



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Ка ф е д р а «Технология машиностроения»

А.В. ШИРОКОВ

А.П. ОСИПОВ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

Самара
Самарский государственный технический университет
2016

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.923
ББК 34.637
Г 12

Широков А.В.

Г 12 Повышение эффективности Шлифования заготовок на основе имитационного моделирования процесса формирования шероховатости поверхности: монография / *А.В. Широков, А.П. Осипов.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 144 с.

ISBN 978-5-7964-1955-7

Приведено решение комплекса задач, связанных с повышением эффективности шлифования поверхностей деталей машин. Особое внимание уделено технологическому обеспечению снижения брака из-за появления на шлифованной поверхности рисков-царапин.

Рассматриваются методы математического, в том числе имитационного, моделирования процессов образования рисков-царапин, формообразования шлифованной поверхности, методы расчета параметров шероховатости. Предлагаются: метод оптимизации шлифования в соответствии с требованием отсутствия рисков-царапин и экологичный метод очистки рабочей поверхности шлифовального круга, позволяющий повысить эффективность как научных исследований, так и технологического процесса обработки.

Предназначено для инженеров-технологов, научных работников, аспирантов, преподавателей, студентов и специалистов предприятий в области металлообработки.

Материалы монографии могут быть использованы при изучении таких дисциплин, как «Основы технологии машиностроения», «Технология машиностроения», «Теория резания», «Резущий инструмент», «Инструментальное обеспечение автоматизированного производства» и ряда других.

УДК 621.923
ББК 34.637
Г 12

Рецензенты зав. кафедрой общетехнических дисциплин филиала
 ВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Сызрани канд. техн. наук,
 доцент *В.Я. Судаков*

технический директор ЗАО «КАРДАН» *А.Ю. Полубанов*

ISBN 978-5-7964-1955-7

© А.В. Широков, А.П. Осипов,
2016
© Самарский государственный
технический университет, 2016

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЗ	– абразивное зерно;
НС	– наружный слой – часть шлифовального круга, ограниченная поверхностью вершин зёрен и поверхностью, эквидистантной ей;
ПС	– поверхностный слой – НС глубиной d_{\max} . Параметр d_{\max} равен наибольшему размеру зерна в объёме круга;
РВ	– резцовая вставка;
РП	– рабочая поверхность;
РС	– рабочий слой – НС глубиной $h_{\text{РС}}$. Параметр $h_{\text{РС}}$ равен расстоянию между поверхностью вершин и поверхностью впадин РП круга;
РЧ	– рабочая часть;
ТП	– технологический процесс;
ШК	– шлифовальный круг;
A	– амплитуда колебаний ШК, мм;
a_j	– глубина внедрения j -го зерна в материал заготовки в рассматриваемом поперечном сечении, мкм;
a_{\max}	– максимальная глубина внедрения зерна в материал заготовки в рассматриваемом поперечном сечении, мкм; $a_{\max} = \max\{a_j\}$;
b и v	– параметры аппроксимации РЧ зерна параболоидом вращения;
d_{\max}	– наибольший размер АЗ в объёме ШК, мм;
$d_{\text{ср}}$	– средний размер АЗ в объёме ШК, мм;
d_{\min}	– наименьший размер АЗ в объёме ШК, мм;
d_0	– размер зерна, соответствующий номеру зернистости по ГОСТ 3647–80, мкм;
C_y	– номер структуры ШК;
$H_{\text{кр}}$	– высота ШК, мм;
$h_{\text{РС}}$	– глубина РС, мм;
$h_{\text{еф}j}$	– линейный износ РЧ j -го зерна, мм;
$h_{i\max}$	– максимальная высота навалов, образующихся по краям шлифовочной канавки, в данном сечении заготовки, мкм;
$h_{\text{ц}}$	– высота царапины, мкм;
L	– длина, на которой оцениваются значения параметров шероховатости (ГОСТ 25142–82), мм.
N	– зернистость ШК (ГОСТ 3647–80);
$N_{\text{НС}}$	– число зёрен в НС, шт.;
$N_{\text{РС}}$	– число зёрен в РС, шт.;
$n_{\text{АМ}}$	– число зёрен в единице массы абразива, шт./г;
R_3	– радиус заготовки, мм;
$R_{\text{крн}}$	– радиус ШК после правки, мм;

- $R_{кр}$ – радиус ШК перед рабочим ходом, мм;
 S_o – продольная подача ШК на 1 оборот заготовки, мм/об;
 S_m – скорость продольной подачи ШК, мм/мин;
 t – глубина шлифования за рабочий ход, мм;
 u – радиальный износ ШК, мм;
 $V_{кр}$ – окружная скорость ШК, мм/с;
 $V_з$ – скорость заготовки, мм/с;
 $y_{юj}(z')$ – микропрофиль поверхности после прохода j -го зерна через рассматриваемое поперечное сечение заготовки;
 $y_{\partial zj}(z')$ – уравнение контура РЧ зерна в рассматриваемом поперечном сечении заготовки;
 ρ_{AM} – плотность абразивного материала, г/мм³;
 γ и η – параметры закона β -распределения вершин неровностей РП круга по глубине;
 θ_0 – начальная фаза колебаний ШК, рад;
 ω_k – частота колебаний ШК, рад/с;
 $\omega_{кр}$ – угловая скорость ШК, рад/с;
 $\omega_з$ – угловая скорость заготовки, рад/с;

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. Состояние вопроса о моделировании процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности. Цель и задачи исследования.....	13
1.1 Анализ моделей рабочей части абразивного зерна.....	13
1.2 Современное состояние проблемы моделирования рабочей поверхности шлифовального круга.....	17
1.3 Анализ моделей формообразования единичной абразивной царапины.....	31
1.4 Анализ моделей процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности.....	36
1.5 Выводы и результаты.....	56
2. Теоретические основы имитационного моделирования процесса формирования поперечного микропрофиля детали при различных видах шлифования.....	
2.1 Моделирование процесса формирования поперечного микропрофиля детали.....	
2.2 Кинематическая модель процесса плоского шлифования.....	
2.3 Кинематическая модель процесса круглого шлифования.....	
2.4 Моделирование рабочего слоя шлифовального круга.....	
2.5 Определение закона распределения вершин неровностей рабочей поверхности шлифовального круга по глубине.....	
2.6 Алгоритмы реализации полученных моделей на ЭВМ.....	
2.6.1 Алгоритм реализации модели рабочего слоя шлифовального круга.....	
2.6.2 Алгоритм реализации кинематической модели процесса плоского шлифования.....	
2.6.3 Алгоритм реализации кинематической модели процесса круглого шлифования.....	
2.6.4 Алгоритм реализации модели процесса формирования поперечного микропрофиля детали.....	
2.7 Выводы и результаты.....	
3. Моделирование процесса формирования профиля единичной царапины.....	
3.1 Разработка модели процесса формирования поперечного профиля единичной царапины.....	
3.2 Анализ влияния параметров микрорезания на высоту навалов и высоту абразивной царапины.....	
3.3 Выводы и результаты.....	
4. Экспериментальные исследования процесса формирования единичной царапины и шероховатости шлифованной поверхности.....	
4.1 Экспериментальные исследования процесса формирования единичной абразивной царапины.....	

4.2	Теоретико-экспериментальные исследования процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности.....
4.3	Сопоставление теоретических и экспериментальных значений параметров шероховатости для различных видов шлифования.....
4.4	Выводы и результаты.....
5.	Внедрение результатов исследований в производстве.....
5.1	Применение разработанного комплекса математических моделей для решения проблемы формирования шероховатости шлифованной поверхности конкретной детали.....
5.2	Экономическая эффективность результатов проведённых теоретико-экспериментальных исследований проблемы формирования шероховатости конкретной детали.....
5.3	Способ очистки рабочей поверхности шлифовального круга.....
5.4.	Выводы и результаты.....
6.	Основные выводы и результаты исследования.....
	Приложение 1. Геометрические параметры резцовой вставки №1.....
	Приложение 2. Геометрические параметры резцовой вставки №2.....
	Приложение 3. Геометрические параметры резцовой вставки №3.....
	Приложение 4. Геометрические параметры резцовой вставки №4.....
	Приложение 5. Геометрические параметры резцовой вставки №5.....
	Приложение 6. Геометрические параметры резцовой вставки №6.....
	Приложение 7. Характеристики зёрен различных шлифовальных материалов.....
	Приложение 8. Объёмное содержание зёрен, связки и пор в кругах различной структуры и твёрдости.....
	Приложение 9. Области применения абразивных инструментов с разными номерами структур.....
	Приложение 10. Рекомендуемые режимы алмазной правки шлифовальных кругов методом обтачивания.....
	Приложение 11. Блок-схема алгоритма моделирования рабочего слоя шлифовального круга.....
	Приложение 12. Блок-схема алгоритма реализации кинематической модели плоского шлифования.....
	Приложение 13. Блок-схема алгоритма реализации кинематической модели круглого шлифования.....
	Приложение 14. Блок-схема алгоритма реализации модели процесса формирования поперечного микропрофиля детали.....
	Приложение 15. Характеристики рельефа исследованных кругов
	Приложение 16. Блок-схема алгоритма обеспечения требуемой шероховатости шлифованной поверхности с учётом отсутствия дефектов в виде абразивных царапин.....
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства деталей, определяющие надежность машин, такие как прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, контактная жёсткость, зависят от точности изготовления деталей машин и состояния их поверхностных слоёв [14, 77, 79].

Одной из основных характеристик качества поверхности является шероховатость. В большинстве случаев требования к ней устанавливают, используя определённое соотношение между значениями параметров шероховатости и точностью размеров соответствующих элементов детали [2]. В ряде случаев к шероховатости предъявляют весьма высокие требования. Это относится, например, к поверхностям, работающим в условиях трения и изнашивания [14].

Одним из методов повышения эксплуатационных показателей деталей машин является нанесение на поверхности, работающие в условиях трения, износостойких покрытий из различных материалов, в частности, хрома. Перед нанесением износостойких покрытий такие поверхности обычно подвергают шлифованию [6, 39]. При этом часто недопустимо появление дефектов в виде абразивных царапин, которые снижают адгезионные свойства шлифованной поверхности и могут привести к отслаиванию покрытия в области царапины. Такие дефекты на практике устраняют на последующих операциях доводки и полирования, что значительно увеличивает трудоёмкость и себестоимость изготовления деталей, а также может сопровождаться потерей точности размеров и формы поверхностей. В тоже время при рациональном выборе условий шлифования можно минимизировать или полностью исключить дефекты в виде абразивных царапин и существенно сократить трудоёмкость доводочных операций. В производственных условиях данную задачу решают в основном эмпирическим путём.

Следует отметить, что общие для различных отраслей машиностроения технологические рекомендации по выбору характеристики абразивного круга и режимов шлифования, которые содержатся в справочной литературе [48, 61, 72 и др.], касаются обеспечения лишь требуемой шероховатости по параметрам Ra и Rz . Следуя этим рекомендациям, не всегда удаётся обеспечить отсутствие дефектов в виде абразивных царапин. То же самое можно сказать о существующих математических моделях процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности, в частности имитационных.

Проблема обеспечения требуемых параметров шероховатости шлифованной поверхности с одновременным отсутствием дефектов в виде абразивных царапин до сих пор не решена и по-прежнему актуальна.

Представленные в настоящей работе исследования проводились при финансовой поддержке в форме гранта ГОУ ВПО «СамГТУ» для аспирантов (2008 г.), а также при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках тематического плана ФГБОУ ВПО «СамГТУ», номер государственной регистрации НИР №01201156078 от 05.04.11 «Исследование процесса контактного взаимодействия поверхностей нерегулярного профиля».

Авторы ставили целью технологическим путем обеспечить требуемую шероховатости поверхностей при шлифовании заготовок, используя имитационное моделирование процесса формирования поперечного микропрофиля шлифованной поверхности детали.

В настоящем исследовании были решены следующие **задачи**:

1) проведён анализ состояния исследований формирования шероховатости поверхностей заготовок при шлифовании;

2) разработана имитационная модель формирования шероховатости поверхности с учётом разновысотности вершин зёрен на рабочей поверхности шлифовального круга;

3) проведены теоретические исследования формирования микропрофиля при микрорезании единичным абразивным зерном;

4) проведены экспериментальные исследования процесса формирования микропрофиля единичной абразивной царапины и микропрофиля всей шлифованной поверхности;

5) проведена опытно-промышленная проверка и дана оценка экономической эффективности внедрения разработанного комплекса математических моделей на примере шлифования заготовок конкретной детали;

6) даны научно-обоснованные рекомендации по достижению требуемой шероховатости шлифованной поверхности с отсутствием дефектов в виде абразивных царапин.

Объектом исследования является процесс контактного взаимодействия шлифовального круга с заготовкой, предметом исследования – процесс формирования шероховатости шлифованной поверхности.

Теоретические исследования базируются на методах теории резания, теории вероятностей и математической статистике. В ходе теоретических и теоретико-экспериментальных исследований процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности применяли аналитическое и имитационное модели-

рование. Теоретико-экспериментальные исследования проводили в системе MathCAD. Для экспериментального исследования топографии рабочих поверхностей шлифовальных кругов и микропрофилей поверхностей деталей применяли метод профилографирования.

Работа базируется на результатах исследований А.К. Байкалова, С.Г. Бишутина, В.С. Булошникова, О.А. Горленко, Ю.М. Зубарева, Г.М. Ипполитова, А.В. Королёва, С.Н. Корчака, Г.Б. Лурье, Е.Н. Маслова, И.П. Никифорова, Ю.К. Новосёлова, Н.В. Носова, А.П. Осипова, В.И. Островского, В.М. Оробинского, С.А. Попова, В.А. Прилуцкого, А.Н. Резникова, Э.В. Рыжова, Д.Л. Скуратова, В.К. Старкова, Ю.С. Степанова, В.Н. Трусова, А.Н. Унянина, Л.Н. Филимонова, Л.В. Худобина, R.L. Hecker, C. Guo, S.Y. Liang, S. Malkin, F. Xi, X. Zhou и др.

Авторы надеются, что разработанные математические модели пригодятся исследователям процесса шлифования в их научных изысканиях, а научно-обоснованные рекомендации по выбору характеристик шлифовального круга и режимов обработки в зависимости от требуемого значения параметра Ra с учётом отсутствия абразивных царапин на поверхности детали будут полезны специалистам-шлифовщикам.

Кроме того, материал данной работы может быть использован в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в рамках дисциплин «Режущий инструмент», «Основы технологии машиностроения», «Технология машиностроения» и др.

Авторы благодарят профессора СамГТУ Н.В. Носова за помощь в научных исследованиях, за ценные советы при подготовке рукописи, студентов механического факультета Сызранского филиала СамГТУ, которые принимали самое активное участие в проведении экспериментов, а также АО «Тяжмаш» в лице сотрудников, помогавших превратить теоретические знания в практические рекомендации.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно достаточно много работ [4, 16, 21, 83, 101 и др.], посвящённых изучению процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности. Авторы этих работ в основном применяют метод математического моделирования. Однако следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют общепринятые и широко распространённые математические модели указанного процесса, позволяющие с достаточной степенью точности определять параметры шероховатости обработанных поверхностей.

Шлифованная поверхность представляет собой совокупность царапин, которые образуются при взаимодействии зёрен РП инструмента с обрабатываемым материалом. В связи с этим модель процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности зачастую связана с моделями формообразования единичной царапины, РП круга и РЧ зерна. Без их анализа невозможно получить достаточно полное представление о существующей проблеме определения параметров шероховатости шлифованной поверхности.

Таким образом, целью данной главы является анализ математических моделей РЧ зерна, РП круга, моделей формообразования единичной абразивной царапины, их связи друг с другом и с известными моделями процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности.

1.1 Анализ моделей рабочей части абразивного зерна

Наиболее распространёнными моделями РЧ зерна является сферический сегмент (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, а) и конус с округлённой вершиной (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, б) [4, 22, 35, 44, 83 и др.]. Первая модель описывается одним математическим уравнением и одним параметром – радиусом сферы. Вторая модель характеризуется двумя уравнениями, описывающими сферическую и коническую часть, и двумя параметрами – радиусом округления вершины ρ и углом при вершине конуса ϵ . В работе [4] модель РЧ зерна в виде конуса с округлённой вершиной учитывает её износ u в процессе микрорезания, приводящий к увеличению радиуса ρ .

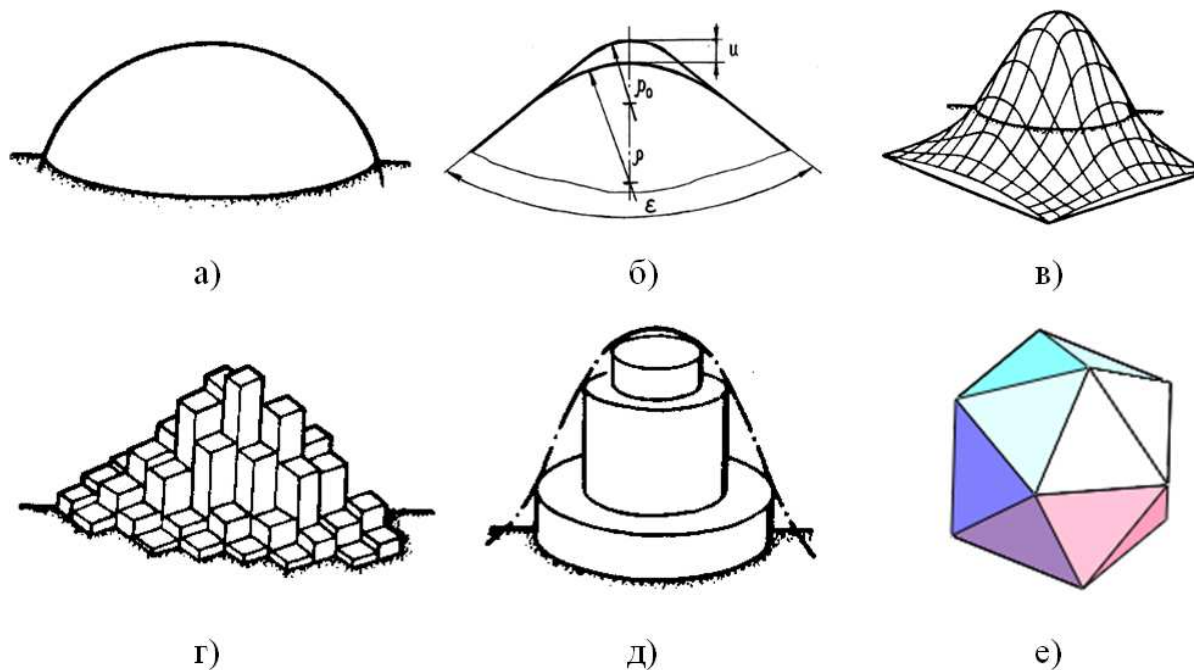


Рис. 1. Модели РЧ зерна

а – сфера; б – конус с округлённой вершиной [4, 35, 83]; в – параболоид вращения [28, 50] или поверхность нормального распределения; г – совокупность призм [54,74]; д – совокупность цилиндров [54,74]; е – пирамида или их совокупность [40, 41]

По мнению ряда авторов [54, 75], аппроксимирование РЧ зерна сферой или конусом с округлённой вершиной является достаточно условным. Лучшее приближение даёт аппроксимация в виде параболоида вращения [28, 42, 50] (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, в и **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Уравнение образующей параболоида имеет вид степенной функции

$$x = b \cdot y^v$$

В зависимости от значений параметра аппроксимации v параболоид вращения может принимать форму цилиндра (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, а) или конуса (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, з), а также форму, приближающуюся к сферическому сегменту (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, в).

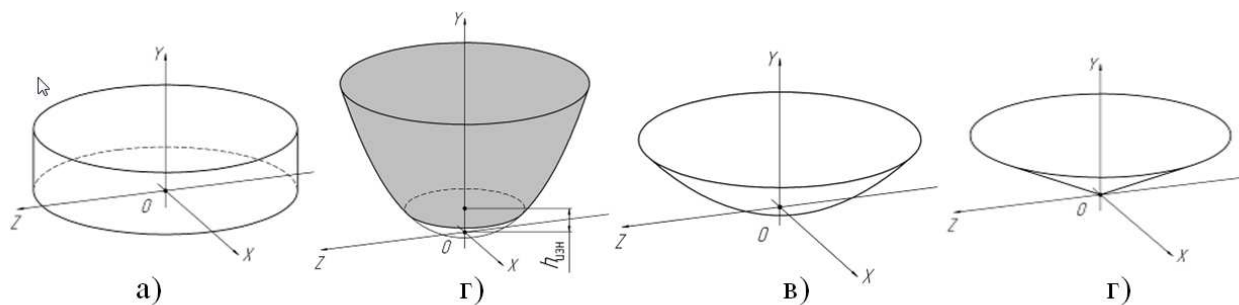


Рис. 2. Модели РЧ зерна в виде параболоида вращения [28, 50]

$$a - v = 0; \quad b - v = 0,4; \quad в - v = 0,5; \quad r - v = 1$$

В работах [28, 50] модели РЧ зерна изменяют свою форму по мере износа. В работе А.С. Корниенко [28] износ РЧ зерна проявляется в изменении параметров образующей параболоида b и v . В работе А.П. Осипова [50] износ РЧ зерна характеризует соответствующий параметр $h_{\text{изн}}$ (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, б). Параметры образующей параболоида остаются постоянными.

Модель РЧ зерна можно представить в виде совокупности геометрических фигур – призм (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, з), цилиндров (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, д) и пирамид (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, е). По мнению С.А. Попова [54] такая аппроксимация является наиболее близкой к реальной форме РЧ зерна. Следует отметить, что такие модели можно описать только системой математических уравнений.

В результате анализа различных моделей РЧ зерна можно выделить следующие их достоинства и недостатки.

1. Аппроксимирование РЧ зерна сферой является наиболее простым с точки зрения математического описания, поскольку такая модель характеризуется всего лишь одним параметром – радиусом. Однако такая модель не учитывает многообразия форм рабочих частей реальных зёрен. Примером могут служить рабочие части АЗ, у которых отношение глубины внедрения a к ширине b значительно больше, чем при внедрении аппроксимирующей сферы.

2. Модель в виде конуса с округленной вершиной состоит из двух частей: сферической и конической. Методика определения радиуса сферы r и угла при вершине конуса ε субъективна, что вносит значительную погрешность в результаты прогнозирования параметров шероховатости шлифованной поверхности.

3. Наиболее близкой к реальной форме РЧ зерна является её представление в виде совокупности геометрических фигур, но при этом усложняется задача математического описания соответствующих моделей. Это влечёт за собой сложности в моделировании формирования единичной царапины и шероховатости всей шлифованной поверхности. В зависимости от ориентации моделей РЧ зерна в пространстве (ориентация ребром или гранью вперед (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, з, е)), степени их износа и глубины внедрения в обрабатываемый материал изменяются условия стружкообразования и пластического деформирования.

По мнению А.К. Байкалова [3], получение РЧ зерна эквивалентной формы не преследует цель получить форму ради формы, а служит задачам моделирования самого процесса шлифования. Исходя из этого, модель РЧ зерна должна позволять математическое описание процесса шлифования.

На наш взгляд, лучшей моделью РЧ зерна для последующего моделирования единичной абразивной царапины и РП круга является параболоид в силу следующих преимуществ:

1) описывается достаточно простым математическим уравнением $x = b \cdot y^v$;

2) в частных случаях может принимать форму различных геометрических фигур (цилиндр, сферический сегмент, конус) и охватывает ряд существующих моделей РЧ зерна;

3) параметры параболоида b и v определяются однозначно в отличие от параметров конуса с округлённой вершиной;

4) ориентация параболоида относительно собственной оси не меняет условия стружкообразования.

К указанным преимуществам следует добавить то, что с помощью степенных функций описывают РП круга – относительные опорные кривые [22, 54] и кривые распределения вершин зёрен по глубине ПС [3, 29, 42]. Поскольку рабочие части зёрен входят в состав РП круга, логично использовать для их описания степенные функции.

1.2 Современное состояние проблемы моделирования рабочей поверхности шлифовального круга

Г.М. Ипполитов [20] рассматривал модель ПС, в которой зерна расположены на разном расстоянии от поверхности, а степень разновысотности зависит от характеристик ШК и способов правки. Так как зерна расположены на разной высоте, то подсчитать их невозможно, поэтому автор предлагает достаточно приближительную методику подсчета по единице веса или по единице объема. Число зерен, содержащихся в единице объема (i), рассчитывается по формуле:

$$i = \frac{\pi \cdot (D_{кр}^2 - d^2) \cdot H_{кр} \cdot k \cdot \gamma_{кр} \cdot n_{АМ}}{4},$$

где $D_{кр}$, d , $H_{кр}$ – соответственно наружный, внутренний диаметр и высота ШК, мм; k – коэффициент, учитывающий массовую долю зёрен в ШК ($k = 0,8 \dots 0,9$); $\gamma_{кр}$ – объёмный вес ШК, г/мм³; $n_{АМ}$ – количество зерен в 1 г абразивного материала, шт./г.

Число зерен, находящихся в ПС, равно по высоте размеру зерна d_0 :

$$i_{p,n} = \pi \cdot D_{кр} \cdot H_{кр} \cdot d_0 \cdot k \cdot \gamma_k \cdot n_{AM}.$$

В работе [33] С.Н. Корчак моделировал рабочие части зерен не в виде сфероидов, а площадками затупления, которые могут принимать сфероидальный вид. Автор привёл масштабную модель-схему, в которой структура ПС имеет ряд допущений: зерна на РП круга располагаются равномерно как по его ширине, так и по цилиндрической части. На основе анализа количества резцов, произведенных зернами ШК, автор приходит к выводу, что при хаотически расположенных зернах размеры среза колеблются около значений, полученных в масштабной модели.

Е.Н. Маслов в своей работе [37] предлагает рассматривать модель РП круга как беспорядочно расположенные зёрна в виде мельчайших «островков», окружённых связкой, которые создают прерывистую режущую кромку и обеспечивают разновысотность зерен (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). В тоже время он отмечает, что при качественном изготовлении кругов зёрна равномерно распределены по всему ПС со средним расстоянием:

$$l_{cp} = \sqrt[3]{\frac{1}{n}},$$

где n – число зерен в 1 мм^3 режущего слоя круга.

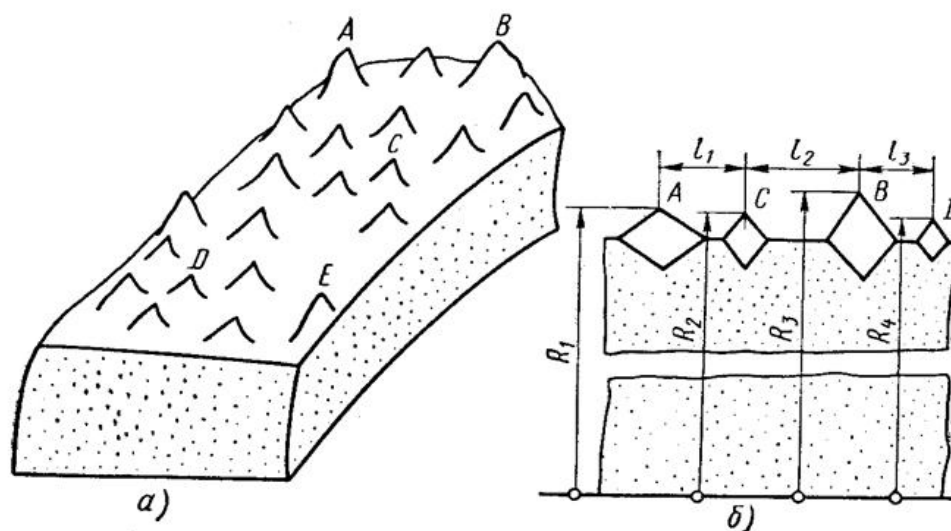


Рис. 3. Схемы расположения шлифующих зёрен на рабочей поверхности ШК [37]

а – беспорядочное; б – разновысотное; А, В, ..., Е – вершины отдельных зёрен; R_1, \dots, R_4 – расстояния от оси круга до вершин зёрен; l_1, \dots, l_3 – расстояния между вершинами зёрен

Взяв типовые соотношения объемов, автор считает, что среднее расстояние между зёрнами в ШК есть величина постоянная

$$l_{cp} = \sqrt[3]{\frac{100000}{(62 - 2 \cdot C_y) \cdot \rho_{AM} \cdot n_{AM}}}, \quad (1)$$

где ρ_{AM} – плотность абразивного материала, кг/м³, C_y – номер структуры ШК, n_{AM} – число зерен в 1 г абразива, шт. На основании анализа формулы (1), Е.Н. Маслов делает вывод, что на величину l_{cp} главным образом влияет зернистость и не влияет номер структуры.

В.И. Островский [52] рассматривал ПС абразивного круга в двух перпендикулярных направлениях: окружное и радиальное. Величина шага между зернами в окружном направлении рассматривается в зависимости от формы зерен и размеров мостика связки и рассчитывается по формуле:

$$\delta = K_{\delta} \cdot d_0 \cdot \left(\frac{d_c}{y}\right)^n,$$

где K_{δ} – коэффициент, зависящий от характеристик ШК; d_3 – размер АЗ, мкм; y – расстояние от наиболее выступающего зерна, измеренного по нормали к кругу, мкм; n – показатель степени ($n = 0,5 \dots 2$).

А.Н. Резников [1, 62] при моделировании РП алмазных кругов в своих работах исходил из законов случайного распределения зёрен эллипсоидной формы в ПС. Он принимал равномерное распределение зёрен в объёме ШК и нормальное распределение их размеров.

В связи с этим число зёрен в единице объёма алмазного слоя круга

$$n_w = \frac{3 \cdot K}{200 \cdot \pi \cdot \alpha_{ш} \cdot d_{cp} \cdot (d_{cp}^2 + 3 \cdot \sigma^2)},$$

где K – концентрация алмазов в ШК, %; d_{cp} и σ – генеральное среднее и среднее квадратичное отклонение размеров зёрен в круге, мм; $\alpha_{ш}$ – отношение фактического объёма $w(x)$ зерна с наибольшей диагональю x и объёма шара $w_{ш}(x)$, описанного вокруг зерна.

