.2)$$

где a_1, a_2, a_{j-1} – показатели, определяющие изменение вероятности съема материала после первого, второго, $j-1$ -го контакта; $a_j(y)$ – показатель, определяющий изменение вероятности неудаления материала на уровне y при $j-1$ -м контакте поверхности с инструментом.

Если вершину абразивного зерна представить в виде параболоида вращения, а распределение зерен в рабочем слое по глубине смоделировать степенной зависимостью, то при частных значениях коэффициентов уравнения для расчета a_{j-1} и $a_j(y)$, будут иметь вид

$$a_j = \frac{2\pi K_c \sqrt{2\rho_3 D_3} (v_k \pm v_u) n_3}{5v_u H_u^{3/2}} (t_f - y)^{5/2},$$
$$a_j(y, z) = \frac{3\pi K_c \sqrt{2\rho_3} (v_k \pm v_u) n_3 (t_f - y)^2}{8v_u H_u^{3/2}} \left(z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right), \quad (6.3)$$

где a_j – значение показателя на уровне y после j -го контакта поверхности с инструментом; $a_j(y, z)$ – значение показателя на уровне y при j -м контакте при расстоянии z от основной плоскости до рассматриваемого сечения; ρ_3 – радиус закругления при вершине зерна; K_c – коэффициент стружкообразования; v_k, v_u – скорость круга и детали соответственно; n_3 – число зерен на единице рабочей поверхности круга; t_f – фактическая

глубина резания; H_u – глубина слоя поверхности круга, в пределах которой подсчитывается n_3 ; L_y – расстояние от основной плоскости до точки пересечения уровня y с условной наружной поверхностью инструмента;

$$D_3 = \frac{D \cdot d}{D + d}; \quad L_y = \sqrt{(t_f - y) \cdot D_3}.$$

6.2. Последовательность и варианты выполнения работы

При выполнении практической работы необходимо:

1. Построить схему процесса шлифования, позволяющую проследить вывод зависимости (6.3), особое внимание следует уделить назначению системы координат системы.

2. Дать пояснения хода вывода зависимости (6.3).

3. Просчитать для заданного преподавателем варианта вероятности удаления и неудаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом.

4. Построить графики полученных зависимостей.

5. Сделать выводы, оформить отчет.

Варианты выполнения работы приводятся в таблице.

№ варианта	Значения переменных				
	ρ_3	D	d	n_3	t_f
1	$20 \cdot 10^{-6}$	0,30	0,05	$5,2 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^{-6}$
2	$10 \cdot 10^{-6}$	0,40	0,10	$20 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-6}$
3	$20 \cdot 10^{-6}$	0,30	0,05	$5,2 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^{-6}$
4	$10 \cdot 10^{-6}$	0,30	0,05	$20 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^{-6}$
5	$10 \cdot 10^{-6}$	0,30	0,05	$20 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^{-6}$
6	$20 \cdot 10^{-6}$	0,60	0,10	$5,2 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^{-6}$

При расчетах принять $v_k = 35$ м/с; $v_u = 0,25$ м/с.

6.3. Вопросы для контроля знаний

1. Какие факторы влияют на вероятность съема материала?

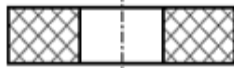
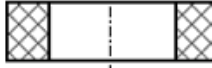
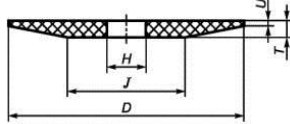
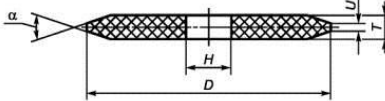
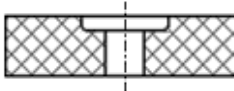
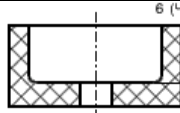
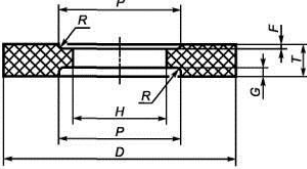
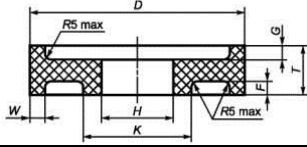
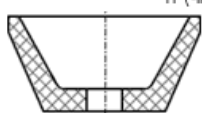
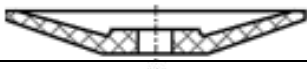
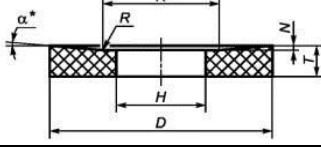
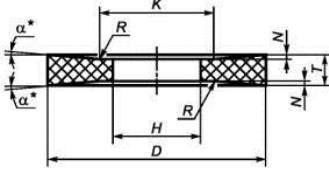
2. Как рассчитать вероятность удаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом?

3. Изменяется ли вероятность удаления материала на заданном уровне при изменении числа контактов заготовки с инструментом?

Список использованных источников

1. Основы теории резания материалов [текст]: учебник для вузов / Ю.К. Новосёлов, Н.П. Мазур, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Залого, Ф.Я. Якубов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – 534 с.
2. Новосёлов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке [текст] / Ю.К. Новосёлов. – Севастополь: Издательство СевНТУ, 2012. – 304 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – Т.2. – 496 с.
4. Режущий инструмент: учебник для вузов / С.В. Кирсанов [и др.]. – 2-е изд. доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 528 с.
5. ГОСТ Р 52381-2005 (ИСО 8486-1:1996, ИСО 6344-2:1998, ИСО 9138:1993, ИСО 9284:1992) Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава.
6. ГОСТ Р 52587-2006 Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости.

Приложение А

1	прямого профиля	
2	кольцевые	
3	с коническим профилем	
4	с двусторонним коническим профилем	
5	с выточкой	
6	чашечные цилиндрические	
7	с двусторонней выточкой	
10	с двусторонней выточкой и ступицей	
11	чашечные конические	
12,14	тарельчатые	
20	с выборкой	
21	с двусторонней выборкой	

22	с выборкой и выточкой	
23	с выборкой и выточкой на одной стороне	
24	с выборкой и выточкой на одной стороне и с выточкой на другой стороне	
25	с выборкой и выточкой на одной стороне и выборкой на другой стороне	
26	с выборкой и выточкой на обеих сторонах	
35	торцовый прямого профиля	
36	прямого профиля с запрессованными крепежными элементами	
37	кольцевой с запрессованными крепежными элементами	
38	с односторонней ступицей	
39	с двусторонней ступицей	

**ДИНАМИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

*Методические указания
к выполнению практических работ
для студентов направления 15.04.05
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»*

Составители: **Новоселов** Юрий Константинович,
Сазонов Сергей Евгеньевич

Редактор - О.В. Дмитриева

Зак. 82/17. Объем 2 п.л. Усл. печ. л. 1,86. Уч. изд. л.1,96.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»