Для расчёта количества зёрен n_0 , располагающихся на единице площади РП, автор определял вероятность её пересечения зёрнами ШК. Для упрощения расчётов А.Н. Резников принимал три вида расположения зёрен по высоте ал-

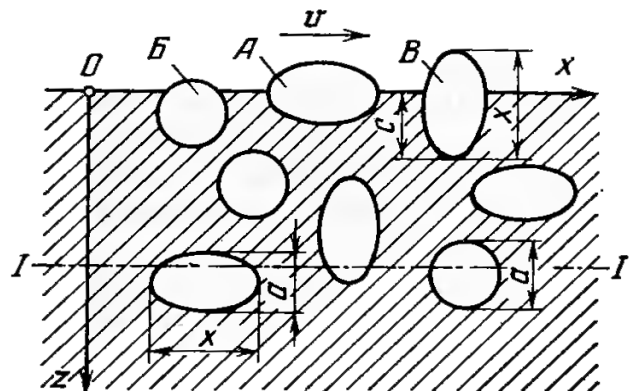


Рис. 4. Схематизация расположения зёрен в поверхностном слое ШК [1, 62]

мазоносного слоя (рис. 4): параллельно оси x (тип А), параллельно оси y (тип Б) и параллельно оси z (тип В). В связи с этим

$$n_0 = \frac{(2 \cdot \alpha_0 + 1) \cdot K}{200 \cdot \pi \cdot \alpha_{\text{ш}} \cdot (d_{\text{cp}}^2 + 3 \cdot \sigma^2)},$$

где $\alpha_0 = \sqrt{\alpha_{\phi}}$ – соотношение между площадями сечения АЗ и площадью круга, проведённый через наибольший размер этого сечения, как через диаметр ($\alpha_0 \approx 0,5 \dots 0,6$).

Принимая нормальный закон распределения вершин зёрен по глубине РП, А.Н. Резников предлагает следующую формулу для расчёта количества режущих зёрен с учётом их потерь из-за шлифования и правки:

$$n_p = n_0 \cdot (1 - \epsilon_k) \cdot m,$$

где ϵ_k – относительная критическая глубина заделки АЗ ($\epsilon_k = 0,2 \dots 0,7$); m – доля зёрен РП, участвующих в резании

$$m \approx 0,5 \{ 1 - \Phi[4,24 \cdot (\frac{t}{\Delta_{\text{max}}} - 0,35)] \},$$

где Δ_{max} – расстояние от вершины наиболее выступающего зерна до уровня связки. Согласно А.Н. Резникову

$$\Delta_{\text{max}} = (1 - \epsilon_1) \cdot (d_{\text{cp}} + 3 \cdot \sigma).$$

Исследованию рельефа РП круга посвящены работы С.А. Попова [54 –

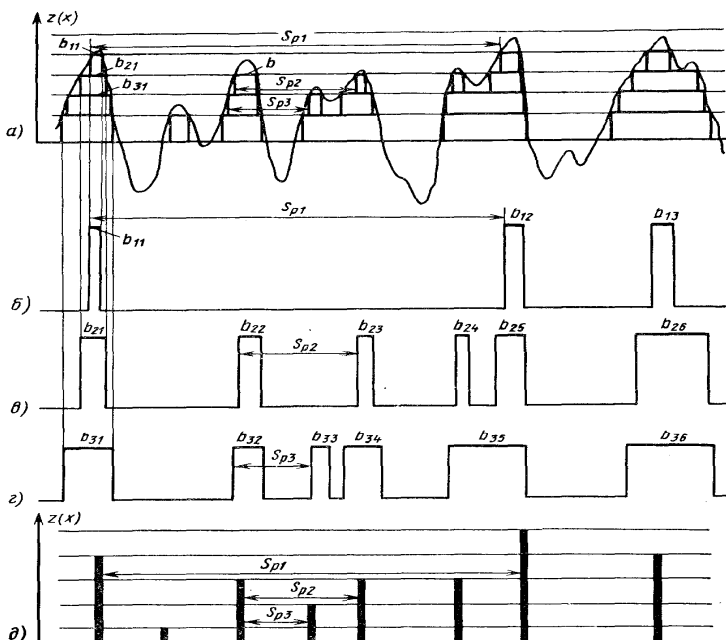


Рис. 5. Профиль рельефа абразивной поверхности (а) и его аппроксимация элементарными профилями совокупности прямоугольных профилей (б, в, з) и совокупности нулевых импульсов со случайной высотой (д) [54]

56]. Он считает, что высота рельефа в отдельных точках ПС является случайной функцией двух координат выбранной точки плоскости, касательной к номинальной поверхности ШК. Статистические параметры случайного однородного поля зависят от зернистости, пористости и толщины слоя, связующего отдельные зерна между собой.

Случайную непрерывную функцию профиля С.А. Попов заменяет профилем, составленным из кусочков ломаной прямой (рис. 5, а). При такой ап-

проксимации профиля при изменении фиксированного уровня меняются размеры оснований прямоугольных профилей, их количество и интервалы между ними в пределах базовой длины (рис. 5, б – з).

Аппроксимация профиля может быть также в виде последовательности импульсов, у которых размер основания прямоугольника равен нулю (рис. 5, д). При такой аппроксимации сохраняются только некоторые вероятностные характеристики профиля, связанные с количеством неровностей в пределах базовой длины и с интервалами между ними.

С.А. Попов проводил экспериментальные исследования РП с помощью метода профилографирования, определяя при этом относительные опорные длины, средний шаг между неровностями и количество вершин зёрен на разных уровнях профиля.

Согласно результатам эго экспериментальных исследований значение измеренного среднего между активными элементами зёрен, расположенных на верхних уровнях рельефа, в 5 – 10 раз больше тех значений, которые приводятся некоторыми исследователями, отождествляющими расположение зёрен в объёме матрицы с расположением зёрен на РП круга.

А.В. Королёв [29 – 31] полагает, что положение произвольного АЗ размером d над уровнем связки равновероятное (рис. 6). Оси прямоугольной системы координат автор располагает следующим образом: ось y – вдоль средней линии профиля неровностей связки, а ось x – перпендикулярно к РП круга. Если U_d – расстояние выступа АЗ до уровня связки, то плотность вероятности этой величины определяется формулой

$$f(U_d) = \begin{cases} \frac{1}{d}, 0 \leq U_d \leq d; \\ 0, 0 > U_d > d. \end{cases}$$

Рассеивание диаметральных размеров зёрен подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием d_0 и средним квадратичным отклонением σ_d . Средний размер АЗ d_0 соответствует номеру зернистости абразива. Параметр σ_d в большинстве случаев связан с d_0 следующим соотношением $\sigma_d = 0,333 \cdot d_0$.

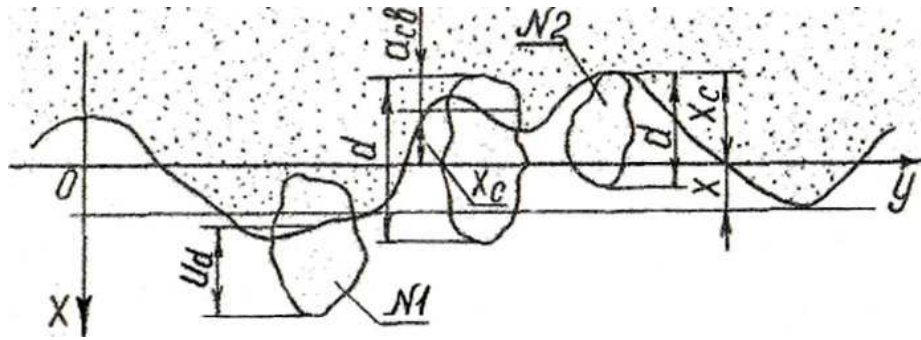


Рис. 6. Поперечное сечение поверхностного слоя абразивного инструмента [29]

В работе [29] принято допущение, что распределение ординат профиля связки x_c также соответствует нормальному закону со средним квадратичным отклонением $\sigma_c \approx 0,1 \cdot d_0$. При этом автор не раскрывает методики экспериментальных исследований, на основании которых было определено данное соотношение.

Далее А.В. Королев связывает разновысотность и глубину заделки зерен со средним уровнем связки и получает дифференциальную и интегральную функции распределения вершин зёрен по глубине РП:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_d}} \cdot \int_{-d_0/\sigma_d}^{\infty} \frac{1}{t + \frac{d_0}{\sigma_d}} \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] \cdot \left[\Phi_0\left(\frac{x}{\sigma_c}\right) + \Phi_0\left(\frac{t \cdot \sigma_d + d_0 + x}{\sigma_c}\right) \right] dt;$$

$$F(x) = \frac{d_0}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_d}} \cdot \int_{-d_0/\sigma_d}^{\infty} \frac{1}{t + \frac{d_0}{\sigma_d}} \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] \cdot \left[\Phi_0\left(\frac{u}{\sigma_c}\right) + \Phi_0\left(\frac{t \cdot \sigma_d + d_0 + u}{\sigma_c}\right) \right] du.$$

Из полученных А.В. Королёвым выражений следует, что распределение вершин зёрен определяется тремя параметрами – d_0 , σ_d , σ_c , причём последние два параметра зависят от d_0 , что значительно упрощает моделирование РП. С целью дальнейшего упрощения полученную интегральную функцию распределения автор аппроксимирует степенной функцией

$$F(h) = 0,24 \cdot \left(\frac{h}{d_0}\right)^{2,75}$$

и функцией распределения Рэлея

$$F(h) = \exp\left[-1,65 \cdot \left(1,95 - \frac{h}{d_0}\right)^2\right],$$

где h – расстояние от наиболее выступающих зёрен РП до заданного уровня сечения рельефа, мкм.

Ю.К. Новоселов [42] использовал два подхода к описанию РП круга. Первый подход связан представлением РП совокупностью режущих элементов. Автор получил зависимости по форме, числу и распределению рабочих частей зёрен в статическом и динамическом состоянии ШК. При этом он принимал нормальный закон разновысотности вершин рабочих частей зёрен по глубине в статическом состоянии ШК:

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_u}} \cdot \exp\left(-\frac{(u - \bar{u})^2}{2 \cdot \sigma_u^2}\right), \quad (2)$$

где \bar{u} – расстояние от условной наружной поверхности ШК до центра группирования рабочих частей зёрен, мм.

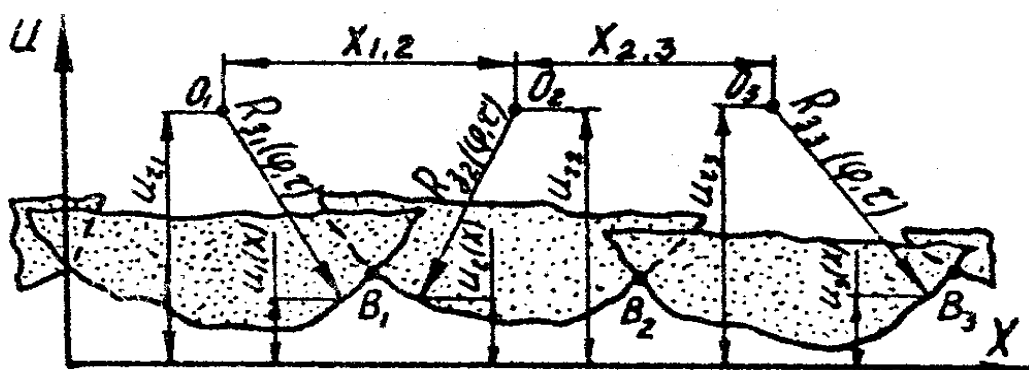


Рис. 7. Элементарный режущий профиль ШК [42]

Второй подход связан с представлением РП совокупностью элементарных режущих профилей (рис. 7). В этом случае автор описывает РП с помощью системы случайных функций:

$$U(x) = \begin{cases} U_1(x) = U_{R_1} - \sqrt{R_{s_1}^2(\varphi, \tau) - (x - X_{R_1})^2}, & X_{B_1} > x \geq 0; \\ U_2(x) = U_{R_2} - \sqrt{R_{s_2}^2(\varphi, \tau) - (x - X_{R_2})^2}, & X_{B_2} > x \geq X_{B_1}; \\ \dots \\ U_m(x) = U_{R_m} - \sqrt{R_{s_m}^2(\varphi, \tau) - (x - X_{R_m})^2}, & X_{B_m} > x \geq X_{B_{m-1}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $U_m(x)$ – профиль m -го АЗ; U_{R_m} и X_{R_m} – координаты центра профиля m -го АЗ; $X_{B_{m-1}}$ – координата точки пересечения профиля $(m - 1)$ -го АЗ с профилем m -го АЗ.

Следует отметить, что при моделировании процесса формирования микропрофиля шлифованной поверхности Ю.К. Новосёлов не использует зависимости (2), (3) и для математического описания распределения вершин зёрен по глубине РП применяет степенную зависимость:

$$f(u) = C_f \cdot u^{\xi-1},$$

где C_f и ξ – коэффициент и показатель степени, определяемые в результате эксперимента.

Л.Н. Филимонов [83, 84] связывает вероятностно-статистическое описание процесса шлифования со статистическими характеристиками рельефа РП круга. Основными характеристиками РП круга автор считает законы разноразности зёрен и радиусов округления вершин. Экспериментальное исследование рельефа РП автор проводил двумя методами: методом профилографирования и методом царапания. На основе экспериментальных данных автор предполагает, что разноразность зерен подчиняется закону β -распределения. Пользуясь интегральной функцией распределения, можно определить число зёрен на заданном уровне x , приходящихся на единицу длины (N_z) и площади (N'_z) РП круга соответственно:

$$N_z = N_{\Pi} \cdot A \cdot \int_0^x t^{\gamma-1} (1-t)^{\eta-1} dt ;$$

$$N'_z = \frac{k_{\Pi} \cdot N_z}{d_0 + 2 \cdot r_{\Pi}} ,$$

где N_{Π} – число зёрен, приходящихся на единицу длины РП круга, шт.; k_{Π} – коэффициент перекрытия абразивных зерен ($k_{\Pi} = 0,4 \dots 0,8$); d_0 – средний размер АЗ, мкм; r_{Π} – радиус округления вершины ощупывающей иглы профилографа, мкм; γ, η – параметры функции β -распределения; $A = \Gamma(\gamma + \eta) / (\Gamma(\gamma)\Gamma(\eta))$.

Анализ разноразности зёрен по высоте профиля круга, проведенные А.Н. Филиным [85], показали, что наиболее предпочтительным законом их распределения является β -распределение, а при использовании с факториалом 2! расхождение теоретических и экспериментальных данных о количестве зерен на единицу поверхности ШК расходится в пределах 3,6 – 11,2 %.

Большое внимание вопросу моделирования ШК уделяется в работе А.К. Байкалова [3]. ШК с точки зрения Байкалова можно представить как жёсткую решетку, в углах которой закреплены зёрна в виде шаров среднего диаметра $d_{\text{ср}}$. Снаружи решетка разорвана, зёрна оголены и не имеют связей. ШК имеет две части: матрицу – статически неподвижную систему жёстко связанных частиц, зависящую от технологии ее изготовления, и ПС – динамически подвижную и непрерывно изменяющуюся под воздействием обрабатываемого материала или правящего инструмента систему. В ПС ($h_i \leq h_{\text{ПС}}$) имеет место параболический закон нарастания зёрен по глубине h_i :

$$Z_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{B \cdot L}{h_{\text{ПС}}} \cdot q_V \cdot h_i^2 , \quad (4)$$

где $h_{\text{ПС}}$ – глубина ПС ($h_{\text{ПС}} = d_{\text{ср}}$), мм; L и B – длина и ширина рассматриваемого участка ПС, мм; q_V – число абразивных частиц в единице объема, шт./мм³.

В матрице ($h_i > h_{\text{ПС}}$) имеет место линейный закон нарастания зёрен по глубине h_i :

$$Z_{i_i} = q_V \cdot h_i.$$

Несмотря на отличие законов распределения частиц в ПС и в матрице, остается неизменным условие постоянства плотности частиц в объеме, т.е. распределение центров абразивных зерен в процессе эксплуатации остается неизменным, оно задается технологией изготовления и не меняется в процессе износа и правки ШК:

$$q_V = \frac{Q \cdot K_{\text{ц}}}{W \cdot \gamma \cdot K_0 \cdot d_{\text{ср}}^3},$$

где Q – навеска абразива для получения в объёме концентрации, принятой за 100 % или за единицу, г; W – объем абразивного слоя, см³; γ – плотность материала абразива, г/см³; K_0 – коэффициент заполнения объема монолитного вещества абразивными частицами неправильной формы; $K_{\text{ц}}$ – коэффициент концентрации, показывающий, во сколько раз данная концентрация отлична от принятой за 100 % или единицу.

В идеальной модели ПС А.К. Байкалова вершины зёрен распределяются точно также, как их центры, т.е. по уравнению (4). Однако автор отмечает, что для реального ПС требуется корректировка формулы (4) или определение распределения вершин зёрен непосредственно экспериментальным путём. В качестве метода экспериментального исследования ПС автор использует метод царапания.

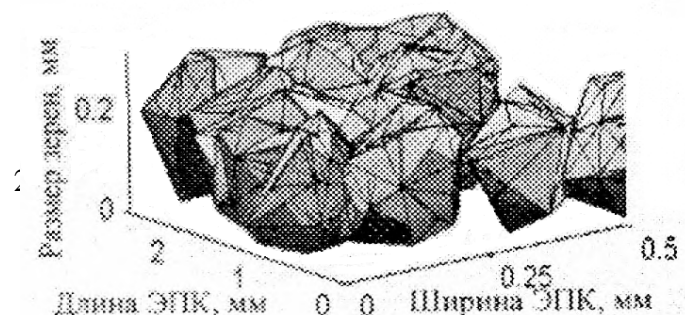
И.П. Никифоров [41] разбивает ПС на элементарные площадки круга (ЭПК) и определяет суммарный объём зёрен, содержащихся в каждой ЭПК, через номер структуры ШК C_y :

$$V_3 = d_{\text{max}} \cdot F \cdot \frac{(31 - C_y)}{50},$$

где d_{max} – максимальный размер АЗ, мм; F – площадь ЭПК, мм². В то же время объём V_3 равен сумме объёмов V_i единичных зёрен ЭПК:

$$V_3 = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (5)$$

где n – число зёрен, полностью или частично находящихся в границах ЭПК.



Как было указано в п. 1.1 автор моделирует зёрна в виде совокупности треугольных пирамид (рис. 8), не имеющих общих областей и заполняет ими каждую ЭПК до тех пор, пока не станет верным равенство (5). Из приведённых формул, можно прийти к выводу, что автор использует равномерное распределение зёрен в ПС.

В работе С.Г. Бишутина [4] была предпринята попытка моделирования РП с учётом условий его правки. На

РП круга после правки автор выделяет две группы зёрен: 1) зёрна (m_p),

которые претерпели частичное разрушение в процессе правки, но остались на поверхности ШК; 2) зёрна (m_n), которые не контактировали с правящим инструментом. Далее автор выводит интегральную функцию распределения вершин зёрен каждого типа и суммарную функцию распределения:

Рис. 8. Моделирование зёрен в границах элементарной площадки круга (ЭПК) [41]

$$F_c(z) = \begin{cases} \left(\frac{m_p}{m_p + m_n} + \frac{m_n \mathbb{L}(t_2)}{t_1(m_p + m_n)} \right) \frac{z}{t_2}, & 0 \leq z \leq t_2; \\ \frac{m_p}{m_p + m_n} + \frac{m_n \mathbb{L}(z)}{t_1(m_p + m_n)}, & t_2 \leq z \leq d_{cp} - d_{min}; \\ \frac{m_p}{m_p + m_n} + \frac{m_n z}{t_1(m_p + m_n)}, & d_{cp} - d_{min} \leq z \leq t_1, \end{cases} \quad (6)$$

где t_1 – расстояние между наиболее выступающими и наиболее углублёнными вершинами зерен РП круга, мм; t_2 – глубина залегания зёрен РП типа « m_p », мм; d_{min} , d_{cp} – наименьший и средний размер зёрен ШК соответственно, мм. Функция $\mathbb{L}(z)$ и её составляющие определяются по следующим формулам:

$$\mathbb{L}(z) = \left\{ 0,5 - 0,5p^{-1} \left[\frac{a}{3} \left(\frac{d_{cp} - d_{min} - z}{s} \right)^3 + b \left(\frac{d_{cp} - d_{min} - z}{s} \right) \right] \right\} \cdot (d_{cp} - d_{min} + z) \cdot \left[\frac{0,21z}{d_{cp} - d_{min}} + 0,79 \right];$$

$$p = \frac{a}{3} \left(\left[\frac{d_{cp} - d_{min}}{s} \right]^3 - b \left[\frac{d_{cp} - d_{min}}{s} \right] \right);$$

$$a = \frac{5,735}{(N - 8)^2} + 0,0389;$$

$$b = 0,651;$$

$$s = \frac{-7,851/(N - 8)^2 + 0,211}{10,35};$$

$$d_{min} = d_{cp} + \frac{7,851}{(N - 8)^2} - 0,211; \quad (7)$$

$$d_{\max} = d_{\text{cp}} - \frac{7,851}{(N-8)^2} + 0,211; \quad (8)$$

$$d_{\text{cp}} = 1,162 \cdot N \cdot 10^{-2},$$

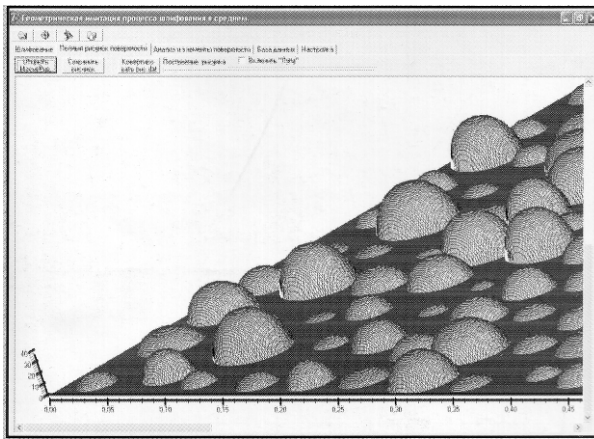
где N – зернистость инструмента по ГОСТ 3647–80.

Функция $F_c(z)$ учитывает параметры, характеризующие ШК и условия правки. Часть этих параметров определяется экспериментально: P – нагрузка, вызывающая разрушение АЗ или связки, Н [35, 96]; $d_{\text{и}}$ – диаметр вершины правящего инструмента, мкм; J_c – вертикальные упругие перемещения АЗ в связке, мкм [52]; ω – размер микронеровностей поверхности АЗ, мкм [36]; глубина залегания t_2 зёрен РП типа « m_p », мкм. На наш взгляд, некоторые из указанных параметров определить довольно сложно.

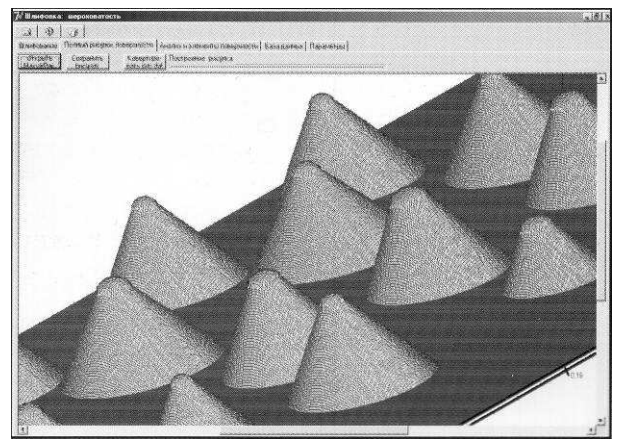
Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.А. Белкин в своих работах [75, 76] предложили новый метод поверхностного моделирования на основе параболической интерполяции поверхностей сложной формы. Суть метода заключается в аппроксимации дискретно заданных поверхностей совокупностью соприкасающихся параболоидов. На основе метода авторами разработана автоматизированная система инженерии поверхности. Она позволяет вычислять геометрические параметры качества в различных сечениях поверхностной модели (шероховатость, волнистость), моделировать контакт двух шероховатых поверхностей с выводом контрольных параметров для прогнозирования эксплуатационных свойств деталей машин и др. Следует отметить, что для поверхностного моделирования необходимо сначала получить топографию поверхности в виде «облака» точек с помощью экспериментальных методов.

У поверхностной модели абразивного инструмента отсутствует разделение на зёрна и связку. Не понятно, как будет изменяться её геометрия при имитационном моделировании процесса шлифования, сопровождающемся явлением износа РП.

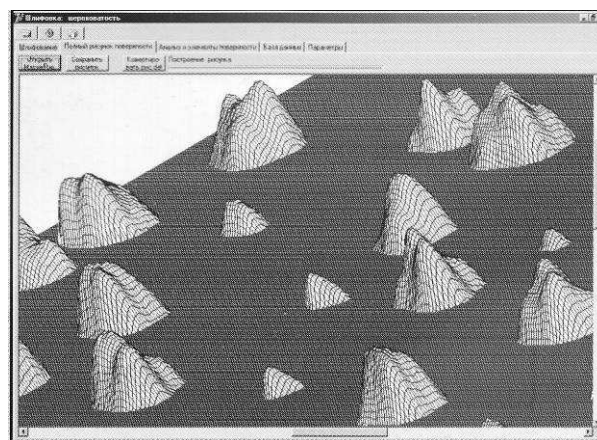
Интересно отметить, что при имитационном моделировании процесса шлифования Ю.С. Степанов и его ученики используют иные модели РП [25, 29], представляющие совокупность объёмных рабочих частей зёрен различной формы без учёта связки (рис. 9).



а)



б)



в)

Рис. 9. Различные модели рабочей поверхности ШК [74]
 а – РЧ зерна в виде эллипсоида; б – РЧ зерна в виде конуса с округлённой вершиной;
 в – РЧ зерна в виде хаотической призмogramмы

Таким образом, приведённый выше анализ литературы [4, 28, 56, 83 и др.] показал, что существуют различные мнения относительно закона разновысотности рабочих частей зёрен на РП круга. Учёные, проводившие экспериментальные исследования [56, 83 и др.], получали ассиметричное распределение с правосторонней ассиметрией. Ассиметрию можно объяснить следующими причинами:

1. Она может быть вызвана расщеплением зёрен на РП круга при правке и во время работы. Коэффициент дробимости зёрен, представляющий собой среднее число рабочих частей зёрен, отнесённое к одному зерну, изменяется от единицы до двух и даже более в зависимости от материала зёрен, связки и других условий шлифования [56, 83].

2. При работе в режиме преимущественного затупления износ кругов характеризуется образованием площадок износа на рабочих частях зёрен наружной части РП круга. В результате этого их вершины приближаются к неизношенным зёрнам из глубинных слоев РП круга. Возникает асимметрия закона разновысотности.

3. Большинство экспериментальных методов исследования РП круга не позволяют отделить вершины выступов связки от вершин рабочих частей зёрен. В результате этого закон разновысотности искажается.

В качестве закона распределения вершин рабочих частей зёрен РП круга целесообразно принять закон β -распределения, поскольку он является универсальным: имеет частные случаи, представляющие собой равномерное, треугольное, параболическое и асимметричное с право- и левосторонней асимметрией распределения.

Для определения числа рабочих частей зёрен РП круга целесообразно предварительно моделировать ПС [1, 3, 4, 20, 41 и др.]. Число зёрен в ПС до правки можно определить через характеристики ШК и абразивного материала, а их распределение принять равномерным, исходя из требования к равномерности структуры всего ШК.

1.3 Анализ моделей формообразования единичной абразивной царапины

Шлифованная поверхность представляет собой совокупность абразивных царапин, оставляемых вершинами абразивных зёрен ШК [35, 83]. Образование каждой абразивной царапины происходит в результате процесса внедрения РЧ зерна в поверхность заготовки. В случае моделирования РЧ зерна в виде конуса с округлённой вершиной результат её взаимодействия с материалом заготовки зависит от величины отношения $\frac{a}{\rho}$ [8, 34, 35, 44, 83], где a – глубина внедрения РЧ зерна в обрабатываемый материал, мкм; ρ – радиус закругления РЧ зерна, мкм. При $\frac{a}{\rho} < \delta_1$ наблюдается упругая деформация металла, при $\delta_1 \leq \frac{a}{\rho} \leq \delta_2$ – выдавливание материала в навалы; при $\frac{a}{\rho} > \delta_2$ – стружкообразование. Пороговые величины δ_1 и δ_2 зависят от большого количества факторов и определяются экспериментально.

Для оценки результата взаимодействия РЧ зерна с обрабатываемым материалом в случае её моделирования параболоидом вращения А.П. Осипов [50] вводит параметр y_{\min} :

$$y_{\min} = (\operatorname{tg}(\beta_1) \cdot b \cdot v)^{1/(1-v)}, \quad (9)$$

где b и v - параметры образующей параболоида, β_1 – угол сдвига, который предлагается рассчитывать по следующей формуле [51]:

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{1}{2 \cdot ([\delta]_{\theta} + [\psi]_{\theta})}, \quad (10)$$

где $[\delta]_{\theta}$ и $[\psi]_{\theta}$ – относительное удлинение и сужение материала заготовки с учётом температуры θ , возникающей в зоне контакта с АЗ, в долях. При $a \leq y_{\min} - h_{uz}$ наблюдается упругопластическая деформация металла, при $a > y_{\min} - h_{uz}$ – стружкообразование. Как видим из формул (9), (10), величина y_{\min} зависит в конечном итоге и от геометрии РЧ зерна, и от пластических свойств обрабатываемого материала.

Каждая царапина представляет собой совокупность канавки и навалов, образующихся в результате пластического оттеснения металла к её краям [4, 44, 83]. Согласно исследованиям, проведённым на установках для микрорезания единичным абразивным зерном [33, 83], навалы увеличивают высоту царапины на 20 – 80 %.

Проанализируем математические модели образования единичной царапины [4, 44, 83]. С помощью этих моделей учёные пытались оценить высоту навалов и шероховатость всей шлифованной поверхности.

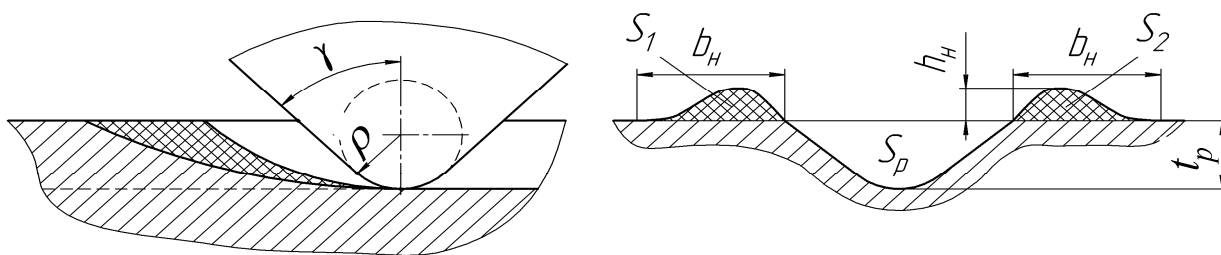


Рис. 10. Модель резания единичным абразивным зерном Л.Н. Филимонова [83]

Л.Н. Филимонов [83], анализируя процесс микрорезания единичным АЗ (рис. 10), получил следующие выражения для глубины шлифовочной канавки t_p и высоты навалов h_H :

$$\begin{aligned} t_p &= c \cdot a_z; \\ h_H &= h_M \cdot a_z^v \cdot V_{кр}^{-\delta}, \end{aligned} \quad (11)$$

где a_z – средняя толщина среза, мкм; c – эмпирический коэффициент; $V_{кр}$ – окружная скорость ШК, м/с. О параметрах h_M , v , δ автор в данной работе ничего не пишет. Вероятно, показатели степени v и δ определяются экспериментально.

Н.В. Носов [44, 47] внёс изменения в модель Л.Н. Филимонова и предложил несколько иную зависимость для высоты навалов:

$$h_H = h_M \cdot \epsilon_H, \quad (12)$$

где h_M – максимальная высота навалов, мкм; ϵ_H – коэффициент навалов, представляющий собой отношение площадей поперечных сечений навалов к площади поперечного сечения царапины. Делая допущение, что навалы в поперечном сечении имеют форму полукругов, автор преобразует формулу (12):

$$h_H = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot a_z \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot a_z} \cdot (\epsilon_{H,0} - C_H \cdot V_{кр})}, \quad (13)$$

где $V_{кр}$ – окружная скорость ШК, м/с; ρ – радиус округления РЧ зерна, мкм; C_H – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида обрабатываемого материала; $\epsilon_{H,0}$ – коэффициент навалов, который зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала без учёта температурно-скоростного фактора. Согласно [44, 47]

$$\epsilon_{H,0} = 1 - \frac{HV}{HV_{max}},$$

где HV – твёрдость обрабатываемого материала по Виккерсу; HV_{max} – максимально достижимая твёрдость материала по Виккерсу, при которой пластичность отсутствует. Следует отметить, что параметры C_H и HV_{max} определяются экспериментально.

С.Г. Бишутин [4] при моделировании процесса образования царапины принял допущение, что слой металла толщиной h_0 не срезается, а подвергается пластическому оттеснению к краям царапины (рис. 11). Он предлагает следующую зависимость для высоты навалов δ :

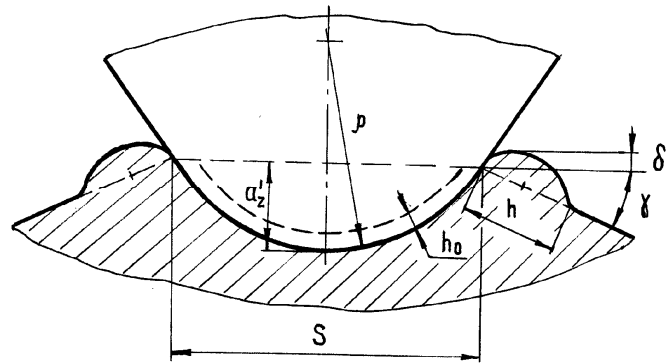


Рис. 11. Схема к расчету высоты навалов С.Г. Бишутина [4]

$$\delta = \begin{cases} \frac{S_{ц} \epsilon_H}{2hk_{\phi}} \cos(\gamma) - \frac{h}{2} \sin(\gamma), & a \leq h_0; \\ \frac{S_{ц} \epsilon_H}{2hk_{\phi}} \cos(\gamma) - \frac{h}{2} \sin(\gamma), & a > h_0, \end{cases} \quad (14)$$

где a – среднее значение глубины внедрения АЗ в обрабатываемый материал в конце цикла шлифования, мкм:

$$a = \rho \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2 \cdot \rho} \right)^2} \right]; \quad (15)$$

$$S_{\text{ц}} = \pi \cdot \rho^2 \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{a}{\rho}\right)}{180} - \rho \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{a}{\rho}\right)^2} \cdot (\rho - a);$$

$$S_{\text{п}} = h_0 \cdot (\rho - 0,5 \cdot h_0) \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{a}{\rho}\right)}{180},$$

S – ширина царапины, мкм; ρ – радиус округления РЧ зерна, мкм; h – ширина навалов в поперечном сечении, мкм; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент, характеризующий форму поперечного сечения навалов; γ – угол наклона поверхности, прилегающей к царапине, рад; $e_{\text{н}}$ – коэффициент навалов; $h_0 = m_{\text{кр}} \cdot \rho$; $m_{\text{кр}}$ – критерий перехода от пластического деформирования металла к микрорезанию при шлифовании. Следует отметить, что параметры $e_{\text{н}}$ и $m_{\text{к}}$ определяются из эксперимента.

На наш взгляд, рассмотренные модели формообразования абразивной царапины имеют существенные недостатки. Во-первых, они базируются на модели РЧ зерна в виде конуса с округленной вершиной, о недостатках которой было указано ранее в п. 1.1. Во-вторых, для оценки высоты навалов с помощью вышеуказанных формул необходимо знать коэффициента навалов $e_{\text{н}}$, который сильно зависит от отношения $\frac{a}{\rho}$. Например, для одной и той же РЧ зерна при

$\delta_1 \leq \frac{a}{\rho} \leq \delta_2$ будет наблюдаться только выдавливание материала шлифовочной

канавки в навалы и, следовательно, $e_{\text{н}} = 1$; при $\frac{a}{\rho} > \delta_2$ будет наблюдаться

стружкообразование и, следовательно, коэффициент навалов $e_{\text{н}} < 1$, причем он будет уменьшаться с увеличением a . Использование среднего значения $e_{\text{н}}$ может привести к неверным результатам в оценке геометрических параметров единичной абразивной царапины.

Задача создания моделей формообразования царапины на основе рассмотренных моделей РЧ зерна, кроме параболоида, представляется достаточно сложной, поскольку для них отсутствуют критерии перехода от упругого деформирования к выдавливанию и стружкообразованию, пластические свойства обрабатываемого материала не учитываются.

1.4 Анализ моделей процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности

Проанализируем исследования в области формирования шероховатости шлифованной поверхности.

Авторы [20, 33, 54, 97] ограничились экспериментальными исследованиями влияния некоторых характеристик ШК и режимов обработки на шероховатость шлифованной поверхности. На основании проведённых исследований они формулировали общие рекомендации по выбору оптимальных условий шлифования.

Г.Б. Лурье [35] в результате проведённых исследований аппроксимировал зависимости параметра шероховатости Ra от параметров ШК, заготовки и режимов шлифования степенными функциями:

$$Ra = C \cdot t^\alpha; \quad (16)$$

$$Ra = C \cdot S_1^\alpha \quad (17)$$

$$Ra = C \cdot V_{\text{кп}}^{-\alpha}; \quad (18)$$

$$Ra = C \cdot d_0^\alpha; \quad (19)$$

$$Ra = C \cdot D_3^\alpha \quad (20)$$

где t – глубина шлифования, мм; S_M – скорость продольной подачи, м/мин; $V_{\text{кп}}$ – окружная скорость ШК, м/с; d_0 – размер АЗ, мкм; D_3 – диаметр заготовки, мм.

По данным Г.Б. Лурье показатели степени в формулах (17) – (20) колеблются в довольно узких пределах: $\alpha = 0,4 - 0,5$ для t и S_M ; $\alpha = 0,7 - 0,8$ для $V_{\text{кп}}$; $\alpha = 0,5 - 0,7$ для d_0 ; $\alpha = 0,13 - 0,15$ для D_3 . Пределы изменения коэффициентов C не указаны.

Использование зависимостей (17) – (20) затрудняется тем, что для определения C и α необходимо провести эксперименты по определению влияния параметров t , S_M , $V_{\text{кп}}$, d_0 , D_3 на шероховатость (Ra), провести статистическую обработку полученных данных, однако, найдённые значения C и α будут верны лишь для тех условий, в которых проводились эксперименты.

Е. Н. Маслов [37] для количественной оценки шероховатости предложил эмпирическую зависимость:

$$Ra = \frac{C_{Ra} \cdot V_3^p \cdot t^z \cdot S_0^q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{V_{\text{кп}}^\omega \cdot D_3^\mu \cdot H_{\text{кп}}^n}, \quad (21)$$

где C_{Ra} – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; V_3 – окружная скорость заготовки, м/мин; $V_{\text{кп}}$ – окружная скорость ШК, м/с; t – поперечная подача, мм; S_0 – продольная подача на 1 обо-

рот заготовки, мм/об; D_3 – диаметр заготовки; $H_{кр}$ – высота ШК, мм; k_1 – коэффициент, учитывающий зернистость ШК; k_2 – коэффициент, учитывающий состав СОЖ; k_3 – коэффициент, учитывающий влияние выхаживающих ходов; p , z , q , ω , μ , n – показатели степени.

В отличие от формул (17) – (20) Г.Б. Лурье, эмпирическая зависимость Е.Н. Маслова (21) включает 10 исходных параметров (C_{Ra} , V_3 , $V_{кр}$, t , S_o , D_3 , $H_{кр}$, k_1 , k_2 , k_3), однако для определения показателей степени (p , z , q , ω , μ , n) потребуется провести эксперименты. Увеличение числа уровней варьирования исходными параметрами и уменьшение интервалов варьирования может повысить точность предсказываемых математической моделью значений параметра Ra . При этом увеличивается количество необходимых экспериментов, а использование модели для расчёта параметра Ra за пределами интервалов варьирования исходными данными может привести к большим погрешностям.

Эффективность процесса шлифования, в том числе с точки зрения шероховатости, Е.Н. Маслов предложил оценивать с помощью обобщенного аналитического параметра – средней a_z и максимальной $a_{z_{max}}$ толщин срезов, снимаемых АЗ:

$$a_{z_{max}} = 2 \cdot a_z; \quad (22)$$

$$a_z = \frac{V_3}{60 \cdot V_{кр} \pm 2 \cdot V_3} \cdot \sqrt{t_\phi} \cdot l_{cp} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{\alpha}{D_3}} \cdot \frac{S_o}{H_{кр}}, \quad (23)$$

где t_ϕ – фактическая глубина резания, мм; l_{cp} – среднее расстояние между рабочими частями зёрен, мм; α – коэффициент, который принимает следующие значения: 1 – для наружного круглого шлифования; –1 – для внутреннего шлифования; 0 – для плоского шлифования. Знак «+» в формуле (23) соответствует встречному шлифованию, знак «–» – попутному. Следует отметить, что Е.Н. Маслов не обосновал равенство (22). Кроме того, согласно [37]:

$$t_\phi = n \cdot t,$$

где t – номинальная глубина резания, мм; n – число проходов, необходимое для установления стабильно повторяющегося микропрофиля шлифованной поверхности. Например, при шлифовании кругом зернистостью 40 с глубиной $t = 0,01$ мм/дв. ход: $n = 10$. Как определить данное число проходов для других условий шлифования, Е.Н. Маслов не пояснил.

Несмотря на связь параметра a_z с параметром Ra , Е.Н. Маслов не представил конкретных зависимостей между ними.

Л. Н. Филимонов [83] предложил два подхода к образованию шлифованной поверхности. Первый основан на использовании модели образования единичной царапины (рис. 10):

$$Rz = c \cdot a_z + h_n, \quad (24)$$

где h_n – высота навалов по боковым сторонам абразивных царапин (формула (11)), мкм; c – эмпирический коэффициент; a_z – средняя толщина среза, мкм:

$$a_z = 33 \cdot \sqrt{\frac{Q_{уд}}{V_{кр} \cdot N'_z}} \cdot \sqrt[4]{\frac{D_3 \pm D_{кр}}{D_3 \cdot D_{кр} \cdot \rho}}, \quad (25)$$

где $Q_{уд}$ – удельный минутный съём, приходящийся на единицу высоты круга, мм³/(мм·мин); $V_{кр}$ – окружная скорость ШК, м/с; N'_z – число зёрен на 1 мм² РП круга на уровне z , шт.; $D_{кр}$ и D_3 – соответственно диаметры ШК и заготовки, мм; ρ – средний радиус округления вершин рабочих частей зёрен, мкм. Знак «+» соответствует наружному круглому шлифованию; знак «-» – внутреннему.

Второй подход к образованию шлифованной поверхности основан на использовании модели процесса массового микрорезания. При этом микропрофиль детали формируется в результате наложения отдельных (элементарных) профилей РП круга на исходный микропрофиль заготовки. В результате моделирования Л.Н. Филимонов предлагает следующую эмпирическую зависимость:

$$Rz = h_n \cdot e^{-\alpha \cdot n} + h_n, \quad (26)$$

где h_n – высота элементарного режущего профиля, мкм; n – число наложений элементарного режущего профиля на микропрофиль обрабатываемой поверхности; α – показатель степени (декремент затухания); h_n – высота навалов по боковым сторонам абразивных царапин, мкм. При этом достаточно сложно определить расстояние между соседними элементарными режущими профилями, которое определяет величину n . Заметим, что учёт пластической деформации в рассматриваемой модели – чрезвычайно сложная задача. Л.Н. Филимонов решает её, используя модель образования единичной абразивной царапины (второе слагаемое в формуле (26)).

Н.В. Носов [44, 47] внёс изменения в модели Л.Н. Филимонова. На основе принятых допущений он сделал вывод, что $c = 1$ в формуле (24). Он также представил эмпирическую зависимость для определения высоты навалов h_n (формула (13)) и средней толщины среза a_z :

$$a_z = \frac{\rho^{0,7} \cdot t}{0,023 \cdot V_{кр}^{0,53} \cdot (1 - \sin(\gamma))} \quad (27)$$

где t – глубина шлифования, мм; $V_{кр}$ – окружная скорость ШК, м/с; ρ – средний радиус округления вершин рабочих частей зёрен, мкм; γ – средний передний угол рабочих частей зёрен.

Согласно экспериментальным исследованиям Н.В. Носова [44], реальные значения параметра Ra шероховатости шлифованной поверхности укладываются в пределы разброса, определяемые с помощью формул (21) и (24). Верхний предел – это параметр Ra , определяемый через параметр Rz по формуле (24). Нижний предел определяется по формуле (21).

А.В. Королёв [29] и Ю.К. Новосёлов [42] в своих работах использовали теоретико-вероятностный подход для моделирования процесса формообразования шлифованных поверхностей. А.В. Королёв получил следующие зависимости для расчёта параметров шероховатости:

$$Ra = 2 \cdot \Gamma\left(\frac{f+1}{f}\right) \cdot \left\{ \frac{1}{f+1} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{f+1}{f}\right) \right]^f - \frac{1}{2 \cdot (2 \cdot f + 1)} \cdot \left[\Gamma\left(\frac{f+1}{f}\right) \right]^{2f} \right\} \cdot H_{yc},$$

где

$$H_{yc} = \begin{cases} M_1 \cdot \left[\frac{H_0^\kappa \cdot S_0}{n \cdot Z_0 \cdot \sqrt{D_3} \cdot (V_{кр} / V_3 \pm 1) \cdot H_{кр}} \right]^{\frac{1}{f}}, & t \geq H_{yc}; \\ M_3 \cdot \left[\frac{H_0^\kappa \cdot S_0 \cdot t}{n \cdot Z_0 \cdot \sqrt{D_3} \cdot (V_{кр} / V_3 \pm 1) \cdot H_{кр}} \right]^{\frac{1}{f}}, & t < H_{yc}; \end{cases}$$

$$f = \begin{cases} \kappa + m + 0,5, & t \geq H_{yc}; \\ \kappa + m + 1,5, & t < H_{yc}; \end{cases}$$

$$M_1 = \left[\frac{\Gamma(\kappa + 1,5 \cdot m + 1) \cdot 1,5^m}{\Gamma(\kappa) \cdot \Gamma(1,5 \cdot m + 1) \cdot \kappa} \right]^{\frac{1}{f}};$$

$$M_3 = \left[\frac{(1,5 + \kappa + m) \cdot \Gamma(\kappa + 1,5 \cdot m + 1) \cdot 1,5^m}{\Gamma(\kappa) \cdot \Gamma(1,5 \cdot m + 1) \cdot \kappa} \right]^{\frac{1}{f}},$$

t – глубина шлифования, мм; S_0 – продольная подача на оборот заготовки, мм/об; $V_{кр}$ и V_3 – окружная скорость ШК и заготовки соответственно, мм/с; D_3 – эквивалентный диаметр ШК, мм; $H_{кр}$ – высота ШК, мм; Z_0 – число зёрен на единице площади РП круга, шт.; H_0 – разновысотность активных зёрен, которая соответствует глубине залегания половины всех выступающих над связкой вершин зёрен, измеренной от вершины наиболее выступающего зерна, мм; κ – показатель степени функции распределения вершин зёрен внутри ШК; n и m – коэффициент и показатель степени в уравнении параболы, описывающей профиль вершины АЗ; H_{yc} – условная высота микронеровностей шлифуемой по-

верхности (расстояние между вершинами неровностей в данном поперечном сечении детали до уровня самых глубоких впадин), мм.

Ю.К. Новосёлов получил следующие зависимости для расчёта параметров шероховатости в случае установившегося процесса шлифования с учётом многопроходности ШК:

$$R_a = \frac{2}{\pi \cdot G \cdot v \cdot \sum_{i=0}^n (\omega_m - i \cdot \Delta r)^{v-1}},$$

где

$$G = \frac{K_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(\xi) \cdot \xi \cdot (V_{кр} \pm V_3) \cdot n_3 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_3}}{\Gamma(m + \xi + 1,5) \cdot V_3 \cdot H_n^\xi},$$

$$v = m + \xi + 0,5;$$

$$\Delta r = t_\phi - H,$$

t_ϕ – максимальная глубина внедрения зёрен в металл при i -ом ($i = 0, 1, \dots, n$) прохождении ШК через рассматриваемый участок заготовки, мм; Δr – величина радиального съёма при i -ом прохождении ШК через рассматриваемый участок заготовки, мм; n – общее количество встреч ШК с рассматриваемым участком заготовки; $V_{кр}$ и V_3 – окружная скорость ШК и заготовки соответственно, мм/с; D_3 – эквивалентный диаметр ШК, мм; H_n – величина слоя РП круга по глубине, в пределах которого подсчитывается число зёрен n_3 на единице площади РП круга ($H_n = t_\phi$), мм; ξ – показатель степени функции распределения вершин зёрен внутри ШК; C_b и m – коэффициент и показатель степени в уравнении параболы, описывающей профиль вершины АЗ; H – величина слоя, в котором распределена шероховатость поверхности детали, мм; ω_m – расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии микропрофиля ($\omega_m \approx H/2$), мм; K_c – коэффициент стружкообразования.

Сравнивая между собой формулы для расчёта высотных параметров шероховатости А.В. Королёва и Ю.К. Новосёлова, необходимо отметить, что они включают похожие наборы входных параметров.

Основным достоинством полученных зависимостей является то, что они отражают физическую природу процесса формообразования шлифованной поверхности и соответствуют основным принципам теории размерностей.

Основным недостатком указанных формул, затрудняющим их использование на практике, можно отнести сложность определения статистических характеристик рельефа РП круга и параметров, характеризующих пластические свойства заготовки. Необходимые для расчётов параметры t_ϕ и Δr Ю. К. Ново-

сёлов определяет в ходе экспериментов, однако методика их проведения в монографии отсутствует.

Ю.К. Новосёлов учитывает пластические свойства обрабатываемого материала с помощью коэффициента стружкообразования K_c , умножая на него ширину профилей отдельных царапин. Такой способ учёта пластических деформаций вызывает сомнения. В работе А.В. Королёва параметров, характеризующих обрабатываемый материал, обнаружено не было, кроме эмпирического коэффициента N , «близкого к единице». Автор не описал методики его определения и не привел его значений.

Зависимости для расчета параметров шероховатости Ra и Sm в любой момент времени τ были получены Л.В. Худобиным и М.А. Беловым в исследованиях [86]:

$$Ra(\tau) = k_{31} \cdot R \cdot [H_{0d}(\tau)]^{f_1};$$

$$Sm(\tau) = k_{32} \cdot S \cdot [H_{0d}(\tau)]^{f_2},$$

где

$$H_{0d}(\tau) = \exp(q \cdot \tau \cdot \frac{H_{0\dot{n}0}}{\sigma_{\dot{n}0}^2}) \cdot \sqrt{(1+\beta) \cdot \sigma_{ct}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{j_c^2 \cdot A_0^2 \cdot \left(\frac{\mu_0}{\mu}\right)^{2p} \cdot \exp(2 \cdot k_{ж} \cdot m_0 \cdot \tau)}{\left[j_c + k_{\sigma} \cdot k_{\xi}^{\lambda} \cdot k_z \cdot \Phi_1 \cdot \left(1 + 2 \cdot f \cdot \frac{a}{b}\right) + \Phi_2 \cdot \mu \right]}};$$

$$\Phi_1 = \pi \cdot \sigma_{0s} \cdot \xi^{\lambda} \cdot b^2 \cdot z_k / 8 \cdot t';$$

$$\Phi_2 = \alpha \cdot V_{кр} \cdot R_{пр} \cdot H_{кр} \cdot k_{p'} / \Delta_0 \cdot t',$$

A_0 – амплитуда относительных колебаний ШК и заготовки, определяемая при их свободном вращении, мм; j_c – жёсткость технологической системы, Н/мм; μ_0 и μ – динамическая вязкость эталонной (1,5 %-ный водный раствор кальцинированной соды) и применяемой СОЖ, Па·с; $p = 0,1 - 0,2$ – показатель степени, характеризующий влияние демпфирующих свойств СОЖ на амплитуду колебаний системы; m_0 – показатель степени, характеризующий интенсивность роста амплитуды при шлифовании с эталонной СОЖ; $k_{ж}$ – коэффициент, учитывающий влияние функциональных свойств СОЖ на интенсивность роста амплитуды; σ_{0s} – предел текучести металла при температуре шлифования без применения СОЖ, Н/мм²; ξ – усадка стружки; $\lambda = 1,25$ – показатель политропы сжатия; a, b – соответственно глубина и ширина царапины от единичного АЗ, мм; z_k – число зёрен, одновременно контактирующих с поверхностью заготовки при шлифовании без применения СОЖ, шт.; k_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние температуры в зоне шлифования на предел текучести металла; k_{ξ} – коэффициент, учитывающий влияние СОЖ на усадку; k_z – коэффициент, учиты-

вающий влияние СОЖ на эластичность связки ШК; $\alpha = 1,5 - 2,5$ – коэффициент; $V_{кр}$ – окружная скорость ШК, м/с; $R_{пр}$ – приведённый радиус, м; $H_{кр}$ – высота ШК, мм; Δ_0 – минимальный зазор в контакте ШК-заготовка, мм; k_{py} – эмпирический коэффициент; $H_{0_{cr}}$ – статическая разновысотность активных зёрен на РП круга, мм; σ_{cr}^2 – дисперсия статического распределения активных зёрен, мм²; q – коэффициент, учитывающий влияние изнашивания, затупления и засаливания ШК на изменение $H_{0_{cr}}$ и σ_{cr}^2 за период стойкости; $\beta = 0,1 - 0,2$ – коэффициент, учитывающий влияние прочих динамических факторов (кроме вибраций) на разновысотность зёрен; k_{31}, k_{32} – коэффициенты, учитывающие влияние адгезионных взаимодействий при засаливании ШК на Ra и Sm ; R, S – коэффициенты, зависящие от характеристики, размеров и условий правки ШК, от размеров заготовки, схемы и режима шлифования; f_1, f_2 – показатели степени.

Данные уравнения достаточно хорошо отражают влияние применяемого смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) на формирование шероховатости поверхности, однако изобилуют экспериментальными коэффициентами, что делает невозможным их применение без проведения предварительных натурных экспериментов. В этом случае возникают сомнения по поводу целесообразности применения указанных моделей для практических расчётов параметров шероховатости.

Влияние СОТС, а также вибраций технологической системы на шероховатость учитывает математическая модель процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности В.В. Ефимова [17]. В случае нормального распределения микронеровностей профиля детали уравнение для расчёта параметра шероховатости Ra выглядит следующим образом:

$$Ra = \frac{h_0}{t_\gamma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}},$$

где γ – вероятность удаления материала зёрнами на глубине h_0 ($\gamma = 0,99$); t_γ – соответствующий коэффициент риска ($t_\gamma = 4,03$); h_0 – высота микронеровностей шлифованной поверхности (аналог параметров H_{yc} и H в работах [29], [42]), мкм. Значение параметра h_0 в общем случае определяется решением одного из следующих уравнений численным методом:

$$\begin{cases} C_0 \cdot \frac{h_0^{5/2}}{14 \cdot x_0} \cdot \Phi_a(\psi) = \ln(1 - \gamma), & x_0 \geq \frac{h_0}{2}; \\ h_0^3 + \left[\frac{\ln(1 - \gamma)}{C_0} - a_{кр}^2 \right] \cdot h_0 + x_0 \cdot a_{кр}^2 - x_0 \cdot h_0^2 = 0, & x_0 < \frac{h_0}{2}, \end{cases}$$

где

$$C_0 = \frac{8 \cdot V_{кр} \cdot H_{кр} \cdot n_0 \cdot C_{\kappa} \cdot K_{\Pi} \cdot K_{cv} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{30} \cdot D_{кр} \cdot h_0}}{3 \cdot V_3 \cdot S_{\Pi}};$$

$$\Phi_a(\psi) = \frac{1}{1 - \psi_a} \cdot \left\{ 1 + \frac{3}{4} \cdot \psi_a^{7/2} - \frac{7}{4} \cdot \psi_a^{3/2} + (1 - \eta) \cdot [(1 + \varphi_{на})^{7/2} - (\psi_a + \varphi_{на})^{7/2} - \frac{7}{5} \cdot \varphi_{на} \cdot (1 + \varphi_{на})^{5/2} + \frac{7}{5} \cdot \varphi_{на} \cdot (\psi_a + \varphi_{на})^{5/2} - 1 + \psi_a^{7/2}] \right\};$$

$$\psi_a = \frac{a_{кр}}{h_0}; \quad \varphi_{на} = \frac{h_{икр}}{h_0};$$

$$a_{кр} = m_{кр} \cdot \rho_{30} \cdot \left(1 + \frac{h_{и}}{a_m} \right); \quad (28)$$

$$h_{икр} = a_{\max} \cdot \frac{1 - \psi}{\psi}; \quad \psi = \frac{a_{\varepsilon\delta}}{a_m},$$

a_{\max} – максимальная глубина внедрения зёрен в материал заготовки (аналог параметра t_{ϕ} в работе [42]), мм; S_{Π} – поперечная подача ШК относительно заготовки (мм/ход) в случае плоского шлифования и продольная подача на оборот заготовки в случае круглого шлифования (мм/об); $V_{кр}$ и V_3 – окружная скорость ШК (м/с) и заготовки (м/мин) соответственно; $D_{кр}$ и $H_{кр}$ – диаметр и высота ШК соответственно, мм; n_0 – число зёрен на единице площади РП круга, шт./мм²; C_{κ} – угловой коэффициент в функции распределения вершин зёрен внутри ШК (принят линейный закон распределения вершин зёрен по глубине РП); η – коэффициент, учитывающий обновляемость режущего профиля ШК ($\eta = 0$ – работа в режиме полного затупления; $\eta = 1$ – работа в режиме самозатачивания); ρ_{30} – среднестатистический радиус при вершине АЗ, мм; $h_{и}$ – фактический износ наиболее выступающего АЗ, мм; K_{Π} – коэффициент наложения следов зёрен на исходный микропрофиль заготовки; K_{cv} – коэффициент стружкообразования; $m_{кр}$ – критерий перехода от пластического деформирования металла к микрорезанию при шлифовании; x_0 – начальная амплитуда колебаний ШК, мкм.

В результате проведённых экспериментальных исследований В.В. Ефимов определил влияние СОТС на параметры $m_{кр}$, K_{cv} , x_0 и, в конечном итоге, на шероховатость шлифованной поверхности (Ra). На наш взгляд, это является основным достоинством его модели.

В то же время непонятно, как определить исходный параметр a_{\max} – максимальную глубину внедрения зёрен в материал заготовки. Автор выражает его через искомый параметр h_0 :

$$a_{\max} = h_0 \cdot \sqrt[5]{\frac{t_{\phi}}{h_0}}.$$

Кроме того, из вышеприведённых зависимостей следует, что искомые параметры h_0 и Ra не зависят от глубины шлифования t_ϕ , причём автор указывает на аналогичный вывод в работе [29]. Однако, А.В. Королёв делает такой вывод только для случая, когда глубина шлифования t_ϕ превышает высоту микронеровностей h_0 ($t \geq H_{yc}$ [29]). В противном случае глубина шлифования влияет на шероховатость обработанной поверхности.

В.В. Ефимов учитывает пластические свойства обрабатываемого материала с помощью параметров $m_{кр}$ и K_{cv} , между которыми, на наш взгляд, есть корреляционная связь. Как и Ю.К. Новосёлов [42], автор [17] с помощью коэффициента стружкообразования K_{cv} уменьшает опорную длину профиля шлифованной поверхности, не обосновывая сделанного допущения.

Работы С.Г. Бишутина [4, 5] посвящены обеспечению требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. Используемый автором методологический подход основан на применении некоторых обобщенных аналитических параметров, которые придадут составляемым математическим зависимостям способность адекватно реагировать на изменение условий обработки. В отношении шероховатости в качестве такого обобщённого аналитического параметра С.Г. Бишутин использует величину, равную числу вершин зёрен, необходимых для формирования профиля поверхности высотой $Rmax$. Автор выводит общую формулу для расчета наибольшей высоты неровностей профиля при круглом наружном, плоском и внутреннем шлифовании периферией неизношенного круга:

$$Rmax_H = \frac{1,5 \cdot 10^2 \cdot \rho_0^{-0,25} \cdot t_\phi^{0,5}}{\left(k_b \cdot \frac{m_p + m_H}{m_0} \cdot \frac{V_{кр}}{V_3} \cdot D_3^{0,5} \cdot H \cdot q \cdot \left(0,62 \cdot \frac{N}{V} \right)^{-2} \cdot F_c(t_\phi) \right)^{0,5}} + \delta, \quad (29)$$

где $V_{кр}$ и V_3 – окружная скорость ШК и заготовки соответственно, мм/с; D_3 – эквивалентный диаметр ШК, мм; ρ_0 – средний радиус округления вершин зёрен, мкм; m_0 – максимально возможное число абразивных зёрен на рассматриваемой площади поверхности круга; m_H – количество зёрен, которые не контактировали с правящим инструментом; m_p – количество зёрен, которые контактировали с правящим инструментом, претерпели частичное разрушение, но не были удалены с РП; k_b – коэффициент, учитывающий влияние колебаний ШК; q – отношение числа рабочих частей зёрен к числу абразивных зёрен РП круга; H – величина, учитывающая многократное взаимодействие рассматриваемого участка поверхности заготовки с ШК; N – зернистость инструмента по ГОСТ 3647-80; V – объемное содержание зёрен в инструменте, %; $F_c(t_\phi)$ – значение функции $F_c(z)$ при $z = t_\phi$; $F_c(z)$ – функция

распределения вершин зёрен по глубине РП круга (формула (6)); δ – высота навалов, образующихся по боковым сторонам абразивных царапин (формула (14)), мкм.

Согласно формуле (29), если фактическая глубина шлифования $t_{\text{ф}}$ превышает глубину РП круга, то в процессе шлифования участвуют все её зёрна, что, на наш взгляд, неверно.

При использовании полученных автором формул могут возникнуть трудности при определении ряда параметров. К их числу можно отнести k_p – коэффициент, учитывающий влияние износа вершин зёрен на средний радиус их округления; J_c – вертикальные упругие перемещения АЗ в связке, мкм; ω – размер микронеровностей поверхности АЗ, мкм; λ – коэффициент, учитывающий возможность частичного попадания зерен при шлифовании во впадины профиля; $\eta_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий вероятность попадания вершин зерен в процессе шлифования на ранее срезанные участки металла; $e_{\text{н}}$ – коэффициент навалов; $m_{\text{кр}}$ – критерий перехода от пластического деформирования металла к микрорезанию и др.

Автор [4, 5] указывает, что относительная ошибка, вызванная расхождением экспериментальных и теоретических результатов, составила от нуля до 27 %.

Методологический подход, сформулированный С.Г. Бишутиным, используется и в работе [100]. Однако в ней в качестве обобщённого аналитического параметра авторы используют среднюю толщину среза. Она определяется из функции плотности распределения толщин срезов $f(h)$ (рис. 12). В качестве закона распределения принят закон Релея (Rayleigh):

$$f(h) = \begin{cases} \frac{h}{\sigma^2} \cdot e^{-h^2/2\sigma^2}, & h \geq 0; \\ 0, & h < 0; \end{cases}$$

$$E(h) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma;$$

$$sd(h) = \sqrt{0,429} \cdot \sigma,$$

где $E(h)$ и $sd(h)$ – математическое ожидание и дисперсия толщин срезов соответственно, мкм; σ – параметр, зависящий от свойств обрабатываемого материала, характеристики ШК, кинематических параметров шлифования. Методика определения параметра σ представлена в работе [99].

R.L. Hecker и S.Y. Liang построили свою модель процесса формирования шероховатости, опираясь, на наш взгляд, на весьма грубые допущения (рис. 13):

1) отсутствие перекрытия царапин в ходе шлифования;

2) вершины абразивных зёрен имеют одинаковую коническую форму с абсолютно острой вершиной (радиус округления вершины равен нулю). В результате своих исследований авторы предлагают следующие зависимости для определения математического ожидания параметра шероховатости Ra :

$$E(Ra) = R_{factor} \cdot 0,37 \cdot E(h);$$

$$E(Ra) = R_{factor} \cdot 0,46 \cdot \sigma,$$

где R_{factor} – эмпирический коэффициент, который учитывает действие факторов, не рассматриваемых в модели.

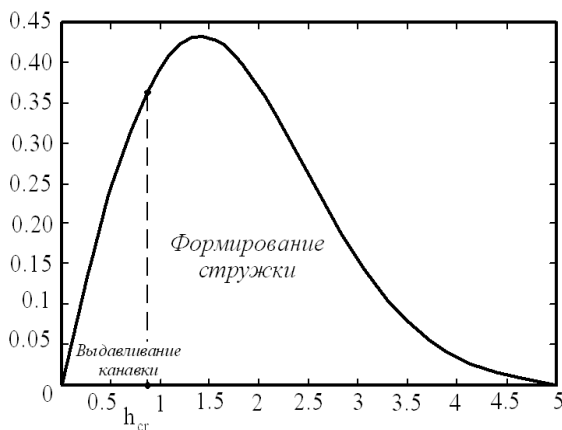


Рис. 13. Пример дифференциальной функции распределения толщин срезов [99, 100]

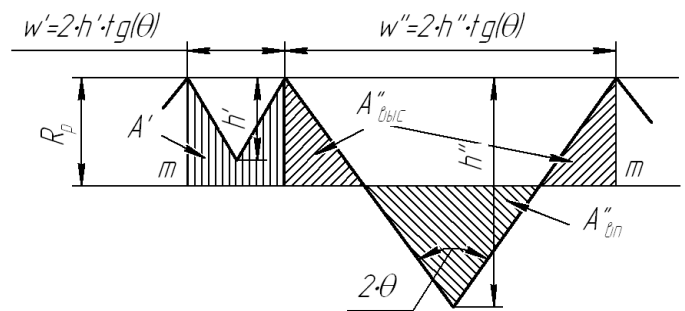


Рис. 12. Модель формирования микропрофиля шлифованной поверхности R.L. Hecker и S.Y. Liang [100]

S. Malkin [101, 102] рассматривал процесс формирования продольной шероховатости обработанной поверхности в плоскости, перпендикулярной оси ШК. Он представляет процесс шлифования как процесс цилиндрического фрезерования. В его работе приняты следующие допущения:

1) вершины рабочих частей зёрен РП расположены на одном уровне;

2) одинаковое расстояние l_{cp} между вершинами рабочих частей соседних зёрен.

Автор предложил следующую формулу для определения параметра Ra :

$$Ra = \frac{1}{9\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{V_3 \cdot l_{cp}}{V_{кр} \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр}}} \right)^2, \quad (30)$$

где $R_{кр}$ – радиус ШК, мм; $V_{кр}$ и V_3 – окружная скорость ШК и заготовки соответственно, мм/с;

Параметр l_{cp} определить достаточно сложно. По данным работы [103] значение параметра Ra , вычисленное по формуле (30), в несколько раз меньше реального значения.

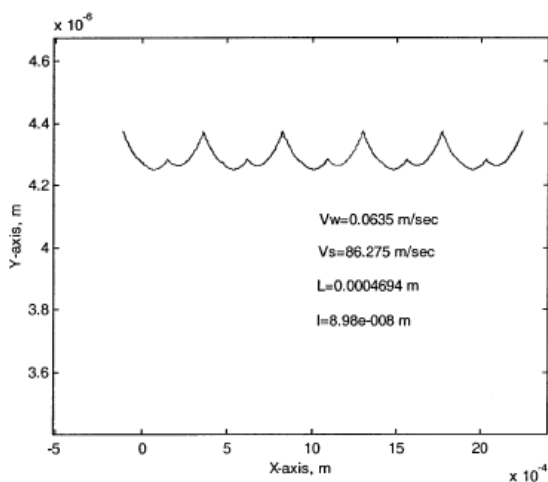
Х. Zhou и Ф. Xi в своей работе [103] усовершенствовали модель С. Малкина. Они также рассматривают процесс шлифования в плоскости, перпендикулярной оси ШК. При этом авторы статьи учитывают случайное распределение вершин рабочих частей по глубине РП, подчиняющееся нормальному закону (рис. 9, *a*). Износ круга они представляют как процесс удаления зёрен с РП. При этом не учитывается явление самозатачивания: в процессе работы круга количество зёрен на РП постепенно уменьшается и теоретически может быть равно нулю.

Х. Zhou и Ф. Xi предлагают метод поиска (search method) для определения продольного микропрофиля и топографии шлифованной поверхности.

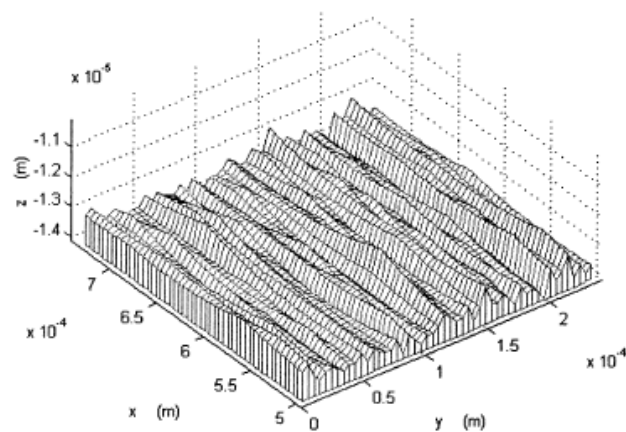
Для определения микропрофиля в плоскости, перпендикулярной оси ШК, находят все действующие в ней зёрна. Далее их сортируют в порядке уменьшения расстояний от вершин до оси ШК. Затем находят траекторию движения вершины i -го АЗ ($i = 1, 2, \dots, n$) и точки её пересечения с полученным $(i - 1)$ -ым промежуточным микропрофилем заготовки. Если точки пересечения отсутствуют, то его считают окончательным. Он представляет собой совокупность гребешков (рис. 14, *a*). Если точки пересечения есть, то определяют i -ый микропрофиль. Он получается после срезания i -ым АЗ наиболее выступающих гребешков $(i - 1)$ -го микропрофиля.

Для моделирования процесса формирования шероховатости, как и в случае с моделью С. Малкина, достаточно сложно найти исходный параметр l_{cp} – расстояние между вершинами рабочих частей соседних зёрен. Явная формула для определения параметров шероховатости в работе [103] отсутствует.

Определив ряд окончательных микропрофилей в плоскостях, перпендикулярных оси ШК, можно построить топографию шлифованной поверхности (рис. 14, *б*).



а)



б)

Рис. 14. Пример моделирования шероховатости шлифованной поверхности [103]
а – продольный микропрофиль шлифованной поверхности; б – топография шлифованной поверхности

В работе [41] поверхности ШК и заготовки разбиваются на элементарные площадки (рис. 15). Каждой элементарной площадке соответствует матрица состояния. В таких матрицах хранится информация о геометрии и состоянии поверхностей ШК и заготовки. Далее в программе MathLab имитируются вращение инструмента и заготовки, продольная и поперечная подача ШК. При этом элементарные площадки круга (ЭПК) (рис. 16, а) взаимодействуют с определёнными элементарными площадками отверстия (ЭПО) – зёрна, расположенные в границах ЭПК, накладываются на микропрофиль заготовки в границах ЭПО (рис. 16, б). Таким образом формируется микропрофиль поверхности детали.

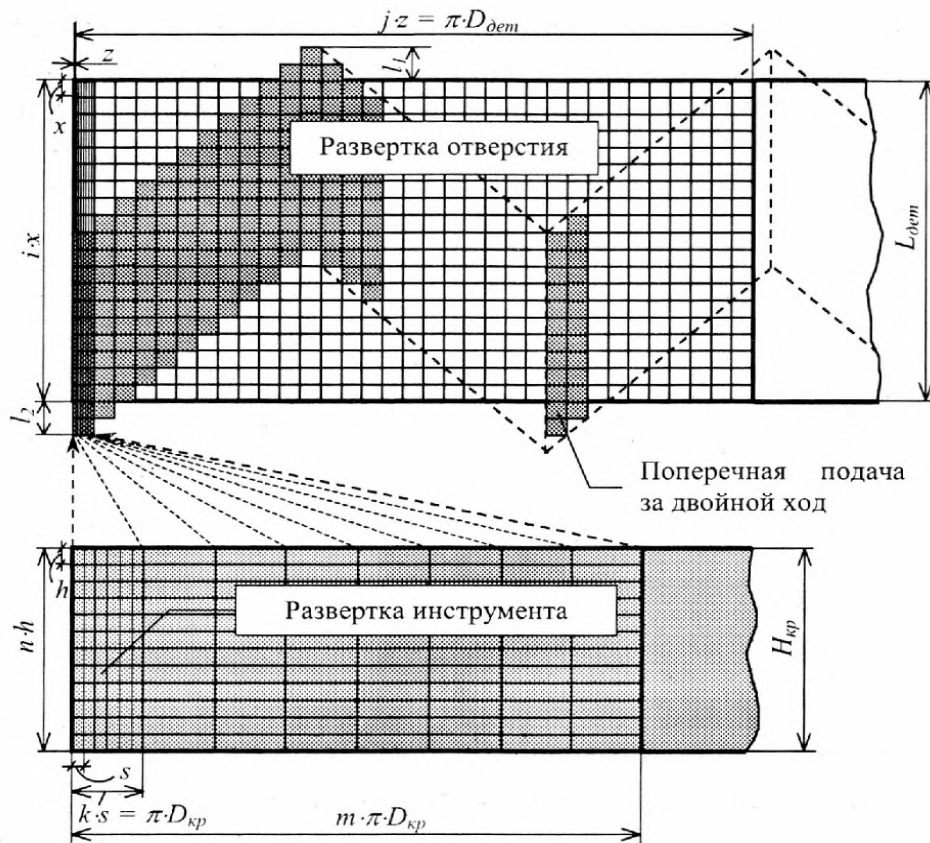


Рис. 15. Разбиение поверхностей ШК и детали на элементарные площадки (внутреннее шлифование) [41]

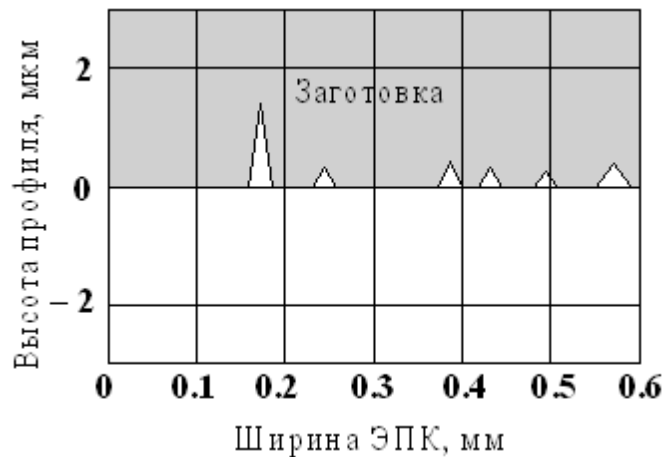


Рис. 16. Царапины на поверхности детали за один оборот круга [41]

Представленная в работе [41] стохастическая модель процесса шлифования, по словам автора, может быть использована лишь для относительной оценки эффективности различных шлифовальных кругов, имеющих, например, разную зернистость, структуру, конструктивные особенности (прерывистые и комбинированные круги) и т.д. Для абсолютной оценки формулы необходимо откорректировать с учётом явлений упругопластической деформации в зоне контакта и износа ШК. На наш взгляд, это довольно сложно, поскольку каждое

АЗ моделируется совокупностью треугольных пирамид (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, e) с помощью специальной функции – триангуляции Делоне. Как было указано в п. 1.3 для таких моделей АЗ отсутствуют критерии перехода от упругого деформирования к выдавливанию и стружкообразованию.

В работе [74] авторы ограничились изложением своего подхода к моделированию процесса шлифования и перечислением достоинств созданной ими имитационной модели (рис. 17).

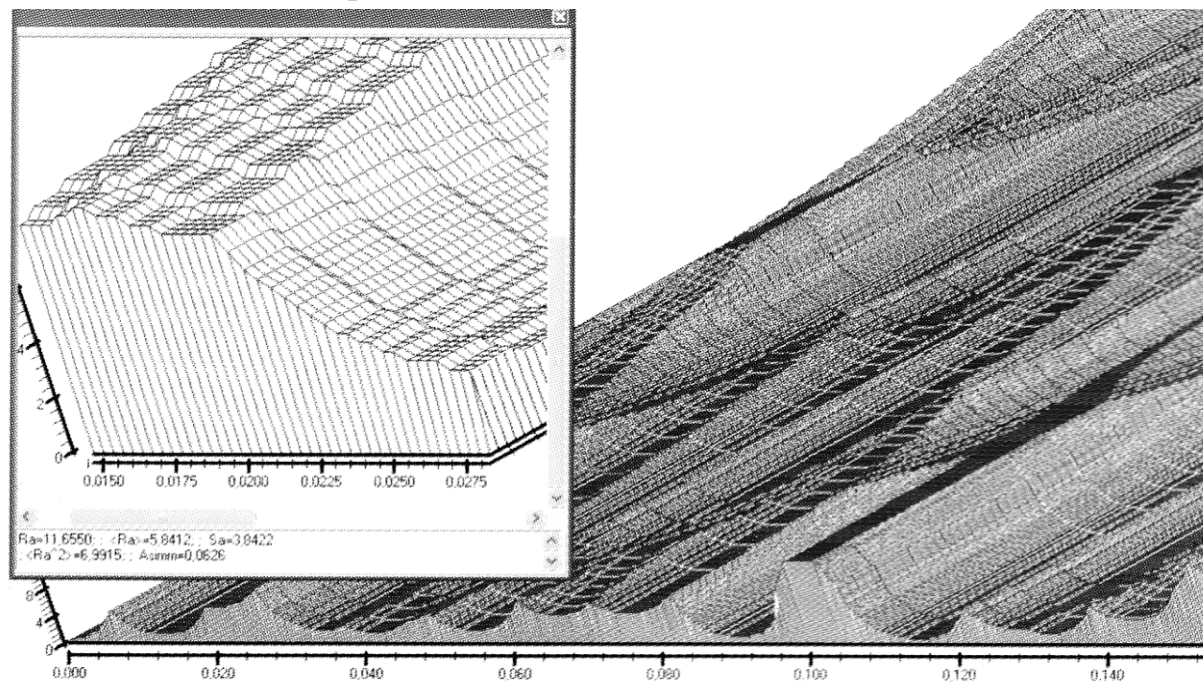


Рис. 17. Фрагмент моделируемой поверхности детали после первого чернового прохода ШК

К таким достоинствам следует отнести следующие:

1) распределение вершин зёрен и их концентрация на РП круга описывается статистическими закономерностями (законами Вейбулла и Пуассона соответственно);

2) возможность выбора формы РЧ зерна из трёх вариантов: эллипсоид вращения, конус с округлённой вершиной и хаотическая призмаграмма (рис. 9);

3) учитывается пластическое течение и упругая составляющая податливости материала детали, которые описываются среднестатистическими параметрами;

4) возможность проследить изменение шероховатости в зависимости от состояния ШК с учётом его износа. Имеющаяся в работе [74] общая информация о созданной имитационной модели, не позволяет отметить её возможные недостатки.

Следует отметить, что исследования [4, 13, 52, 66, 79, 83] показали тесную корреляционную связь между собой высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности:

$$R_{max} = (6,7 \dots 7,0) \cdot Ra \text{ [4, 79];} \quad (31)$$

$$R_z = (5,5 \dots 6) \cdot Ra \text{ [13, 79]} \quad (32)$$

В связи с этим для прогнозирования всей совокупности высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности достаточно иметь зависимость только одного из них от характеристик шлифования [4, 35, 37, 83, 100, 101 и др.]. Исключением являются имитационные модели, поскольку их выходом является микропрофиль шлифованной поверхности, позволяющий рассчитать все параметры шероховатости по формулам ГОСТ 25142–82.

Существует немало и других работ отечественных и зарубежных ученых [16, 21, 23, 26 и др.], в которых изучались вопросы моделирования процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности. Следует отметить, что они подтверждают или уточняют уже приведенные схемы и зависимости. Анализ рассмотренных в данном параграфе моделей позволил выделить следующие их достоинства и недостатки.

1. Регрессионные модели [35, 37, 44] содержат большое количество эмпирических коэффициентов. Их используют, как правило, для оценки влияния небольшого числа входных параметров (не более трёх) на параметры шероховатости. Учёт большего числа параметров влечёт за собой увеличение количества проводимых экспериментов, что связано с большими затратами времени и труда. Полученные формулы дают достаточно точные результаты лишь в тех интервалах варьирования переменными, в которых проводились опыты. Для условий обработки, выходящих за эти пределы, полученные формулы могут дать неверный результат.

2. Математические модели формообразования царапины [4, 44, 83] позволяют учесть явление образования навалов, которое влияет на шероховатость шлифованной поверхности, особенно при обработке пластичных материалов. Однако для прогнозирования шероховатости с помощью таких моделей необходимы эксперименты по определению точечных оценок математических ожиданий таких случайных величин, как передний угол γ , радиус округления РЧ зерна ρ , число зёрен на единицу длины или площади РП круга, коэффициент навалов e_n и др. С помощью этих параметров рассчитывают среднюю толщину среза a_z и высоту навалов h_n , а далее оценивают параметры шероховатости шлифованной поверхности R_z [44, 83] и R_{max} [4,5]. Однако использование аппарата усреднения может привести к неверным результатам в оценке парамет-

ров шероховатости Rz и $Rmax$. Для определения параметров Rz и $Rmax$ логично использовать максимальную глубину внедрения a_{max} рабочих частей зёрен ШК в слое, в котором будет распределена шероховатость поверхности детали, однако такие зависимости обнаружены не были.

3. Имитационные модели процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности [21, 23, 41, 74, 103] зачастую показывают удовлетворительные результаты в случае обработки материалов высокой твердости, например, закалённых сталей. При обработке мягких материалов довольно сложно учесть явление выдавливания части обрабатываемого материала в виде навалов по нескольким причинам. Во-первых, в имитационную модель должен быть заложен критерий перехода от упругого деформирования к выдавливанию и стружкообразованию при микрорезании единичным АЗ. Следовательно, имитационная модель должна базироваться на моделях РЧ зерна в виде конуса с округлённой вершиной или параболоида, поскольку для них такие критерии существуют [8, 34, 35, 44, 50, 83]. Во-вторых, в существующих моделях формообразования царапины микропрофиль заготовки до внедрения РЧ зерна представляют в виде горизонтальной прямой. В имитационных моделях микропрофиль до внедрения РЧ зерна может содержать неровности разнообразной формы. Довольно сложно определить в этом случае, как будет происходить перераспределение обрабатываемого материала в навалы.

Из приведённых рассуждений можно сделать вывод, что использование математической модели формирования единичной царапины в комплексе с имитационной моделью процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности позволяет объединить ряд их достоинств. Имитационную модель можно использовать для прогнозирования высотных параметров шероховатости Ra , Rz , $Rmax$. Математическую модель формирования царапины можно использовать для расчёта максимально возможной её высоты $h_{o_{max}}$ и при этом прогнозировать появление соответствующих дефектов шлифованной поверхности (ГОСТ 23505–79 «Обработка абразивная. Термины и определения»). Исходные для расчёта данные можно получить в результате проведения компьютерных экспериментов при реализации имитационной модели.

В результате анализа априорной информации не обнаружено имитационных моделей, которые используют модели РП в виде совокупности параболоидов и учитывают различие в законах распределения вершин зёрен и их центров по глубине РП. В связи с этим автором данной работы было принято решение о разработке собственной имитационной модели формирования шероховатости шлифованной поверхности.

1.5 Выводы и результаты

1. Анализ литературных источников показал, что существует множество работ отечественных и зарубежных учёных в области моделирования процесса формирования шероховатости поверхности при различных видах шлифования.

2. На наш взгляд, моделирование процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности следует проводить, опираясь на модель РП круга и модель формообразования единичной абразивной царапины, которые, в свою очередь, базируются на модели РЧ зерна.

3. Анализ литературных источников показал, что наиболее корректной моделью РЧ зерна является параболоид в силу следующих преимуществ: а) описывается достаточно простым математическим уравнением; б) в частных случаях может принимать форму различных геометрических фигур (цилиндр, сферический сегмент, конус); в) ориентация параболоида относительно собственной оси не меняет условий стружкообразования.

4. Наиболее корректной моделью РП круга является представление её в виде совокупности объёмных моделей рабочих частей зёрен. Для дальнейшего моделирования процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности возникает необходимость в разработке модели РП круга в виде совокупности параболоидов. Она также должна учитывать различие в законах распределения вершин зёрен и их центров по глубине РП круга.

5. Установлено, что для моделирования РП круга лучшим является закон β -распределения вершин рабочих частей зёрен по глубине, поскольку он является довольно «гибким»: имеет частные случаи, представляющие собой различные распределения. В связи с необходимостью моделирования РП круга возникает потребность дополнить результаты экспериментов по определению параметров β -распределения для различных ШК, полученные Л.Н. Филимоновым. Для решения данной задачи лучше подходит методы получения топографии РП круга, поскольку они обеспечивают более точную оценку её статистических характеристик в сравнении с методами получения микропрофиля.

6. Установлено отсутствие модели формирования царапины, базирующейся на объёмной модели РЧ зерна в виде параболоида. Существуют предпосылки для её создания в виде критерия y_{\min} [50], который позволяет оценить минимальную глубину внедрения РЧ зерна для начала процесса стружкообразования. Возникает необходимость в разработке модели формирования царапи-

ны, которая позволит прогнозировать её максимальную высоту на шлифованной поверхности детали.

7. Установлено отсутствие имитационных моделей для оценки шероховатости шлифованной поверхности с учётом отсутствия дефектов в виде единичных абразивных царапин. В связи с этим авторами данной работы было принято решение о разработке такой имитационной модели.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО МИКРОПРОФИЛЯ ДЕТАЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ШЛИФОВАНИЯ

В **главе** 1 была обоснована необходимость разработки имитационной модели процесса формирования шероховатости поверхности детали при различных видах шлифования.

Целью **главы** 2 является разработка математического аппарата, позволяющего оценить параметры шероховатости поверхности детали при различных видах и условиях шлифования. В рамках **главы** 2 были решены следующие задачи:

- разработана модель РС круга;
- разработаны кинематические модели различных видов шлифования;
- разработана имитационная модель процесса формирования поперечного микропрофиля детали;
- разработаны алгоритмы реализации полученных моделей на ЭВМ;
- сделаны выводы по проделанной работе.

В рамках **главы** 2 были приняты следующие допущения:

- 1) РП круга представляет собой случайную поверхность;
- 2) вершина РЧ зерна и центр описанной сферы зерна лежат на одной прямой, перпендикулярной оси ШК;
- 3) исходный микропрофиль заготовки зависит от припуска на шлифование: если припуск значительно превышает параметр R_{max} микропрофиля заготовки ($t \geq R_{max}$), то он не повлияет на шероховатость обработанной поверхности [29] и его можно принять прямолинейным.

2.1 Моделирование процесса формирования поперечного микропрофиля детали

Рассмотрим процесс формирования поперечного микропрофиля детали в некоторой плоскости α относительно произвольно выбранной системы координат OZY' (рис. 18). С учётом принятых допущений его можно представить как процесс наложения профилей рабочих частей отдельных зёрен на исходный микропрофиль заготовки. Для моделирования процесса наложения требуются следующие исходные данные: 1) исходный микропрофиль заготовки $y_{i0}(z')$ в

выбранной системе координат OZY' ; 2) уравнение профиля РЧ каждого зерна в этой же системе.

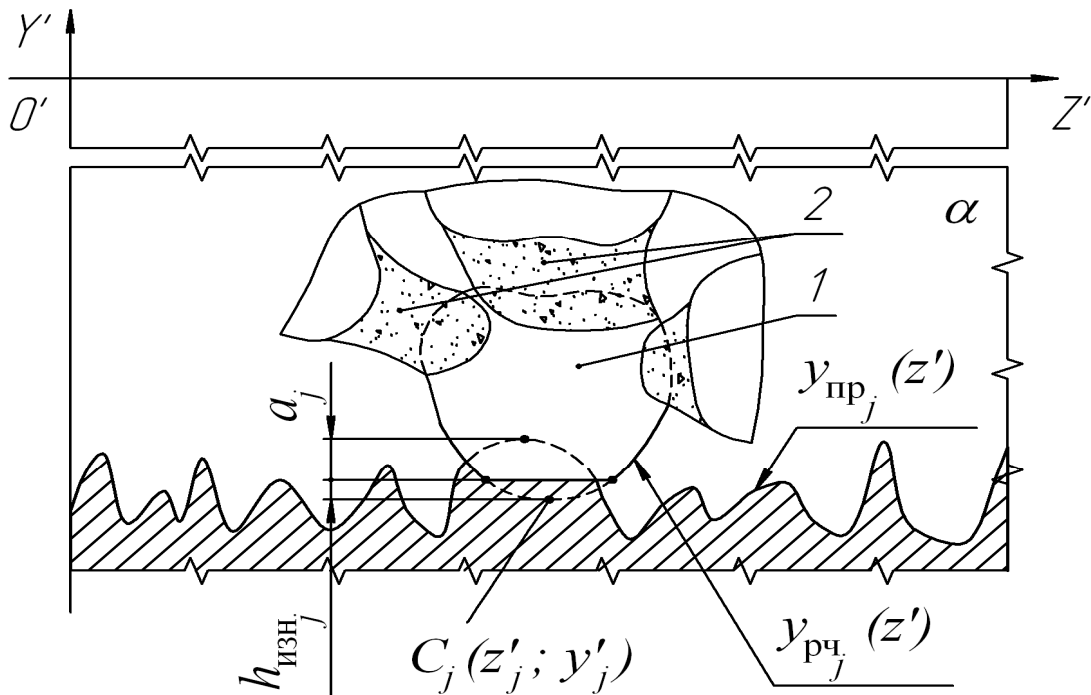


Рис. 18. Схема формирования поперечного микропрофиля шлифованной поверхности в плоскости α :

1 – зерно; 2 – связка

Используя исходные данные, микропрофиль поверхности заготовки после прохода РЧ j -го зерна через плоскость α можно описать кусочной функцией $y_{\text{и}0_j}(z')$:

$$y_{\text{и}0_j}(z') = \begin{cases} y_{\text{рч}_j}(z'), & y_{\text{рч}_j}(z') < y_{\text{пр}_{(j-1)}}(z') \wedge P_{z_j} \leq [P_z]; \\ y_{\text{пр}_{(j-1)}}(z'), & y_{\text{рч}_j}(z') \geq y_{\text{пр}_{(j-1)}}(z'); \end{cases} \quad (33)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_\alpha,$$

где $y_{\text{пр}_{(j-1)}}(z')$ – микропрофиль поверхности заготовки до прохода РЧ j -го зерна через плоскость α ; $y_{\text{рч}_j}(z')$ – контур РЧ j -го зерна; N_α – число зёрен, прошедших через плоскость α ; P_{z_j} – сила резания, действующая на РЧ j -го зерна [50], Н; $[P_z]$ – допускаемое прочностью АЗ и связки значение силы [35, 96], Н.

Следует отметить, что величина N_α может превышать число зёрен в РС $N_{\text{РС}}$. Одно и то же АЗ может пройти через плоскость α несколько раз, так как окружная скорость ШК в несколько десятков раз больше скорости заготовки ($V_{\text{кр}}/V_3 \approx 60 \dots 100$) [37, 83].

Исходный микропрофиль заготовки может быть получен методом профилографирования. Проанализировав профилограмму, можно определить координаты z' и y' точек первоначального микропрофиля и таким образом таблично задать его функцию $y'_{\text{пр}_0}(z')$. Если глубина шлифования t значительно превышает параметр $Rmax$ поверхности заготовки ($t \geq Rmax$), исходный микропрофиль $y'_{\text{пр}_0}(z')$ не повлияет на шероховатость после обработки. В таком случае его можно принять прямолинейным, т.е. $y'_{\text{пр}_0}(z') = \text{const}$.

Уравнение контура РЧ зерна в плоскости α определяется его формой, величиной износа и расположением относительно начала координат.

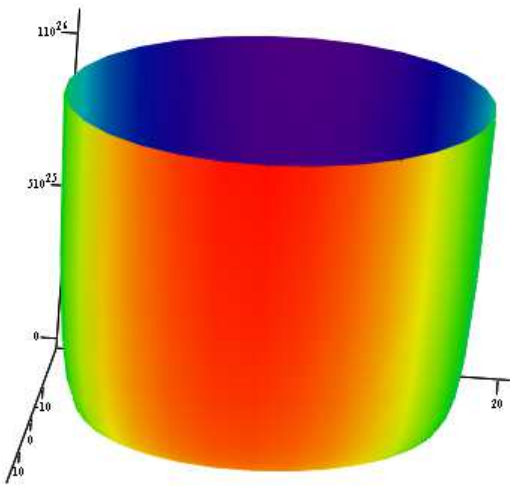
Представим РЧ абразивного зерна (рис. 2) поверхностью вращения порядка 2ν с уравнением в декартовой системе координат $Oxyz$ $z^2 + x^2 = b^2 \cdot y^{2\nu}$ (ось z направлена в сторону вектора скорости резания, ось y - нормально обрабатываемой поверхности, ось x - перпендикулярно этим осям, начало координат O поместим в вершину РЧ абразивного зерна). С математической точки зрения параболоидом считается поверхность вращения 2-го порядка, но для целей данной работы далее будем называть данную фигуру параболоидом. Параметр b характеризует быстроту нарастания профиля сечения РЧ абразивного зерна с высотой - полноту выступа, параметр ν - форму образующей ($\nu < 1$ - РЧ абразивного зерна выпуклая, $\nu = 1$ - РЧ абразивного зерна конусообразная, $\nu > 1$ - РЧ абразивного зерна воронкообразная). Усечение модели на высоту h учитывает влияние изнашивания.

Принятая модель РЧ абразивного зерна позволяет математически реализовать при моделировании множество геометрических тел: цилиндр ($\nu = 0$), стержень ($\nu \rightarrow 0$), эллипсоид и сфера, как частный случай ($\nu = 0.46-0.5$), конус ($\nu = 1$), выпуклые ($\nu < 1$) и вогнутые ($\nu > 1$) фигуры, которые использовались для моделирования разными авторами (рис. 19).

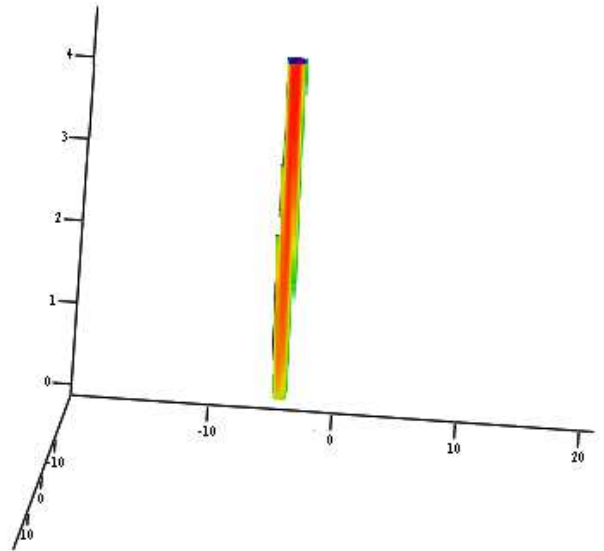
В случае аппроксимации РЧ зерна параболоидом уравнение контура РЧ зерна будет иметь следующий вид:

$$y'_{\text{рч}_j}(z') = \begin{cases} y'_j + h_{\text{изн}_j}, z' \in \left[(z'_j - b \cdot h_{\text{изн}_j}^\nu); (z'_j + b \cdot h_{\text{изн}_j}^\nu) \right]; \\ y'_j + \left(\frac{|z' - z'_j|}{b} \right)^{\frac{1}{\nu}}, z' \in \left(-\infty; (z'_j - b \cdot h_{\text{изн}_j}^\nu) \right) \cup \left((z'_j + b \cdot h_{\text{изн}_j}^\nu); +\infty \right), \end{cases} \quad (34)$$

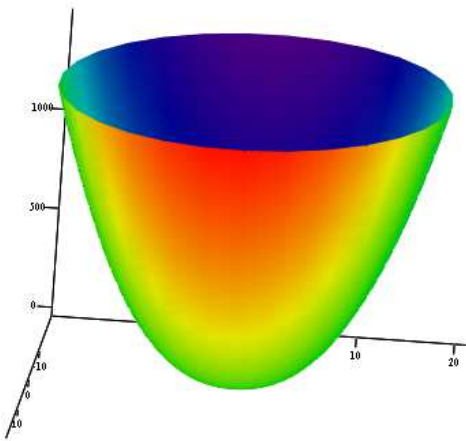
где $C_j(z'_j; y'_j)$ - вершина РЧ j -го зерна в плоскости α при отсутствии площадки износа, т. е. при $h_{\text{изн}_j} = 0$ (рис. 18); $h_{\text{эф}_j}$ - линейный износ РЧ j -го зерна, мм.



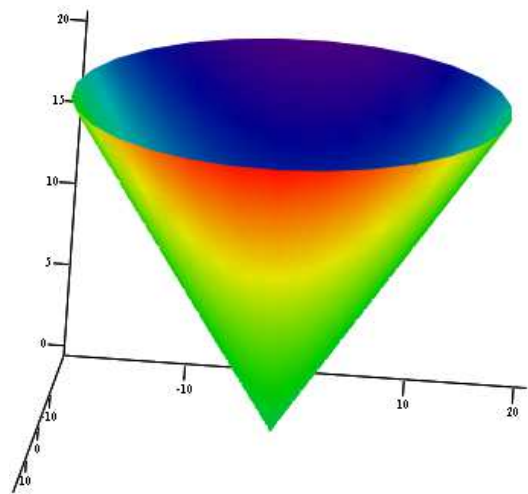
а)



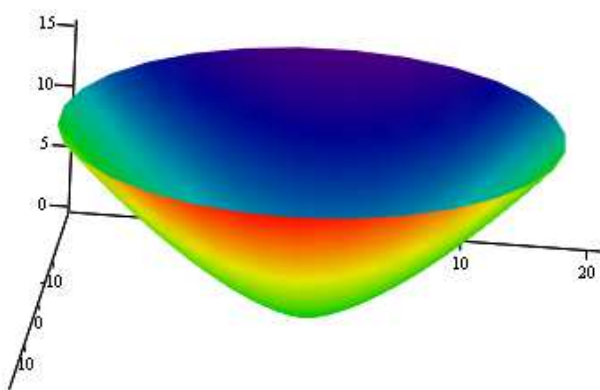
б)



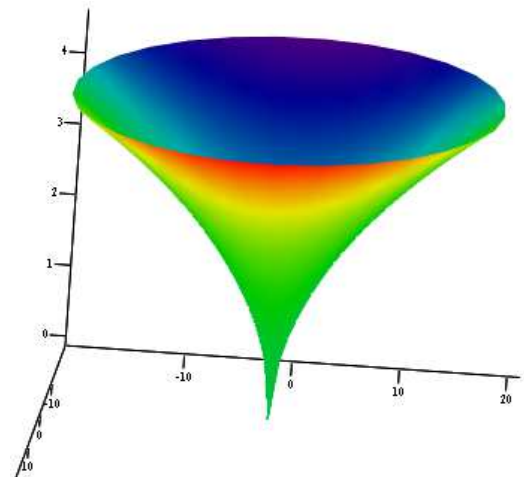
в)



г)



д)



е)

Рис. 19. Примеры геометрических тел, составляющих совокупность возможных моделей РЧ абразивного зерна: а) цилиндр; б) стержень; в) эллипсоид; г) конус; д) параболоид; е) гиперboloид

Вершина одного и того же АЗ при каждом проходе будет иметь в обозначении разные индексы. Индексы будут отличаться на величину, кратную числу зёрен в РС N_{PC} . Параметры b и v в уравнении (34) есть параметры аппроксимации РЧ зерна параболоидом вращения, значения которых зависят от материала абразива и его зернистости¹ (приложение 7). Методика определения параметров b и v приведена в работе [49].

Для определения координат z'_j и y'_j точки C_j необходимы следующие исходные данные: 1) координаты вершины РЧ зерна в пространстве в момент начала формирования микропрофиля детали в плоскости α зёрнами ШК; 2) кинематические уравнения движения вершины РЧ зерна в пространстве; 3) уравнения связи выбранной пространственной системы координат и плоской системы $O'Z'Y'$. Выбор пространственной системы координат, а значит, и вид кинематических уравнений вершины РЧ зерна будут зависеть от вида шлифования.

2.2 Кинематическая модель процесса плоского шлифования

Целью данного параграфа является разработка кинематической модели плоского шлифования. При этом необходимо решить следующие задачи: 1) выбрать пространственную систему координат; 2) связать выбранную пространственную систему координат и плоскую систему $O'Z'Y'$; 3) получить кинематические уравнения движения вершины РЧ зерна в пространстве; 4) определить координаты z'_j и y'_j вершины C_j j -го АЗ в плоскости α .

Рассмотрим процесс плоского шлифования периферией ШК. Свяжем прямоугольную пространственную систему координат $OXYZ$ с заготовкой (рис. 20): ось X направлена противоположно вектору скорости заготовки \vec{V}_c , ось Y перпендикулярна обрабатываемой поверхности и направлена вверх, ось Z направлена в тело ШК. Плоскость XOY совпадает с плоскостью боковой грани заготовки. Плоскость XOZ совпадает с горизонтальной осевой плоскостью ШК. Момент времени, когда плоскость ZOY совпадает с вертикальной осевой плоскостью ШК, обозначим $\tau_n = 0$. Вертикальную плоскость, которая в момент времени τ_n проходит через линию пересечения обрабатываемой поверхности с цилиндрической поверхностью ШК, обозначим α . Положение вершины i -го зерна РЧ круга в системе $OXYZ$ обозначим точкой $M_i(x_i; y_i; z_i)$.

¹ Данные исследования проведены инженером Масловой А.Ю. под руководством старшего преподавателя Федотова В.В. на кафедре «Технология машиностроения» Сызранского филиала СамГТУ

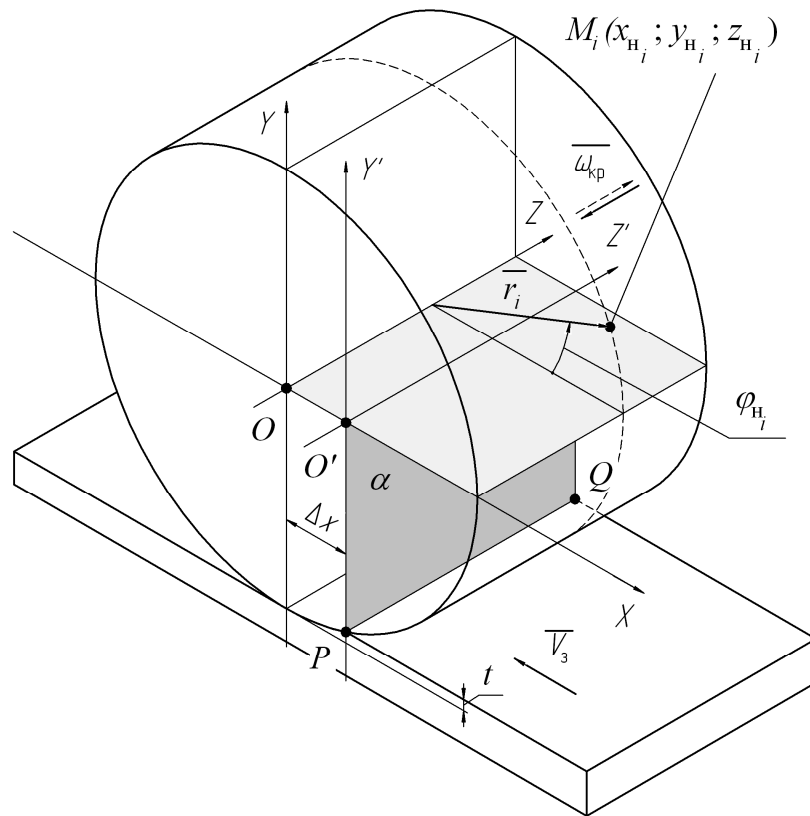


Рис. 19. Положение ШК и заготовки в момент времени τ_n

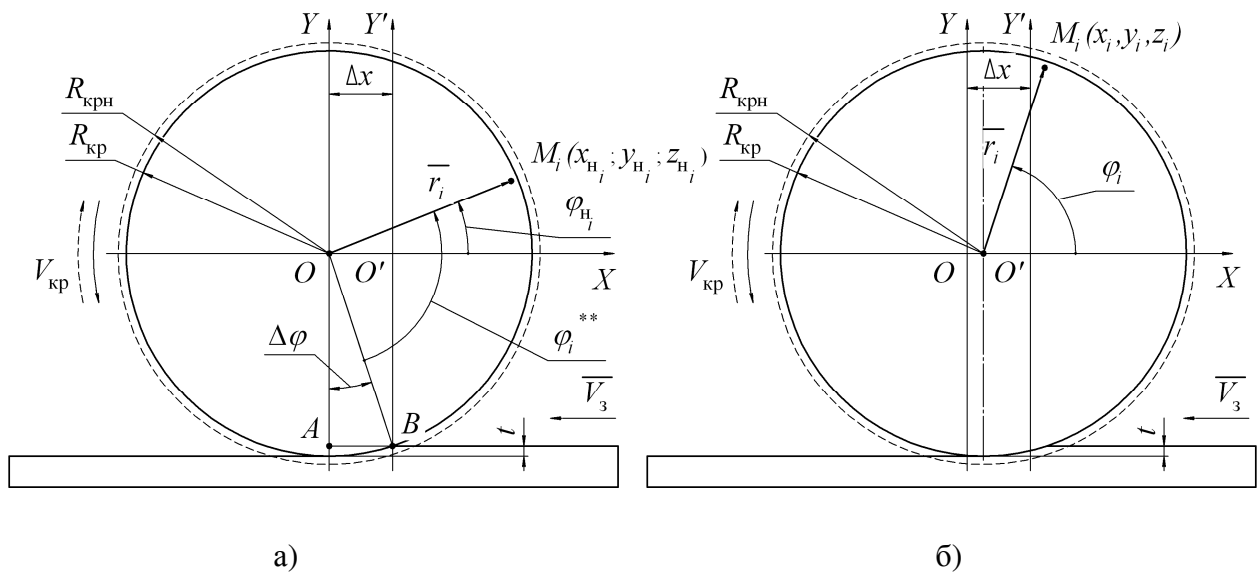


Рис. 20. Положение ШК и заготовки (вид спереди)
а – в момент времени τ_n ; б – в момент времени τ

Свяжем систему координат $O'Y'Z'$ в плоскости α с системой $OXYZ$ следующим образом: оси $O'Y'$ и $O'Z'$ есть проекции осей OY и OZ соответственно. Будем считать, что момент времени τ_n соответствует положению ШК и заготовки, при котором их торцы расположены в одной плоскости. В момент времени τ_n $x_i = x_{i_i}$, $y_i = y_{i_i}$, $z_i = z_{i_i}$.

Рассмотрим процесс формирования поперечного микропрофиля детали в плоскости α на участке PQ . Момент времени τ_n соответствует началу этого процесса (рис. 20, *a*). Определим положение точки $M_i(x_i; y_i; z_i)$ в произвольный момент времени $\tau \geq 0$ (рис. 20, *б*):

$$\begin{cases} x_i = r_i \cdot \cos(\varphi_i) + V_3 \cdot \tau; \\ y_i = r_i \cdot \sin(\varphi_i) + \Delta y(\tau); \\ z_i = z_{n_i}; \end{cases} \quad (35)$$

$$\Delta y(\tau) = A \cdot \sin(\omega_k \cdot \tau + \theta_0),$$

где V_3 – скорость заготовки, мм/с; \bar{r}_i – радиус-вектор точки M_i , мм; φ_i – угол между плоскостью XOZ и радиус-вектором \bar{r}_i в момент времени τ , рад; A , ω_k , θ_0 – амплитуда (мм), частота (рад/с) и начальная фаза колебаний ШК (рад) соответственно [58].

Определим угол φ_i :

$$\varphi_i = \varphi_{i_i} \pm \omega_{кр} \cdot \tau, \quad (36)$$

где $\omega_{кр}$ – угловая скорость ШК, рад/с; φ_{i_i} – угол между плоскостью XOZ и радиус-вектором \bar{r}_i в момент времени τ_n , рад. Знак «+» принимается при вращении ШК в направлении сплошной стрелки (рис. 20, *б*), т.е. при встречном шлифовании; знак «-» – при вращении в направлении штриховой стрелки, т.е. при попутном шлифовании.

Подставив выражение (36) в систему (35), получим:

$$\begin{cases} x_i = r_i \cdot \cos(\varphi_{n_i} \pm \omega_{кр} \cdot \tau) + V_3 \cdot \tau; \\ y_i = r_i \cdot \sin(\varphi_{n_i} \pm \omega_{кр} \cdot \tau) + \Delta y(\tau); \\ z_i = z_{n_i}. \end{cases} \quad (37)$$

В момент времени, когда $M_i \in \alpha$

$$x_i = \Delta x, \quad (38)$$

где Δx – расстояние между плоскостями ZOY и α . Из $\triangle OAB$ (рис. 20, *a*) следует:

$$\Delta x = \sqrt{(OB)^2 - (OA)^2}; \quad (39)$$

$$OB = R_{кр}; \quad (40)$$

$$OA = R_{кр} - t, \quad (41)$$

где $R_{кр}$ – радиус ШК, мм; t – глубина шлифования за рабочий ход, мм.

Подставив выражения (41) и (40) в формулу (39), получим:

$$\Delta x = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t - t^2} \quad (42)$$

Подставим равенство (38) в первое уравнение системы (37):

$$\Delta x = r_i \cdot \cos(\varphi_{i_i} \pm \omega_{\text{до}} \cdot \tau) + V_3 \cdot \tau. \quad (43)$$

Из полученного равенства (43) можно найти моменты времени, когда вершины зёрен находятся в плоскости α (принимая $i = 1, 2, \dots, N_{\text{PC}}$). Далее можно определить соответствующие координаты y и z вершин зёрен (система (37)).

Процесс формирования поперечного микропрофиля детали в плоскости α закончится тогда, когда ШК переместится относительно неё на расстояние $2 \cdot \Delta x$. Следовательно,

$$\tau \in \left[0; \frac{2 \cdot \Delta x}{V_3} \right]. \quad (44)$$

Взаимодействие зёрен с участком заготовки PQ возможно, если полученные значения τ удовлетворяют следующим условиям

$$y_i(\tau) < -(R_{\text{кр}} - t); \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{PC}}. \quad (45)$$

Из полученных значений τ отбросим те, которые не удовлетворяют условиям (44), (45). Оставшиеся моменты времени определяют последовательность прохождения вершин зёрен через поперечное сечение заготовки. Следовательно, эти моменты времени устанавливают соответствие между точками $C_1, \dots, C_j, \dots, C_{N_\alpha}$ (рис. 18) и точками $M_1, \dots, M_i, \dots, M_{N_{\text{DN}}}$ (рис. 19). Из построения систем $OXYZ$ и $O'Y'Z'$ можно определить следующие зависимости между координатами вершины зерна в плоскости α :

$$y' = y; \quad (46)$$

$$z' = z. \quad (47)$$

Для чистовых и тонких режимов шлифования характерно истирание вершин зёрен и отделение от них мелких частиц абразива [84]. Так как состояние РП большинства деталей формируется на чистовых и тонких режимах шлифования, то необходимо учесть наличие площадок износа у рабочих частей зёрен. Пусть ШК в момент времени τ_n имеет некоторый радиальный износ u . Тогда линейный износ i -ой РЧ зерна $h_{\text{ис}i}$ можно определить следующим образом (рис. 20):

$$h_{\text{из}i} = \begin{cases} r_i - R_{\text{кр}}, & r_i > R_{\text{кр}}; \\ 0, & r_i \leq R_{\text{кр}}; \end{cases} \quad (48)$$

$$R_{\text{кр}} = R_{\text{крн}} - u, \quad (49)$$

где $R_{\text{крн}}$ – радиус ШК после правки, мм.

Таким образом, в данном параграфе разработана кинематическая модель плоского шлифования периферией ШК. Данная модель позволяет установить связь между координатами вершины РЧ зерна в момент начала формирования

поперечного микропрофиля детали в заданной плоскости α и координатами вершины РЧ зерна в момент её нахождения в этой плоскости.

2.3 Кинематическая модель процесса круглого шлифования

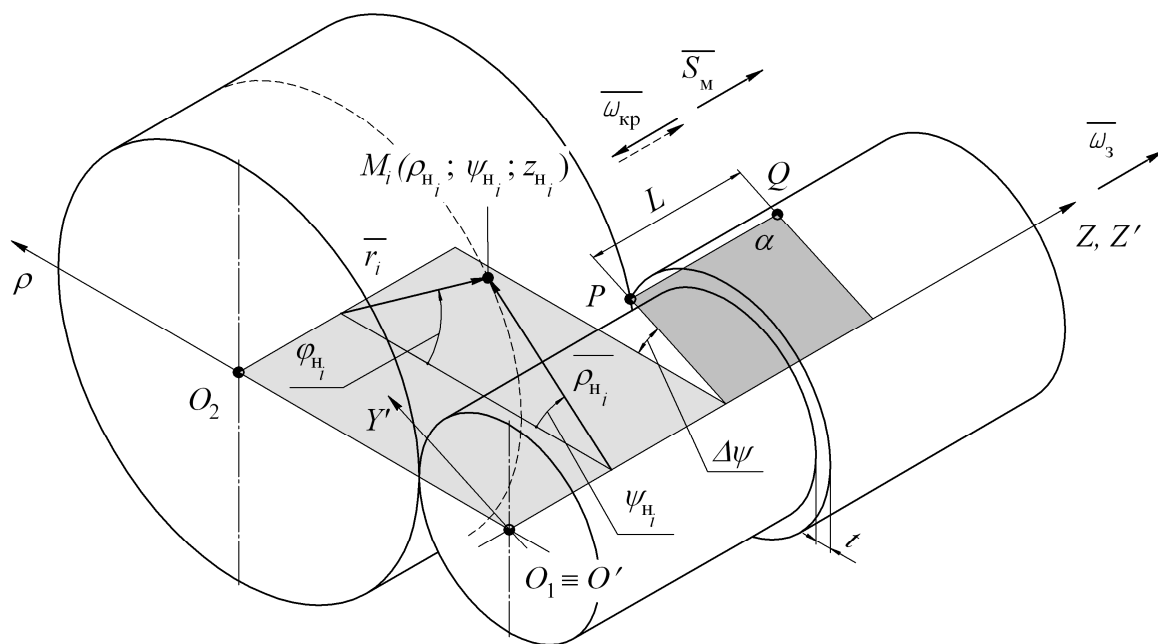
Рассматриваемые в настоящем параграфе задачи аналогичны тем, что были поставлены в предыдущем параграфе.

Рассмотрим процесс круглого шлифования с продольной подачей (рис. 22). Представим его следующим образом: ШК вращается вокруг своей оси с угловой скоростью $\omega_{кр}$, одновременно вращаясь вокруг оси неподвижной заготовки с угловой скоростью ω_3 , и движется вдоль неё со скоростью продольной подачи S_m .

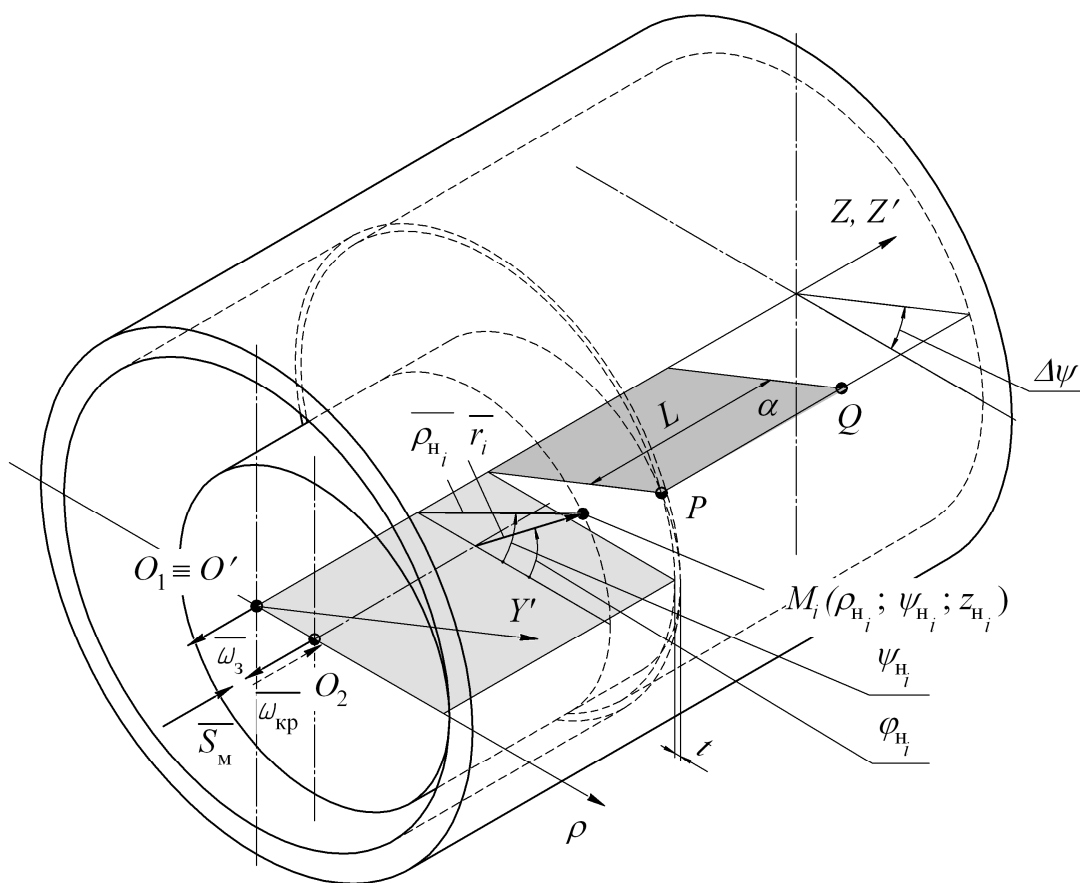
Свяжем цилиндрическую систему координат $O_1\rho\psi Z$ с заготовкой: ось Z направлена в тело заготовки и совпадает с её осью, ось ρ лежит в плоскости торца заготовки, положительные значения координаты ψ отсчитываются в направлении по часовой стрелке при наружном шлифовании (рис. 22, а) и против часовой стрелки – при внутреннем (рис. 22, б). Плоскость $\rho O_1 Z$ совпадает с горизонтальной осевой плоскостью заготовки. Моменты времени, когда ось ШК находится в левой полуплоскости $\rho O_1 Z$ при наружном шлифовании и в правой полуплоскости – при внутреннем, обозначим τ_{i_k} , где k – номер оборота ШК вокруг оси $O_1 Z$. Осевая плоскость заготовки, которая в моменты времени τ_{i_k} проходит через линию пересечения обрабатываемой поверхности с номинальной режущей поверхностью ШК, обозначим α . Положение вершины i -го зерна РЧ круга в системе $O_1\rho\psi Z$ обозначим точкой $M_i(\rho_i; \psi_i; z_i)$.

Свяжем систему координат $OY'Z'$ в плоскости α с системой $O_1\rho\psi Z$ следующим образом: оси OZ' и O_1Z совпадают, ось OY' совпадает по направлению с проекцией оси $O_1\rho$ на плоскость α .

Будем считать, что момент времени $\tau_{i_1} = 0$ соответствует относительному положению ШК и заготовки, при котором их торцы расположены в одной плоскости. В момент времени τ_{i_1} : $\rho_i = \rho_{i_1}$, $\psi_i = \psi_{i_1}$, $z_i = z_{i_1}$.



а)



б)

Рис. 21. Относительное положение ШК и заготовки в момент времени τ_{i1}
а – наружное круглое шлифование; б – внутреннее круглое шлифование

Рассмотрим процесс формирования поперечного микропрофиля детали в плоскости α на участке PQ длиной L (рис. 21). Момент времени τ_{i_1} соответствует началу этого процесса. Определим положение точки $M_i(\rho_i; \psi_i; z_i)$ в произвольный момент времени $\tau \geq 0$ (рис. 23, 24):

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{(O_1F)^2 + (M_iF)^2} + \Delta\rho(\tau); \\ \psi_i = \angle M_iO_1F + \omega_3 \cdot \tau; \\ z_i = z_{n_i} + S_m \cdot \tau; \end{cases} \quad (50)$$

$$\Delta\rho(\tau) = A \cdot \sin(\omega_k \cdot \tau + \theta_0),$$

где A , ω_k , θ_0 – амплитуда (мм), частота (рад/с) и начальная фаза колебаний ШК (рад) соответственно [58].

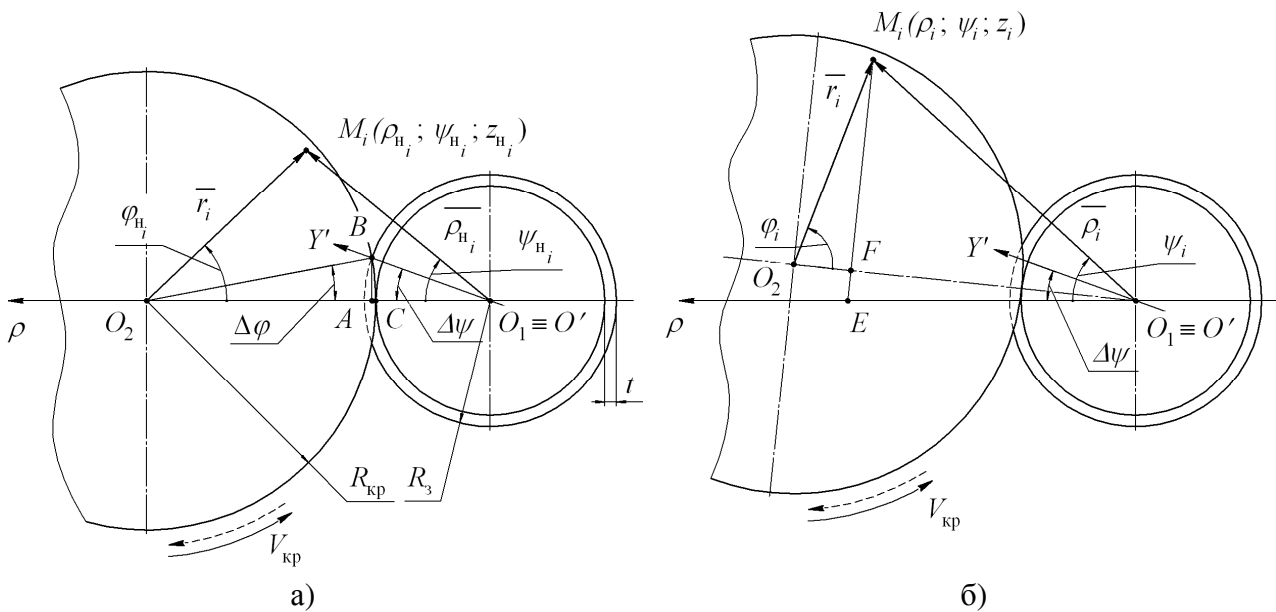


Рис. 22. Положение ШК и заготовки при наружном круглом шлифовании (вид спереди)
а – в момент времени τ_{i_1} ; б – в момент времени τ (показано встречное шлифование)

Из прямоугольных ΔO_1FM_i и ΔO_2FM_i следует:

$$O_1F = O_1O_2 \mp O_2F; \quad (51)$$

$$O_1O_2 = R_3 \pm R_{kp} \mp t; \quad (52)$$

$$O_2F = r_i \cdot \cos(\varphi_i); \quad (53)$$

$$M_iF = r_i \cdot \sin(\varphi_i); \quad (54)$$

$$\angle M_iO_1F = \arctg\left(\frac{M_iF}{O_1F}\right), \quad (55)$$

где R_3 – радиус заготовки, мм; φ_i – угол между плоскостью, проходящей через оси ШК и заготовки, и радиус-вектором \bar{r}_i точки M_i в момент времени τ , рад.

Верхние знаки в выражениях (52) и (51) соответствуют наружному шлифованию, нижние – внутреннему.

Определим угол φ_i :

$$\varphi_i = \varphi_{i_i} \pm \omega_{кр} \cdot \tau, \quad (56)$$

где φ_{i_i} – угол между плоскостью, проходящей через оси ШК и заготовки, и радиус-вектором \bar{r}_i точки M_i в момент времени τ_{i_1} (рис. 21 – 24), рад.

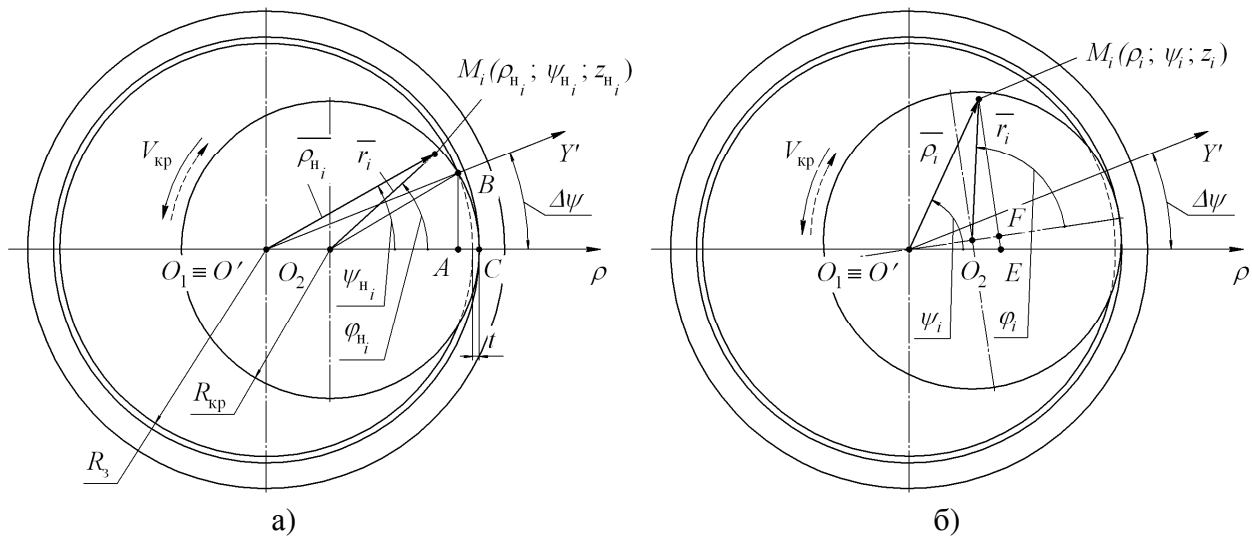


Рис. 23. Положение ШК и заготовки при внутреннем круглом шлифовании (вид спереди):

а – в момент времени τ_{i_1} ; б – в момент времени τ (показано встречное шлифование)

После подстановки выражений (51) – (56) в систему (50) получаем:

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{r_i^2 \mp 2 \cdot r_i \cdot (R_3 \pm R_{кр} \mp t) \cdot \cos(\varphi_{hi} \pm \omega_{кр} \cdot \tau) + (R_3 \pm R_{кр} \mp t)^2} + \Delta\rho(\tau); \\ \psi_i = \arctg \left(\frac{r_i \cdot \sin(\varphi_{hi} \pm \omega_{кр} \cdot \tau)}{(R_3 \pm R_{кр} \mp t) \mp r_i \cdot \cos(\varphi_{hi} \pm \omega_{кр} \cdot \tau)} \right) + \omega_3 \cdot \tau; \\ z_i = z_{hi} + S_m \cdot \tau. \end{cases} \quad (57)$$

Двойные знаки, стоящие перед угловой скоростью ШК $\omega_{кр}$, учитывают относительное движение ШК и заготовки: верхний знак соответствует встречному шлифованию, нижний – попутному. Остальные двойные знаки учитывают вид шлифования: верхний знак соответствует наружному шлифованию, нижний – внутреннему.

Процесс формирования поперечного микропрофиля детали на участке PQ закончится тогда, когда ШК переместится вдоль заготовки на расстояние $(H_{кр} + L)$. При этом ШК пройдет через участок PQ $N_{кр}$ раз:

$$N_{кр} = \frac{H_{кр} + L}{S_o}, \quad (58)$$

где $H_{кр}$ – высота ШК, мм; S_0 – подача ШК на оборот заготовки, мм/об. Если число в правой части выражения (58) получается дробным, то его необходимо округлить до ближайшего большего целого.

Угол между плоскостями $\rho O_1 Z$ и α обозначим $\Delta\psi$. В момент времени, когда $M_i \in \alpha$, имеем:

$$\psi_i = \Delta\psi + 2 \cdot \pi \cdot (k - 1); \quad (59)$$

где k – номер прохода ШК через участок PQ ($k = 1, 2, \dots, N_{кр}$); $\Delta\psi$ – угол между плоскостями $\rho O_1 Z$ и α . Определим $\Delta\psi$. Из прямоугольных $\Delta O_1 A B$ и $\Delta O_2 A B$ (рис. 22, а и 23, а) следует:

$$\Delta\psi = \arccos\left(\frac{O_1 A}{O_1 B}\right); \quad (60)$$

$$O_1 B = R_3; \quad (61)$$

$$O_1 A = R_3 \mp t \pm AC. \quad (62)$$

Найдём AC . Из прямоугольных $\Delta O_1 A B$ и $\Delta O_2 A B$ следует:

$$\begin{cases} O_1 B^2 = O_1 A^2 + AB^2; \\ O_2 B^2 = O_2 A^2 + AB^2; \end{cases} \quad (63)$$

$$O_2 B = R_{кр}; \quad (64)$$

$$O_2 A = R_{кр} - AC. \quad (65)$$

После подстановки выражений (65), (64), (62), (61) в систему (63) получаем:

$$\begin{cases} R_3^2 = (R_3 \mp t \pm AC)^2 + AB^2; \\ R_{кр}^2 = (R_{кр} - AC)^2 + AB^2. \end{cases} \quad (66)$$

Решая систему (66), находим отрезок AC :

$$AC = \frac{2 \cdot (R_3 \mp t) \cdot t \pm t^2}{2 \cdot (R_3 \pm R_{кр} \mp t)}. \quad (67)$$

Далее, подставляя формулы (67), (62) и (61) в формулу (60), получаем:

$$\Delta\psi = \arccos\left[1 - \frac{2 \cdot R_{кр} \cdot t - t^2}{2 \cdot R_3 \cdot (R_3 \pm R_{кр} \mp t)}\right]. \quad (68)$$

Подставим равенство (59) во второе уравнение системы (57):

$$\Delta\psi + 2 \cdot \pi \cdot (k - 1) = \arctg\left(\frac{r_i \cdot \sin(\varphi_{H_i} \pm \omega_{кр} \cdot \tau)}{(R_3 \pm R_{кр} \mp t) \mp r_i \cdot \cos(\varphi_{H_i} \pm \omega_{кр} \cdot \tau)}\right) + \omega_{д} \cdot \tau. \quad (69)$$

Из полученного равенства (69) найдём моменты времени, когда вершины зёрен находятся в левой полуплоскости α при наружном шлифовании и правой – при внутреннем (принимая $k = 1, 2, \dots, N_{кр}$ и $i = 1, 2, \dots, N_{PC}$). Далее определим соответствующие координаты ρ и z вершин зёрен (система (57)).

Момент времени, соответствующий началу k -го прохода ШК через участок PQ , равен:

$$\tau_{i_k} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{\omega_c}; k = 1, 2, \dots, N_{кр}. \quad (70)$$

Процесс формирования поперечного микропрофиля детали на участке PQ прерывается тогда, когда ШК поворачивается вокруг заготовки на угол $2 \cdot \Delta\psi$ (рис. 22, 23). Следовательно, момент времени, соответствующий окончанию k -го прохода ШК через участок PQ , равен

$$\tau_{\kappa_k} = \tau_{H_k} + \frac{2 \cdot \Delta\psi}{\omega_3}. \quad (71)$$

Из полученных значений τ (равенство (69)) отбросим те, которые выходят за границы интервалов

$$\tau \in [\tau_{H_k}; \tau_{\kappa_k}], k = 1, 2, \dots, N_{кр}. \quad (72)$$

Взаимодействие зёрен с участком заготовки PQ возможно, если полученные значения τ удовлетворяют следующим условиям (рис. 22, 23):

$$\rho_i(\tau) \begin{matrix} < \\ > \end{matrix} R_3; \quad (73)$$

$$z_i(\tau) \in [(H_{кр} - 0,5 \cdot d_{\max}); (H_{кр} + L + 0,5 \cdot d_{\max})]. \quad (74)$$

Верхние знаки соответствуют наружному шлифованию, нижние – внутреннему. Максимальный размер зерна ШК d_{\max} в мм можно определить по формуле (8) [4].

Из полученных значений τ (равенство (69)) отбросим те, для которых условия (73) и (74) не выполняются.

Оставшиеся моменты времени, удовлетворяющие условиям (72) – (74), определяют последовательность прохождения вершин зёрен через участок PQ . Следовательно, эти моменты времени устанавливают соответствие между точками $C_1, \dots, C_j, \dots, C_{N_\alpha}$ (рис. 18) и точками $M_1, \dots, M_i, \dots, M_{N_{\text{ДН}}}$ (рис. 21). Из построения систем $O_1\rho\psi Z$ и $O'Y'Z'$ можно определить следующие зависимости между координатами вершины зерна в плоскости α :

$$y' = \rho; \quad (75)$$

$$z' = z. \quad (76)$$

Если ШК во время прохождения участка PQ имеет некоторый радиальный износ u , то линейный износ i -ой РЧ зерна можно определить с помощью системы (48).

Таким образом, в данном параграфе разработана кинематическая модель процесса круглого шлифования. Данная модель позволяет установить связь

между координатами вершины РЧ зерна в момент начала формирования поперечного микропрофиля детали в заданной плоскости α и координатами вершины РЧ зерна в момент её нахождения в этой плоскости.

2.4 Моделирование рабочего слоя шлифовального круга

Величины r_i , φ_{n_i} и z_{n_i} в системах (37) и (57) являются случайными. Эти данные являются исходными для моделирования траектории движения РЧ зерна в пространстве и в конечном итоге для определения положения вершины РЧ в момент прохождения плоскости α . Таким образом, необходимо моделировать РС круга. В ходе данного моделирования необходимо решить следующие задачи: 1) определить величины r_i , φ_{n_i} и z_{n_i} для i -ой вершины РЧ зерна РС; 2) определить число зёрен в РС $N_{РС}$.

Из определения РС следует, что при его моделировании величины r_i , φ_{n_i} и z_{n_i} должны удовлетворять следующим требованиям:

$$r_i \in [R_{крн} - h_{РС}; R_{крн}]; \quad (77)$$

$$\varphi_{n_i} \in [0; 2 \cdot \pi]; \quad (78)$$

$$z_{n_i} \in [0; H_{кр}]; \quad (79)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{РС}.$$

В качестве закона распределения величины r_i примем закон β -распределения, что соответствует экспериментальным исследованиям Л.Н. Филимонова [83]. Параметры β -распределения и глубину РС $h_{РС}$ определим из [83], а также в ходе дальнейших экспериментальных исследований (п. 2.4). В качестве закона распределения величин φ_{n_i} и z_{n_i} примем равномерный в силу требования равномерности распределения зёрен ШК в осевом и окружном направлении.

Для решения поставленных в начале параграфа задач предлагается сначала моделировать НС глубиной $h_{НС} \geq 2 \cdot d_{\max}$, а затем выделить в нём зёрна, вершины которых попадают в РС, т.е. удовлетворяют условиям (77) – (79). Среднее число зёрен в НС круга можно определить через штучную плотность зёрен n_{AM} , под которой будем понимать их число в единице веса шлифовального материала, шт./г:

$$N_{НС} = m_{AM} \cdot n_{AM}, \quad (80)$$

где m_{AM} – масса шлифовального материала в НС, г:

$$m_{AM} = \rho_{AM} \cdot V_{AM}, \quad (81)$$

где ρ_{AM} – плотность абразивного материала, г/мм³; V_{AM} – объём абразивного материала в НС, мм³. Для электрокорунда $\rho_{AM} = 3,95 \cdot 10^{-3}$ г/мм³, для карбида кремния $\rho_{AM} = 3,18 \cdot 10^{-3}$ г/мм³ [20]. Найдём объём абразивного материала в НС [72]:

$$V_{AM} = \frac{62 - 2 \cdot C_y}{100} \cdot V_{НС}, \quad (82)$$

где C_y – номер структуры ШК (приложения 8, 9); $V_{НС}$ – объём НС, мм³. Найдём объём НС круга прямого профиля:

$$V_{НС} = \pi \cdot R_{кр}^2 \cdot H_{кр} - \pi \cdot (R_{кр} - h_{НС})^2 \cdot H_{кр}$$

или

$$V_{НС} = \pi \cdot h_{НС} \cdot (2 \cdot R_{кр} - h_{НС}) \cdot H_{кр}. \quad (83)$$

Подставляя формулы (81) – (83) в формулу (80), получим:

$$N_{НС} = \pi \cdot (2 \cdot R_{кр} - h_{НС}) \cdot H_{кр} \cdot h_{НС} \cdot \rho_{AM} \cdot \frac{62 - 2 \cdot C_y}{100} \cdot n_{AM}. \quad (84)$$

Теоретическую штучную плотность можно найти через средний объём АЗ V_3

$$n_{AM} = \frac{1}{\rho_{AM} \cdot V_3}.$$

Средний объём V_3 можно определить через средний размер АЗ d_{cp} , предварительно задав форму зёрен ШК. В случае моделирования АЗ шаром

$$V_3 = \frac{\pi \cdot d_{cp}^3}{6}.$$

Тогда

$$n_{AM} = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{1}{\rho_{AM} \cdot d_{cp}^3}. \quad (85)$$

В случае моделирования АЗ кубом

$$V_3 = d_{cp}^3.$$

Тогда

$$n_{AM} = \frac{1}{\rho_{AM} \cdot d_{cp}^3}. \quad (86)$$

Теоретические значения n_{AM} , определённые по формулам (85) и (86) отличаются в 1,91 раза. Экспериментальные значения параметра n_{AM} для различных шлифовальных материалов и зернистостей представлены в табл. 1.

Штучная плотность различных шлифовальных материалов

Зернистость	Штучная плотность, шт./г				
	Г.М. Ипполитов [20]		В.В. Федотов[94]		
	Электрокорунд	Карбид кремния	14А	53С	63С
F90 (16)	75000	90000	–	90856	84350
F70 (20)	–	–	37055	43643	37028
F60 (25)	19500	23000	20468*	24525*	26409*
F54 (32)	–	–	12863*	16835*	18173*
F40 (40)	6700*	7300*	4524	8663*	5480
F36 (50)	2300	3000	–	2960	5359*
F30 (63)	–	–	–	2007*	1919*
F24 (80)	700*	1000*	542	–	–

Анализ данных табл. 1. показал, что экспериментальные значения штучной плотности n_{AM} в большинстве случаев находятся между теоретическими значениями, рассчитанными по формулам (85) и (86). Исключения составляют значения, отмеченные знаком «*». Отбросим их, как не вызывающие доверия. Оставшиеся экспериментальные данные будем использовать для дальнейших расчётов.

При моделировании НС вершины рабочих частей зёрен должны находиться внутри сфер, описывающих зёрна. С учётом принятого в начале главы 3 допущения 2 можно записать

$$r_i \in [r_i^*; r_i^* + 0,5 \cdot d_{oc_i}]; \quad (87)$$

$$\varphi_{n_i} = \varphi_n^*; \quad (88)$$

$$z_{n_i} = z_n^*; \quad (89)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{НС},$$

где r_i^* , $\varphi_{n_i}^*$ и $z_{n_i}^*$ – параметры, определяющие положение центра описанной сферы АЗ в пространстве (аналоги параметров r_i , φ_{n_i} и z_{n_i} вершины РЧ зерна); d_{in_i} – диаметр описанной сферы i -го АЗ, мм. В качестве закона распределения параметров случайных величин r_i^* , $\varphi_{n_i}^*$ и $z_{n_i}^*$ примем равномерный в силу равномерности распределения центров зёрен в ШК [3]. При этом

$$r_i^* \in [R_{крн} - h_{НС}; R_{крн}];$$

$$\varphi_{n_i}^* \in [0; 2 \cdot \pi];$$

$$z_{n_i}^* \in [0; H_{кр}].$$

В качестве закона распределения диаметра описанной сферы d_{oc_i} i -го АЗ примем нормальный с параметрами, указанными в [1]. При этом

$$d_{oc_i} \in [d_{\min}; d_{\max}],$$

где d_{\min} – минимальный размер АЗ (формула (7)), мм.

При определении положения центров описанных сфер зёрен НС необходимо обеспечить отсутствие их пересечения в пространстве. Для этого необходимо выполнение следующего условия:

$$\sqrt{\left(x_{n_i}^* - x_{n_n}^*\right)^2 + \left(y_{n_i}^* - y_{n_n}^*\right)^2 + \left(z_{n_i}^* - z_{n_n}^*\right)^2} \geq 0,5 \cdot (d_{oc_i} + d_{oc_n}), \quad (90)$$

где $x_{i_i}^* = r_i^* \cdot \cos(\varphi_{n_i}^*)$; $y_{n_i}^* = r_i^* \cdot \sin(\varphi_{n_i}^*)$; $x_{n_n}^* = r_n^* \cdot \cos(\varphi_{n_n}^*)$; $y_{n_n}^* = r_n^* \cdot \sin(\varphi_{n_n}^*)$; $i = 1, 2, \dots, (N_{НС} - 1)$; $n = (i + 1), (i + 2), \dots, N_{НС}$.

2.5 Определение закона распределения вершин неровностей рабочей поверхности шлифовального круга по глубине

В п. 2.3 в качестве закона разновысотности вершин зёрен РП круга был принят закон β -распределения. Для моделирования РС необходимо знать параметры данного распределения в зависимости от характеристики ШК и режимов правки. Данные параметры для кругов с зёрнами из белого электрокорунда 24А и эльбора ЛО и ЛД представлены в работе Л.Н. Филимонова [83]. Информация о кругах из карбида кремния отсутствует. При этом условия правки кругов с зёрнами из одного и того же шлифовального материала были одинаковыми. Возникает необходимость дополнить результаты экспериментов Л.Н. Филимонова.

Существует достаточно много методов экспериментального исследования РП круга. Классификация этих методов дана в работах [54, 75]. Можно выделить следующие основные методы:

- метод профилографирования [83, 85];
- метод царапания наклонной поверхности заготовки неподвижным или вращающимся кругом [3, 83];
- метод светового сечения [14, 60];
- метод отпечатков вершин зёрен при прокатывании круга по тонкой пластине [4].

Наибольшее распространение при изучении модели РП получил метод профилографирования. Существенным недостатком этого метода является пря-

молинейное перемещение иглы, которая двигается не по вершинам зёрен, а по их боковым сторонам. Кроме того, логично предположить в РП наличие впадин, куда не может проникнуть алмазная игла профилографа.

Для того чтобы учесть случайность записи и определить истинный рельеф РП применяют два способа: производят запись с помощью параллельных сечений или записывают достаточно длинные профилограммы и определяют статистические характеристики РП [83, 85 и др.].

При методе светового сечения используется оптический микроскоп с увеличением до 100 раз. Разрешающая способность оптического микроскопа недостаточна для получения надёжной информации.

Следует отметить, что методами профилографирования и светового сечения нельзя выделить связку на профилограмме РП. В связи с этим данные методы целесообразно применять для алмазных и эльборовых инструментов на эластичных и металлических связках, у которых уровень связки задан явно.

С достаточной степенью точности разделить зёрна и связку позволяют метод царапания и метод отпечатков, однако с их помощью можно исследовать лишь часть РП, в которую попадают наиболее удалённые от оси ШК вершины зёрен. В этом случае отсутствует перекрытие следов зёрен на поверхности пластин-образцов.

Согласно [54, 75] методы исследования топографии поверхности инструмента пока разработаны слабо и являются весьма трудоёмкими. В ходе проведённого нами анализа априорной информации не было найдено работ, посвящённых исследованию топографии. На наш взгляд, топография поверхности позволит более точно оценить рельеф РП круга.

Целью данного параграфа является оценка статистических характеристик участков топографии шлифовальных кругов различных характеристик, полученных методом параллельных сечений. В рамках данного параграфа были решены следующие задачи:

- 1) спроектирована и собрана экспериментальная установка по получению топограмм кругов;
- 2) разработан план экспериментов по профилографированию шлифовальных кругов;
- 3) проведены эксперименты согласно разработанному плану;
- 4) обработаны полученные экспериментальные данные;
- 5) определен закон разнорысотности вершин неровностей рабочих поверхностей шлифовальных кругов;

б) получена оценка распределения материала неровностей шлифовальных кругов по глубине РП с помощью кривых относительных опорных площадей;

7) сделаны выводы по проделанной работе.

Для топографирования участка РП круга использовали метод профилографирования, который был реализован с помощью профилографа модели 170623 производства завода «Калибр» и специального приспособления (рис. 25, 26). Угол конуса ощупывающей иглы составлял $90^{\circ}_{-10}^{+5}$, радиус кривизны вершины иглы – $(10 \pm 2,5)$ мкм.

Описание экспериментальной установки. На столе-стойке 1 профилографа устанавливали призмы 2. На призмы устанавливали вал 3 с ШК 4. Вал с помощью резьбы соединяли с рычагом 6. Конец рычага опирался на торец ходового винта 8 микрометра 7, закрепляемого в штативе 9.

На расстоянии L_p от оси вала на рычаг опиралась индикаторная головка 5, закрепляемая с помощью гибкой стойки 10.

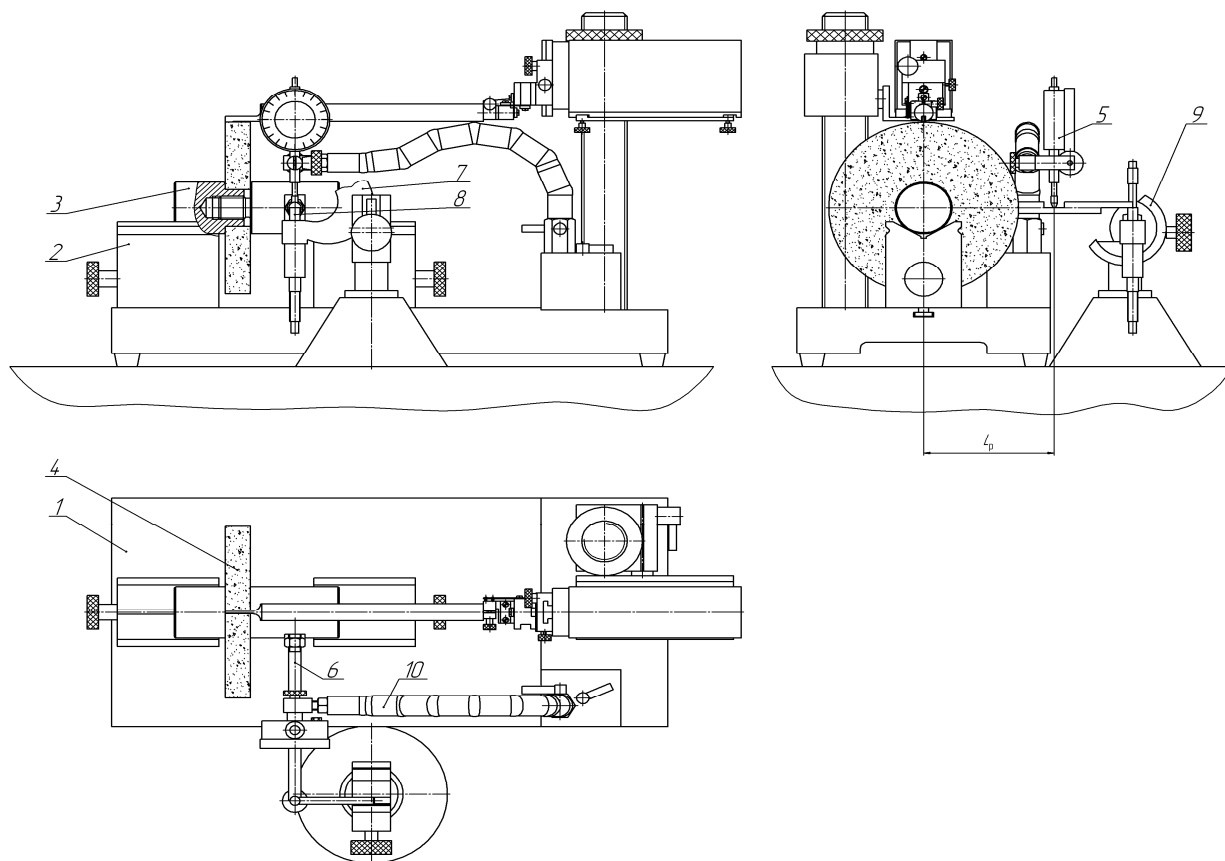


Рис. 24. Схема экспериментальной установки для профилографирования ШК

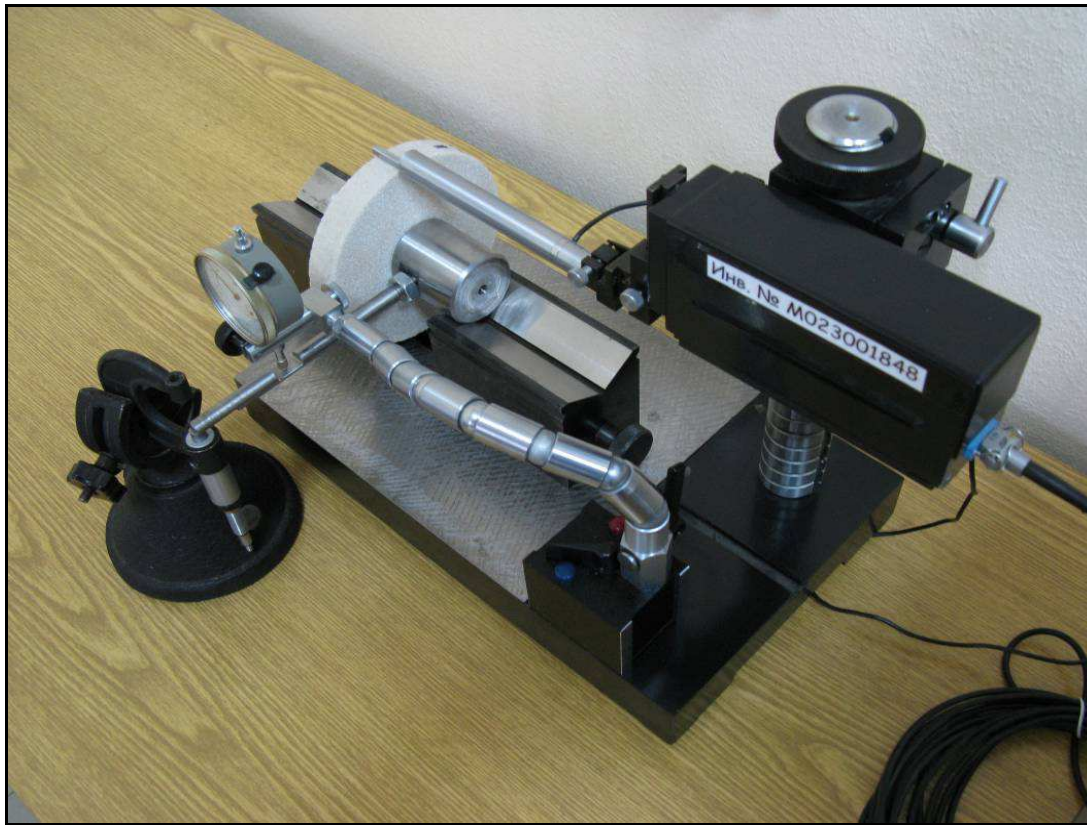


Рис. 25. Фотография экспериментальной установки для топографирования ШК

План проведения эксперимента. С помощью профилографа осуществляли «ощупывание» РП круга в осевом направлении. Далее ШК поворачивали на малый угол ($3...10'$) и цикл повторяли. В результате многократного осуществления цикла получали ряд профилограмм (не менее 20), по которым строили трехмерную модель участка РП (топограмму).

Поворот рычага b осуществляли с помощью микрометрического винта δ , который воздействовал на него с усилием \vec{P} в точках $A_0, A_1, \dots, A_i, \dots$ (рис. 27). Эти точки принадлежат одной вертикали. Угол, на который поворачивали рычаг с ШК перед снятием очередной профилограммы, рассчитывали по следующей формуле:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta l}{R_{кр}},$$

где Δl – расстояние между соседними профилограммами, мм. Расстояние Δl выбирали таким образом, чтобы через АЗ среднего диаметра d_{cp} проходило 4 – 5 профилей:

$$\Delta l = \frac{d_{cp}}{4...5}.$$

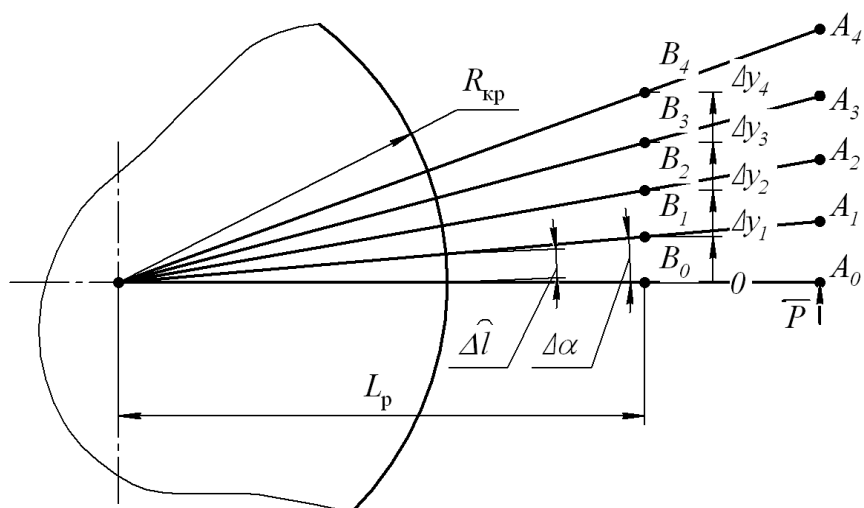


Рис. 26. Схема для определения перемещений Δy_i индикаторной головки

Индикаторная головка контактировала с рычагом в точках $B_0, B_1, \dots, B_i, \dots$, которые также принадлежат одной вертикали. Зная $\Delta\alpha$, можно рассчитать перемещение Δy_i , которое должна совершить индикаторная головка ИЧ10 перед снятием i -ой профилограммы:

$$\Delta y_i = L_p \cdot [\operatorname{tg}(i \cdot \Delta\alpha) - \operatorname{tg}((i - 1) \cdot \Delta\alpha)].$$

Характеристики исследованных ШК представлены в приложении 15. Правка осуществлялась алмазным карандашом с алмазами, расположенными цепочкой (карандаш 3908-0054 ГОСТ 607–80). Режимы выбирали в соответствии с рекомендациями [64]. Режимы представлены в приложении 10.

Некоторые круги после грубой правки использовали для шлифования пластин-образцов из стали 45 (НВ 170...180) в течение 3 минут (основное время) на универсально-заточном станке модели 3Е642Е без СОЖ. После шлифования круги подвергали травлению в соляной кислоте для очищения от стружки и затем профилографированию. Режимы шлифования пластин-образцов выбирали в соответствии с рекомендациями [72]. Окружная скорость ШК и пластины-образца были равны $V_{кр} = 22,5$ м/с и $V_3 = 10$ м/мин соответственно. Поперечная подача стола станка $S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход. Глубина обработки $t = 0,02$ мм.

Обработка и анализ полученных экспериментальных данных. Профилограф модели 170623 оснащён информационно-вычислительным блоком: компьютером со специальным программным обеспечением. Программное обеспечение позволяет экспортировать координаты точек снятых профилей в другие приложения. Построение и анализ моделей участков РП круга производили в математическом пакете MathCAD. В ходе анализа топограмм оценивали распределение вершин неровностей РП по глубине и относительную опорную площадь на различных уровнях.

Примеры топограмм рабочих поверхностей шлифовальных кругов представлены на рис. 28. Следует отметить, что коническая форма ошупывающей иглы и наличие радиуса при вершине приводят к искажению реальной топографии РП. С увеличением глубины её исследования и уменьшением зернистости ШК погрешность измерений растёт, поскольку уменьшаются размеры впадин реальной РП и игла профилографа не может туда попасть. Однако для моделирования РС важно минимальное искажение верхней части рельефа, поскольку согласно исследованиям [83] для наиболее распространённых кругов средней зернистости 16, 25, 40 (F90, F60, F40) в работе шлифования участвует лишь 0,05 – 0,10 часть всей глубины РП круга. Правка ШК также действует в основном на наружную часть его РП.

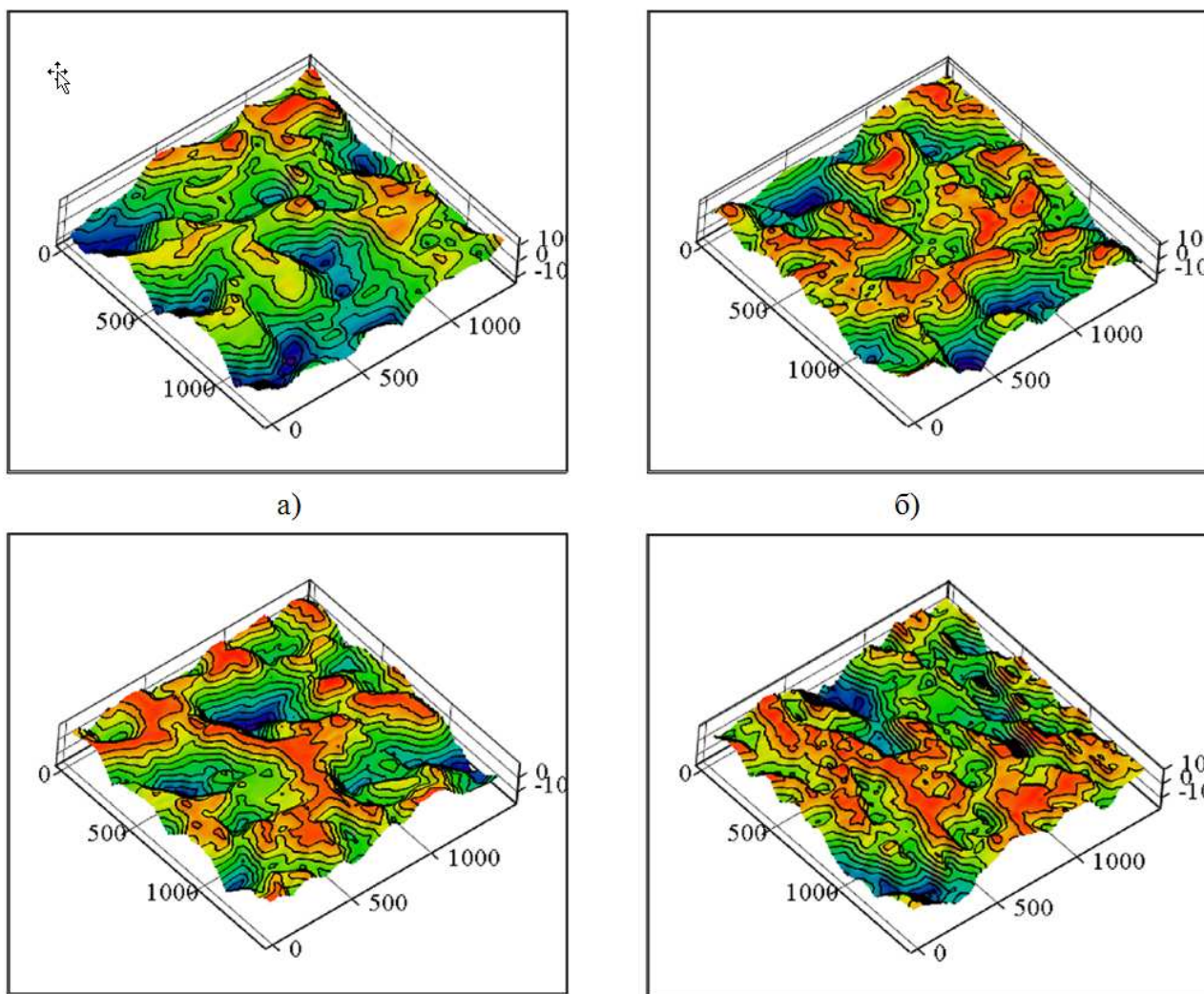


Рис. 27. Топограммы РП круга 1 125×16×32 25А 25-Н СМ2 7 К (WA F60 L 7 V)
 (красным цветом отмечаются возвышенные места, синим – впадины)
 а – новый круг; б – тонкая правка; в – грубая правка; г – после 3 мин. шлифования

Оценка распределения вершин неровностей РП круга по глубине. В соответствии с [83] в качестве закона распределения вершин неровностей рабочих поверхностей шлифовальных кругов был принят закон β -распределения. Функция плотности и интегральная функция β -распределения имеют следующий вид:

$$f_1(x) = \begin{cases} \frac{1}{\mu_1 - \mu_0} \cdot \frac{\Gamma(\gamma + \eta)}{\Gamma(\gamma) \cdot \Gamma(\eta)} \cdot \left(\frac{x - \mu_0}{\mu_1 - \mu_0}\right)^{\gamma-1} \cdot \left(1 - \frac{x - \mu_0}{\mu_1 - \mu_0}\right)^{\eta-1}, & \mu_0 \leq x \leq \mu_1; \\ 0 - \text{в остальных случаях;} \end{cases} \quad (91)$$

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & x < \mu_0; \\ \frac{\Gamma(\gamma + \eta)}{\Gamma(\gamma) \cdot \Gamma(\eta)} \cdot \int_0^{\frac{x - \mu_0}{\mu_1 - \mu_0}} t^{\gamma-1} \cdot (1-t)^{\eta-1} dt, & \mu_0 \leq x \leq \mu_1; \\ 1, & x > \mu_1, \end{cases} \quad (92)$$

где μ_0 и μ_1 – пределы изменения случайной величины x , мкм. Для определения коэффициентов аппроксимации γ и η был использован метод, изложенный в [83].

Параметры распределения вершин неровностей рабочих поверхностей различных кругов представлены в приложении 15. Некоторые кривые распределения представлены на рис. 29, *a – z*.

Проверку гипотезы о предполагаемом законе распределения производили с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 [10]. Значения критерия для заданной характеристики ШК и условий его правки представлены в приложении 15. Критические значения взяты при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Построение, аппроксимация и анализ кривых относительных опорных площадей. Введём в рассмотрение понятия опорной и относительной опорной площади. Опорная площадь рельефа S_p – сумма площадей сечений S_i рельефа поверхностью, эквидистантной номинальной поверхности, в пределах рассматриваемого участка площадью S :

$$S_p = \sum S_i.$$

Относительная опорная площадь t_S – отношение опорной площади рельефа к площади рассматриваемого участка:

$$t_S = \frac{S_p}{S}.$$

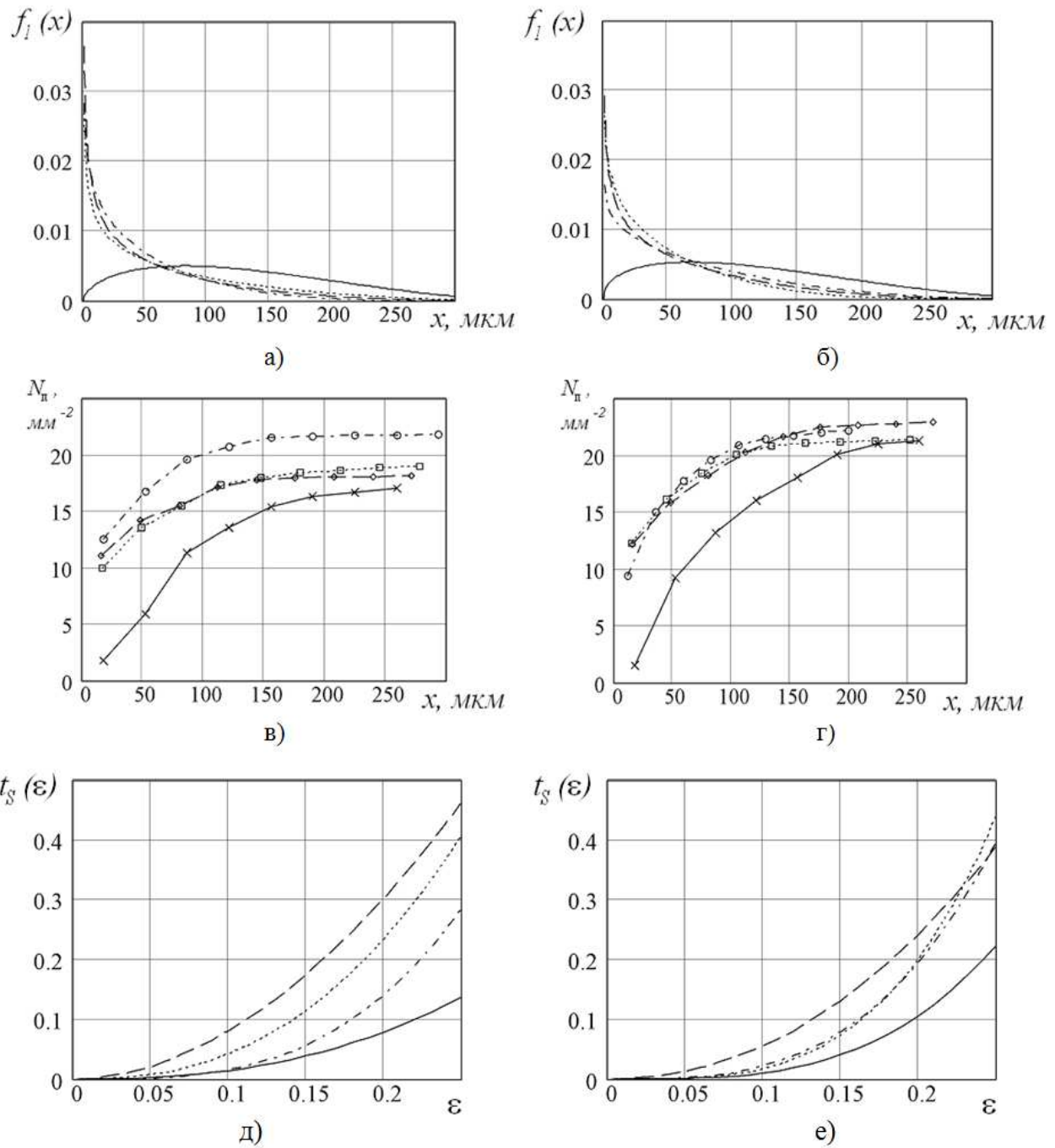


Рис. 28. Характеристики РП некоторых кругов

а, в, д – 1 125×16×32 25А 25-Н СМ2 7 К (WA F60 L 7 V); б, г, е – 1 125×20×32 64С 25-Н СМ1 7 К (GC F60 К 7 V); а, б – плотность распределения вершин неровностей РП круга; в, г – количество вершин неровностей на 1 мм² РП круга на различной глубине; д, е – кривые относительных опорных площадей; — новый ШК; тонкая правка; — — грубая правка; — · — · — 3 мин. шлифования

Опорную и относительную опорную площади определяют на уровне сечения рельефа p . Значение p отсчитывают от поверхности вершин. Поверхность вершин (впадин) – поверхность, эквидистантная номинальной и проходящая

через самую высокую вершину (самую глубокую впадину) реальной поверхности в пределах рассматриваемого участка площадью S .

В результате анализа моделей РП различных кругов были построены зависимости $t_S(\varepsilon)$, где ε – относительное расстояние между поверхностью выступов и секущей поверхностью. Параметр ε определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{P}{h_{PC}}.$$

В ходе анализа топограммы РП круга начальная часть кривой относительной опорной площади ($\varepsilon \leq 0,25$) аппроксимировали степенной функцией:

$$t_S(\varepsilon) = b_S \cdot \varepsilon^{v_S},$$

где b_S и v_S – параметры аппроксимации. Их можно определить различными методами [22].

Параметры b_S и v_S для различных рабочих поверхностей представлены в приложении 15. Некоторые кривые относительных опорных площадей представлены на рис. 28.

Проведённые экспериментальные исследования топограмм рабочих поверхностей кругов различных характеристик позволил сделать следующие выводы.

1) Получены параметры распределения вершин неровностей по глубине РП различных кругов и параметры кривых относительных опорных площадей в зависимости от режимов правки и с учётом износа (приложение 15).

2) Режимы правки кругов практически не влияют на распределение вершин неровностей по глубине РП (рис. 28, *a, б*) и их количество (рис. 28, *в, г*).

3) Режимы правки кругов влияют на размеры площадок износа вершин неровностей РП круга (рис. 27). Это отражается на форме кривых относительных опорных площадей $t_S(\varepsilon)$ (рис. 28, *д, е*). Таким образом, при моделировании РП круга необходимо задать износ РЧ каждого зерна в зависимости от её положения по глубине и режимов правки.

2.6 Алгоритмы реализации полученных моделей на ЭВМ

Использование разработанного комплекса математических моделей сопровождается большим количеством вычислений и применением довольно сложных математических процедур: решение уравнений численными методами, генерация случайных чисел и др. Данные вычисления целесообразно проводить только на ЭВМ. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритмов реализации созданных математических моделей на ЭВМ: 1) алгорит-

ма моделирования РС круга; 2) алгоритмов определения положения вершины РЧ зерна в рассматриваемой плоскости формирования поперечного микропрофиля детали при различных видах шлифования; 3) алгоритма моделирования поперечного микропрофиля детали.

2.6.1 Алгоритм реализации модели рабочего слоя шлифовального круга

Блок-схема алгоритма моделирования РС круга представлена в приложении 11. В блоке 2 указаны входные параметры. Далее вычисляется число зёрен $N_{НС}$, которые полностью содержатся в НС глубиной $h_{НС} = 2 \cdot d_{\max}$ (блок 3 и формула (84)). Затем НС «заполняется» сферами, описывающими зёрна (блоки 6 – 11), поскольку зёрна могут быть ориентированы произвольным образом. Значения параметров d_{OC} , r^* , φ_i^* и z_i^* можно получить путём формирования четырёх соответствующих массивов случайных чисел (блок 5).

Следует ожидать, что в созданных массивах случайных чисел будут содержаться параметры пересекающихся в пространстве сфер. В связи с этим количество случайных чисел N_3 в каждом массиве должно превышать число зёрен $N_{НС}$ в НС (блок 4). Предварительными экспериментами было установлено, что значение N_3 должно удовлетворять следующему неравенству:

$$N_3 \geq (15 \dots 20) \cdot N_{НС}.$$

Далее i -ая описанная сфера проверяется с n -ой описанной сферой на выполнение условия пересечения в пространстве (блоки 6 – 10). Если условие (90) выполняется, то параметру r_n^* центра описанной сферы n -го АЗ присваивается значение ноль (блок 11) и, таким образом, оно «удаляется» из НС.

«Заполнив» НС сферами, выделим среди них те, которые попадают в РС (блоки 13 – 16). Параметрам r_i^* остальных сфер присвоим значение ноль и в дальнейших расчётах использовать не будем.

Перейдём к определению положения вершин рабочих частей зёрен внутри сфер (блоки 17 – 24). Значения параметра r_i можно получить путём формирования массива случайных чисел r^{**} , подчиняющихся закону β -распределения вершин по глубине РС (блок 18). Для i -го зерна РС ($i = 1, 2, \dots, N_{РС}$) из данного массива выберем число, удовлетворяющее условию (87) (блок 21), и присвоим его параметру r_i вершины РЧ зерна (блок 22). В соответствующую ячейку массива r^{**} записывается значение ноль (блок 23) и далее она уже не используется для моделирования РС. Параметры φ_i и z_i определим по формулам (88) и (89)

(блок 22). Следует ожидать, что не все числа в созданном массиве будут удовлетворять условию (87). В связи с этим их количество случайных чисел в массиве $r^{**} N_{рч}$ должно превышать количество зёрен в РС $N_{рс}$ (блок 17). Предварительными экспериментами было установлено, что значение $N_{рч}$ должно удовлетворять следующему неравенству:

$$N_{рч} \geq (15 \dots 20) \cdot N_{рс}.$$

Параметры вершин рабочих частей зёрен сохраняются в памяти ЭВМ (блок 25). Они являются выходными данными (блок 24).

2.6.2 Алгоритм реализации кинематической модели процесса плоского шлифования

Блок-схема алгоритма определения координат вершин зёрен в плоскости α представлена в приложении 12. В блоках 2 и 3 указаны входные параметры. Далее определим фактический радиус ШК $R_{кр}$ перед обработкой шлифованием с учётом его радиального износа u (блок 4 и формула (49)).

Упорядочим множество зёрен РС следующим образом. Пронумеруем зёрна в порядке увеличения угла φ_n (блок 5).

Определим положение плоскости α (блок 7, формула (42)).

Алгоритм определения координат вершин зёрен в плоскости α содержит цикл. Цикл включает операции, заключенные в блоках 12 – 21. В результате его однократной реализации определим следующее: 1) время прохода i -го АЗ через плоскость α (блок 12); 2) проходит ли АЗ через участок заготовки PQ (блоки 13, 15); 3) координаты вершины РЧ зерна в системе OZY' и её износ (блоки 14, 16). Операции внутри цикла выполняются до тех пор, пока выполняется условие в блоке 13. Это условие соответствует проходу ШК через участок PQ .

Первым через участок PQ пройдёт АЗ, для которого угол φ_i^{**} между отрезком OB и радиус-вектором r_i вершины РЧ зерна в момент времени τ_n (рис. 20, *a*) максимален при встречном шлифовании и минимален при попутном шлифовании. Математически это можно выразить следующим образом (блок 10):

$$\varphi_i^{**} \rightarrow \begin{matrix} \max \\ (\min) \end{matrix} \text{ (целевая функция)}. \quad (93)$$

Угол φ_i^{**} измеряется в направлении против часовой стрелки и определяется следующим образом (блок 9):

$$\varphi_i^{**} = \begin{cases} \varphi_{H_i} - \left(\frac{3 \cdot \pi}{2} + \Delta\varphi \right), & \varphi_{H_i} \geq \frac{3 \cdot \pi}{2} + \Delta\varphi; \\ \varphi_{H_i} + \left(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right), & \varphi_{H_i} < \frac{3 \cdot \pi}{2} + \Delta\varphi, \end{cases}$$

где $\Delta\varphi = \angle AOB$ (рис. 20, *a*). Определим $\Delta\varphi = \angle AOB$:

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{OA}{OB}\right). \quad (94)$$

Подставив равенства (41) и (40) в формулу (94), получим:

$$\Delta\varphi = \arccos\left(1 - \frac{t}{R_{\text{эд}}}\right). \quad (95)$$

После определения номера i и параметров r_i , φ_i , z_i вершины зерна, для которой верно условие (93), найдём время $\tau = \tau_i$ её прохождения через плоскость α (уравнение (43), блок 12). Уравнение (43) решается численным методом. В качестве начального значения его корня можно принять (блок 11):

$$\tau_{\text{нач } i} = \tau_{\text{н}}. \quad (96)$$

Найденное значение τ_i проверим на выполнение условия (44) (блок 13). Если условие будет выполняться, определим соответствующие координаты y_i и z_i вершины РЧ зерна (первое и третье уравнение в системе (37), блок 14) и проверим их на выполнение условия (45) (блок 15), т.е. на принадлежность участку заготовки PQ . Если условие (45) будет выполнено, определим координаты точки $C_j(z'_j; y'_j)$ и величину износа РЧ соответствующего зерна (выражения (46), (47), (48), блоки 16, 17). Данные параметры сохраним в памяти ЭВМ (блок 18).

Перейдём к следующему зерну, которое пройдёт через плоскость α (блок 19). Зёрнам РС круга были присвоены номера в соответствии со значением угла $\varphi_{\text{н}}$ (блок 5). Следовательно, за i -м зерном РС последует $(i - 1)$ -е при встречном шлифовании и $(i + 1)$ -е при попутном шлифовании (блок 20, рис. 20).

Учитывая довольно большое количество зёрен на единице РП круга [1, 22], приходим к выводу, что промежуток времени между проходами через плоскость α i -го и $(i \mp 1)$ -го АЗ довольно мал (несколько миллисекунд). Тогда найденное время прохода через плоскость α произвольного АЗ можно использовать для определения времени прохода следующего за ним зерна (блок 21), т.е.

$$\tau_{\text{нач } i} = \tau_{(i \mp 1)}. \quad (97)$$

Как указывалось ранее, блоки 12 – 21 составляют цикл. Операции внутри цикла выполняются до тех пор, пока выполняется условие в блоке 13. Это условие соответствует проходу ШК через участок PQ .

Выходными данными представленного алгоритма являются координаты вершин и величина износа всех зёрен, прошедших через участок PQ в результате прохода через него ШК. Эти данные сохраняются в памяти ЭВМ (блок 18).

2.6.3 Алгоритм реализации кинематической модели процесса круглого шлифования

Блок-схема алгоритма определения координат вершин зёрен в плоскости α представлена в приложении 13. В блоках 2 и 3 указаны входные параметры. Далее определим фактический радиус ШК $R_{кр}$ перед обработкой шлифованием с учётом его радиального износа u (блок 4 и формула (49)).

Упорядочим множество зёрен РС следующим образом. Пронумеруем зёрна в порядке увеличения угла φ_n (блок 5).

Определим положение плоскости α (угол $\Delta\psi$ между плоскостями $\rho O_1 Z$ и α , блок 7, формула (68)) и число проходов ШК $N_{кр}$ через участок PQ (блоки 8 и 9, формула (58)).

Алгоритм определения координат вершин зёрен в плоскости α содержит два цикла, причем один является частью другого, т.е. является вложенным.

Первый (вложенный) цикл включает операции, заключенные в блоках 20 – 29. В результате его однократной реализации определим следующее: 1) время прохода i -го АЗ через плоскость α (блок 20); 2) проходит ли АЗ через участок заготовки PQ (блоки 21 – 23); 3) координаты вершины РЧ зерна в системе OZY' и её износ (блоки 24, 25). Операции внутри цикла выполняются до тех пор, пока выполняется условие в блоке 21. Это условие соответствует k -му проходу ШК через участок PQ .

Второй (сложный) цикл включает первый цикл и операции, заключенные в блоках 11 – 19. В результате однократной реализации сложного цикла определим все зёрна, прошедшие через участок PQ за время $\tau \in \left[\tau_{н_k}; \tau_{к_k} \right]$.

Рассмотрим более подробно структуру сложного цикла. Первым через участок PQ пройдёт АЗ, для которого угол φ_i^{**} между отрезком O_2B и радиус-вектором r_i вершины зерна (рис. 30) в момент времени τ_{i_k} максимален при встречном шлифовании и минимален при попутном шлифовании. Математически это можно выразить с помощью условия (93) (блок 17).

Угол φ_i^{**} измеряется в направлении против часовой стрелки и определяется следующим образом (рис. 30, б, блок 16):

$$\varphi_i^{**} = \begin{cases} \varphi_i^* - \Delta\varphi, & \varphi_i^* \geq \Delta\varphi; \\ 2 \cdot \pi - \Delta\varphi + \varphi_i^*, & \varphi_i^* < \Delta\varphi, \end{cases}$$

где $\Delta\varphi = \angle AO_2B$, φ_i^* – угол между плоскостью, проходящей через оси ШК и заготовки, и радиус-вектором r_i в момент времени τ_{i_k} . Угол $\varphi_i^* \in [0; 2 \cdot \pi)$.

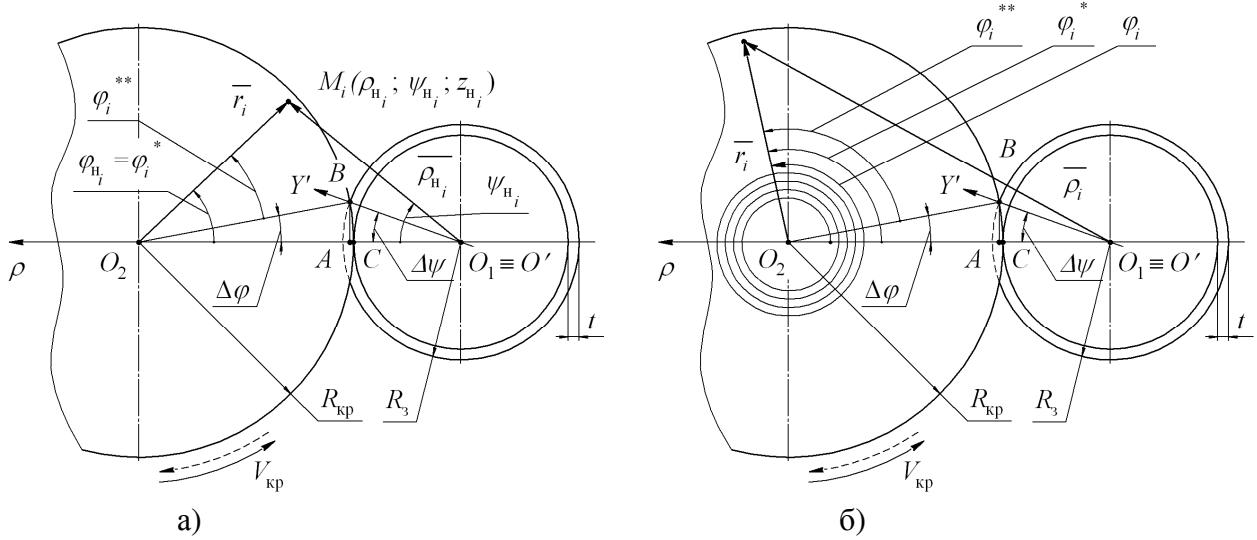


Рис. 29. Положение ШК и детали при наружном круглом шлифовании (вид спереди):
а – в момент времени τ_{i_1} ; б – в момент времени τ_{i_k} ($k > 1$)

Определим угол $\Delta\varphi = \angle AO_2B$ (рис. 29, б, блок б):

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{O_2A}{O_2B}\right). \quad (98)$$

Подставив равенства (67), (65) и (64) в формулу (98), получим:

$$\Delta\varphi = \arccos\left[1 - \frac{2 \cdot (R_3 \mp t) \cdot t \pm t^2}{2 \cdot (R_3 \pm R_{кр} \mp t) \cdot R_{кр}}\right]. \quad (99)$$

Определим угол φ_i^* (рис. 29, б, блок 15):

$$\varphi_i^* = \varphi_i - 2 \cdot \pi \cdot n_i,$$

где φ_i – угол, определённый по формуле (56) при $\tau = \tau_{i_k}$, рад. Угол φ_i включает обороты ШК вокруг своей оси, которые он может совершить к моменту времени τ_{i_k} при $k > 1$ (рис. 29, б). Величину n_i определим следующим образом (блоки 14 и 13):

$$n_i = \frac{\varphi_i}{2 \cdot \pi}.$$

Полученное значение n_i необходимо округлить до ближайшего меньшего натурального числа. Таким образом, углы φ_i^* и φ_i отличаются на величину, кратную $2 \cdot \pi$. При этом, как указывалось ранее, $\varphi_i^* \in [0; 2\pi)$.

После определения номера i и параметров r_i, φ_i, z_i вершины РЧ зерна, для которой верно выражение (93), найдём время $\tau = \tau_i$ её прохождения через плоскость α (уравнение (69), блок 20). Уравнение (69) решается численным методом. В качестве начального значения его корня можно принять (блок 18):

$$\tau_{\text{нач } i} = \tau_{i_k}. \quad (100)$$

Найденное значение τ проверим на выполнение условия (72) (блок 21). Если условие будет выполняться, определим соответствующие координаты ρ_i и z_i вершины РЧ зерна (первое и третье уравнение в системе (57), блок 22) и проверим их на выполнение условий (73) и (74) (блок 23). Если условия (73) и (74) будут выполнены, определим координаты точки $C_j(z'_j; y'_j)$ и величину износа РЧ соответствующего зерна (выражения (48), (75), (76), блоки 24, 25). Данные параметры сохраним в памяти ЭВМ (блок 26).

Перейдём к следующему АЗ, которое пройдёт через плоскость α (блок 27). Зёрнам РС круга были присвоены номера в соответствии со значением угла φ_n (блок 5). Следовательно, за i -м зерном РС последует $(i - 1)$ -е при встречном шлифовании и $(i + 1)$ -е при попутном шлифовании (блок 28).

Учитывая довольно большое количество зёрен на единице РП круга [1, 22], приходим к выводу, что промежуток времени между проходами через плоскость α i -го и $(i \mp 1)$ -го АЗ довольно мал (несколько миллисекунд). Тогда найденное время прохода через плоскость α произвольного АЗ можно использовать для определения времени прохода следующего за ним зерна (блок 29), т.е.

$$\tau_{\text{нач } i} = \tau_{(i \mp 1)}. \quad (101)$$

Как указывалось ранее, блоки 20 – 29 составляют вложенный цикл. Операции внутри него выполняются до тех пор, пока выполняется условие в блоке 21. Это условие соответствует k -му проходу ШК через участок PQ . В результате многократного осуществления вложенного цикла определим координаты вершин и величину износа всех зёрен, прошедших через участок PQ за промежуток времени $\tau \in [\tau_{n_k}; \tau_{k_k}]$ (блок 25). Далее перейдём к следующему проходу ШК (блок 11).

Выходными данными представленного алгоритма являются координаты вершин и величина износа всех зёрен, прошедших через участок PQ в результате $N_{\text{кр}}$ проходов через него всего ШК. Эти данные сохраняются в памяти ЭВМ (блок 26).

2.6.4 Алгоритм реализации модели процесса формирования поперечного микропрофиля детали

Блок-схема алгоритма моделирования процесса формирования поперечного микропрофиля детали представлена в приложении 14. Исходными данными для моделирования являются геометрические параметры b и v рабочих частей зёрен (приложение 7), допускаемое прочностью АЗ и связки значение силы микро-резания $[P_z]$ (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) [35, 96], координаты вершин зёрен $C_1, \dots, C_j, \dots, C_{N_\alpha}$ в плоскости α , микропрофиль заготовки $y_{\text{про}}(z')$ (блоки 2, 3). Эти данные используются для определения микропрофиля поверхностей заготовки и детали (блоки 4 – 7), который отображается на мониторе (блок 8). Затем определяется максимальная глубина внедрения рабочих частей зёрен $a_{\text{max}} = \max\{a_j\}$ (рис. 18) и параметры шероховатости обработанной поверхности R_{max}, Ra, Rz (блоки 9, 10).

2.7 Выводы и результаты

1. Разработана математическая модель РС круга, которая позволяет учитывать разновысотность вершин зёрен с учётом их индивидуального износа.
2. Разработан и реализован алгоритм получения топограмм методом параллельных сечений с использованием профилографа и создана соответствующая экспериментальная установка.
3. Разработано программное обеспечение для статистической обработки топограмм рабочих поверхностей кругов.
4. В результате проведённых экспериментальных исследований произведена оценка статистических характеристик участков топографии различных шлифовальных кругов, полученных методом параллельных сечений. Данные характеристики позволяют моделировать РП круга с учётом режимов её правки.
5. Разработаны кинематические модели различных видов шлифования.
6. Разработаны имитационная модель формирования поперечного микропрофиля детали.
7. Разработаны алгоритмы реализации полученных моделей на ЭВМ. Создано оригинальное программное обеспечение.
8. Разработанный комплекс математических моделей позволяет оценивать глубину внедрения зёрен a_j в поверхность заготовки (рис. 18) и параметры шероховатости поверхности детали.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ЕДИНИЧНОЙ ЦАРАПИНЫ

В **главе** 1 было установлено, что в настоящее время отсутствует математическая модель формирования профиля единичной абразивной царапины, базирующаяся на модели РЧ зерна в виде параболоида вращения с учётом явления образования навалов. Предпосылки для её создания были заложены А.П. Осиповым в работе [50]. Создание такой модели актуально для изучения закономерностей образования шероховатости и дефектов шлифованной поверхности в виде абразивных царапин. Используя подход Л.Н. Филимонова (формула (24)) и Н.В. Носова (формула (26)), с её помощью можно в первом приближении прогнозировать высотные параметры шероховатости Rz , $Rmax$.

Таким образом, в рамках данной работы актуальной проблемой является разработка математической модели формирования профиля единичной царапины, базирующейся на модели РЧ зерна в виде параболоида вращения. В рамках главы 3 были решены следующие задачи:

- разработана модель процесса формирования поперечного профиля единичной царапины;
- получены теоретические зависимости для определения параметров единичной абразивной царапины от геометрических параметров b и v РЧ зерна, её износа $h_{изн}$, глубины внедрения в обрабатываемый материал a и угла сдвига β_1 ;
- установлено влияние параметров процесса микрорезания на высоту навалов $h_{i_{max}}$ и высоту абразивной царапины $h_{ц}$;
- сделаны выводы по проделанной работе.

В рамках **главы** 3 были приняты следующие допущения:

1) весь деформируемый и не переходящий при микрорезании в стружку материал выдавливается в направлениях, перпендикулярных вектору скорости резания, и образует по бокам канавки два навала, что соответствует их максимально возможной высоте;

2) навалы в поперечном сечении имеют форму полукругов [4, 44, 83].

3) В качестве модели РЧ зерна используем описанный в п.2.1. параболоид вращения (рис. 31).

Рассмотрим профиль РЧ зерна в произвольной плоскости λ , параллельной фронтальной плоскости ZOY (рис. 31).

Проведём касательную под углом сдвига β_1 к переднему профилю РЧ зерна. Точку касания обозначим через B . Таким образом, получим разделение переднего профиля на две части. Проводя подобные построения в других плоскостях, параллельных плоскости ZOY , можно получить разделение всей передней поверхности на две зоны (зоны 1 и 2 на рис. 31).

Будем полагать, что материал, контактирующий с зоной 1, будет удалён в виде стружки. Материал, контактирующий с зоной 2, срезан не будет, поскольку движущееся АЗ будет «подминать» его под себя. Угол сдвига β_1 в первом приближении можно определить по формуле (10) [51].

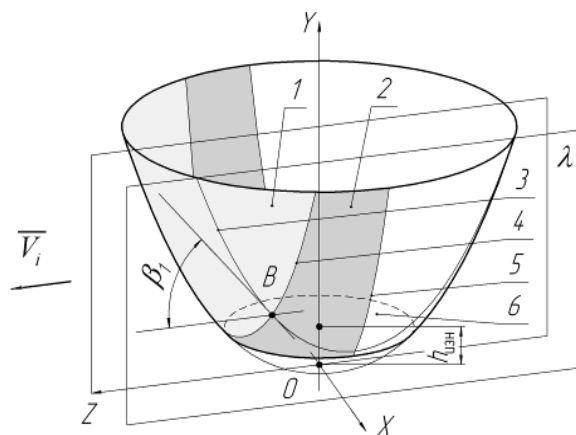


Рис. 30. Предлагаемая модель РЧ зерна
 1 – зона резания; 2 – зона выдавливания;
 3 – профиль РЧ зерна в плоскости λ ;
 4 – линия разделения передней поверхности РЧ зерна на зоны; 5 – линия разделения РЧ зерна на переднюю и заднюю поверхности; 6 – площадка износа

3.1 Разработка модели процесса формирования поперечного профиля единичной царапины

Рассмотрим процесс микрорезания РЧ i -го зерна круга с вершиной M_i (рис. 32) в плоскости α , перпендикулярной поверхности заготовки и параллельной оси ШК. Участок траектории движения РЧ зерна, соответствующий одному внедрению в обрабатываемый материал, обозначим AB . Участок траектории, соответствующий прохождению РЧ зерна через плоскость α , обозначим CE .

Анализ реальных условий шлифовальных операций показал, что

$$t_m \ll R_{кр};$$

$$t_m \ll R_3;$$

$$S_m \ll V_{кр},$$

где t_m – глубина микрорезания – наибольшая глубина внедрения РЧ зерна в обрабатываемый материал за одно врезание, мм. Первое условие справедливо для всех видов шлифования; второе и третье – для круглого. Из приведённых неравенств можно заключить, что на участке CE глубина внедрения a РЧ зерна постоянна (рис. 32, б), и при движении вершины РЧ зерна M_i из точки C в точку E вектор её скорости \vec{V}_i перпендикулярен плоскости α , т.е. $\vec{V}_i \perp \alpha$.

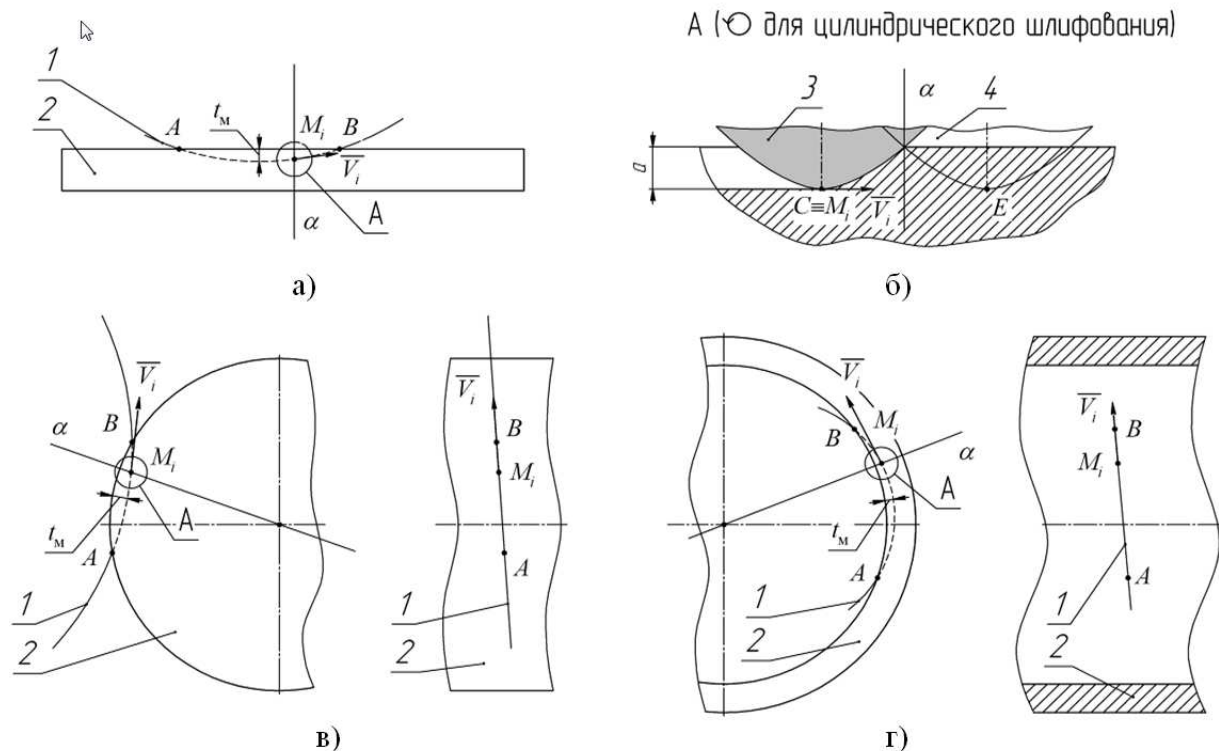


Рис. 31. Процесс микрорезания при различных видах шлифования
 а – плоское шлифование; б – вид А; в – наружное круглое шлифование с продольной подачей;
 г – внутреннее круглое шлифование с продольной подачей; 1 – траектория движения РЧ i -го зерна относительно заготовки при микрорезании; 2 – заготовка; 3, 4 – начало и конец прохождения РЧ зерна через плоскость α

Рассмотрим процесс образования навалов в плоскости α при движении через неё РЧ зерна (рис. 33, а). Навалы начинают формироваться в момент контакта зоны выдавливания РЧ зерна с материалом обрабатываемой заготовки (рис. 33, б). По мере движения зоны выдавливания через плоскость α размер навалов увеличивается (рис. 33, в). При этом в соответствии с принятым допущением 1 высоту навала h_n можно определить через его площадь S_n (рис. 34):

$$h_n = \sqrt{\frac{2 \cdot S_i}{\pi}};$$

$$h_n = 0,8 \cdot \sqrt{S_i}.$$

В соответствии с допущением 1

$$2 \cdot S_n = 2 \cdot S_y;$$

$$h_n = 0,8 \cdot \sqrt{S_y}, \quad (102)$$

где S_y – площадь сечения заготовки в плоскости α , контактирующей с зоной выдавливания. По мере движения РЧ зерна размеры навалов в плоскости α будут увеличиваться и достигнут максимальных размеров, когда вся зона выдав-

ливания пройдёт через плоскость α и в ней окажется вершина РЧ зерна M_i (рис. 33, з). При этом

$$h_{ц} = a + h_{i \max}; \quad (103)$$

$$h_{i \max} = 0,8 \cdot \sqrt{S_{y \max}}, \quad (104)$$

где $h_{ц}$ – высота царапины, мкм; $h_{i \max}$ – максимальная высота навалов, мкм. На этом процесс формирования профиля царапины в плоскости α завершится.

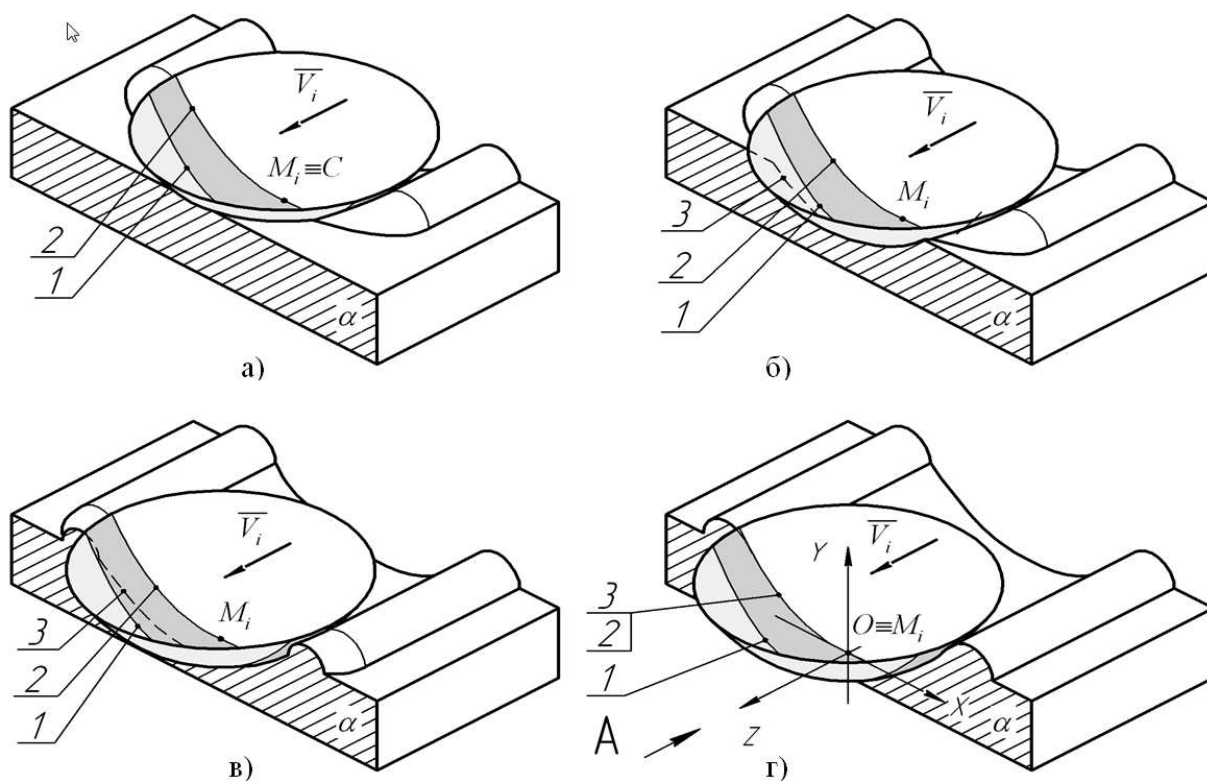


Рис. 32. Процесс формирования единичной царапины
1 – зона резания; 2 – зона выдавливания; 3 – профиль РЧ зерна в плоскости α

Параметр $S_{y \max}$ в зависимости (104) можно найти с помощью определённых интегралов. Пределы интегрирования и вид выражения изменяются в зависимости от условий обработки и величины износа РЧ зерна (рис. 34):

$$S_{y \max} = \begin{cases} \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy, & a+h_{\text{изн}} \leq y_{\text{min}}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} x(y) dy, & h_{\text{изн}} \geq y_{\text{min}}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{y_{\text{min}}}^{a+h_{\text{изн}}} x(y) dy, & h_{\text{изн}} < y_{\text{min}} < a+h_{\text{изн}}, \end{cases} \quad (105)$$

где $f(y)$ – уравнение профиля РЧ зерна в центральной плоскости XOY :

$$f(y) = b \cdot y^v,$$

$x(y)$ – уравнение проекции на плоскость XOY линии разделения передней поверхности на зоны [50]:

$$x(y) = \sqrt{b^2 \cdot y^{2v} - (\operatorname{tg}(\beta_1) \cdot b^2 \cdot v \cdot y^{2v-1})^2}, \quad (106)$$

где y_{\min} – критическая глубина внедрения РЧ зерна в случае отсутствия площадки износа ($h_{\text{изн}} = 0$), мкм (зависимость (9)).

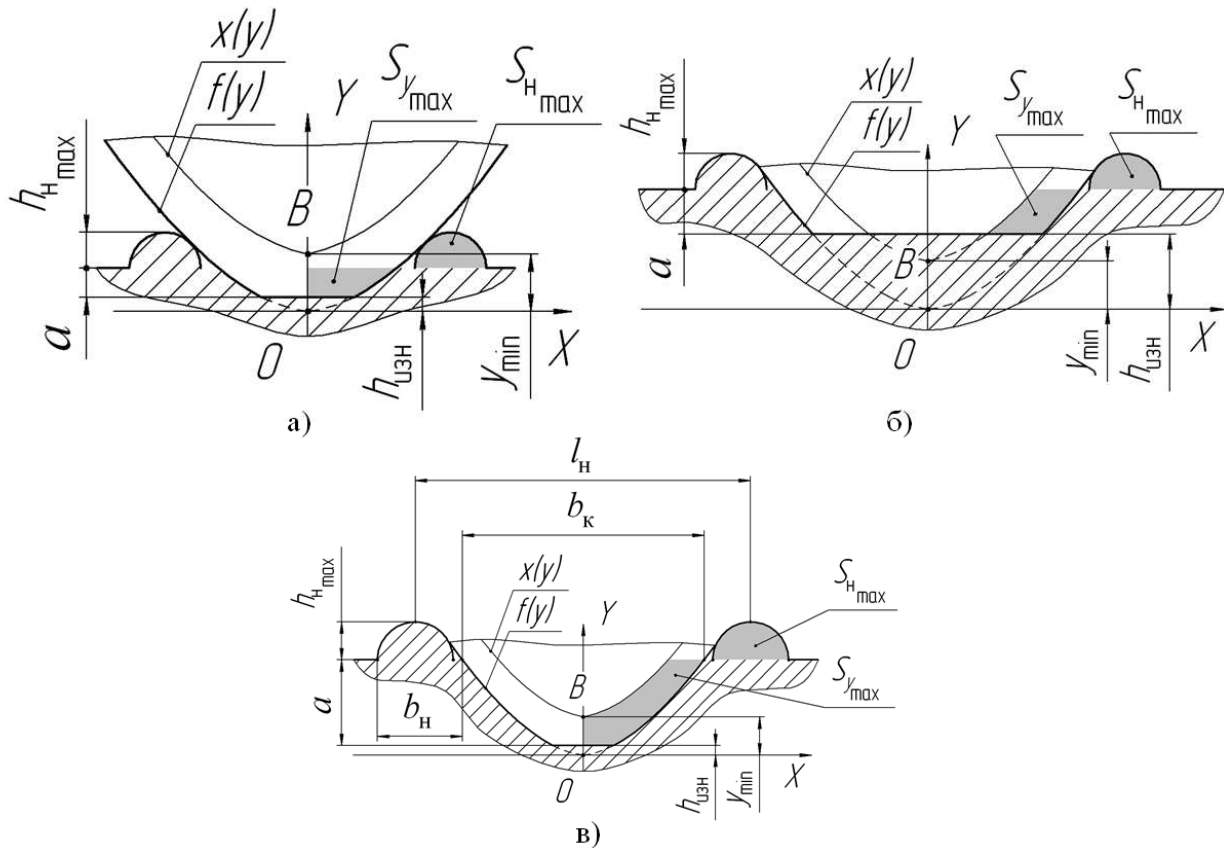


Рис. 33. Различные случаи взаимодействия РЧ зерна с обрабатываемым материалом в плоскости α (вид А на рис. 32, г)

В общем случае критическая глубина внедрения РЧ зерна, при которой начнётся процесс снятия стружки (см. рис. 33):

$$a_{\text{кр}} = \begin{cases} y_{\min} - h_{\text{изн}}, & h_{\text{изн}} < y_{\min}; \\ 0, & h_{\text{изн}} \geq y_{\min}. \end{cases} \quad (107)$$

Если величина линейного износа РЧ зерна $h_{\text{изн}}$ превышает величину y_{\min} , то процесс микрорезания будет иметь место при любой глубине внедрения РЧ зерна в материал заготовки.

Первому уравнению в системе (105) соответствует случай, при котором имеет место только процесс выдавливания материала (рис. 33, а). Второму и третьему уравнениям системы (105) соответствуют случаи взаимодействия РЧ

зерна с материалом заготовки, показанные на рис. 33, б и 33, в. В этих случаях образуется стружка.

Упростим систему (105). Анализ значений функции (106) при различных значениях исходных данных (v, b, β_1) показал, что

$$\begin{aligned} x(y) &\approx f(y - y_{\min}); \\ \int_{y_1}^{y_2} x(y) dy &\approx \int_{y_1}^{y_2} f(y - y_{\min}) dy. \end{aligned} \quad (108)$$

Используя равенство (108), произведём замену в системе (105):

$$S_{y_{\max}} = \begin{cases} \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy, & a + h_{\text{изн}} \leq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & h_{\text{изн}} \geq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy - \int_{y_{\min}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min}) dy, & h_{\text{изн}} < y_{\min} < a + h_{\text{изн}}, \end{cases}$$

ИЛИ

$$S_{y_{\max}} = \frac{b}{v+1} \cdot \begin{cases} S_1, & a + h_{\text{изн}} \leq y_{\min}; \\ S_1 - S_2 + S_3, & h_{\text{изн}} \geq y_{\min}; \\ S_1 - S_2, & h_{\text{изн}} < y_{\min} < a + h_{\text{изн}}; \end{cases} \quad (109)$$

$$S_1 = (a + h_{\text{изн}})^{v+1} - h_{\text{еф}}^{v+1}; S_2 = (a + h_{\text{изн}} - y_{\min})^{v+1}; S_3 = (h_{\text{изн}} - y_{\min})^{v+1}.$$

Расхождение результатов, полученных с помощью систем (105) и (109), не превышает 10 %.

Размеры навалов часто характеризуются относительным показателем – коэффициентом навалов ϵ_H (коэффициентом выдавливания) [83]. Этот коэффициент представляет собой отношение суммы площадей навалов к площади канавки:

$$\epsilon_H = \frac{2 \cdot S_{y_{\max}}}{2 \cdot \int_{h_{\text{изн}}}^{a+h_{\text{изн}}} f(y) dy},$$

или, как следует из системы (109),

$$\epsilon_H = \begin{cases} 1, & a + h_{\text{еф}} \leq y_{\min}; \\ 1 - \frac{S_2 - S_3}{S_1}, & h_{\text{еф}} \geq y_{\min}; \\ 1 - \frac{S_2}{S_1}, & h_{\text{еф}} < y_{\min} < a + h_{\text{еф}}. \end{cases} \quad (110)$$

Как следует из последней системы, коэффициент навалов не может быть больше 1. Предположение о корреляционной связи параметров ε_n и y_{\min} , высказанное в ходе анализа работы В.В. Ефимова [17] (п. 1.4), оказалось верным.

Используя разработанную математическую модель, можно получить формулы для определения других параметров единичной царапины (см. рис. 33): ширины навалов

$$b_n \approx 2 \cdot h_{i_{\max}}, \quad (111)$$

расстояния между вершинами навалов,

$$\begin{aligned} l_n &= b_k + b_n; \\ l_n &\approx b \cdot a^v + 2 \cdot h_{i_{\max}}, \end{aligned} \quad (112)$$

где b_k – ширина шлифовочной канавки, мкм.

Формула для определения относительной высоты навалов

$$\varepsilon_{\text{вн}} = \frac{h_{i_{\max}}}{a}. \quad (113)$$

Таким образом, разработана модель формирования профиля единичной абразивной царапины с учётом износа.

3.2 Анализ влияния параметров микрорезания на высоту навалов и высоту абразивной царапины

Следующим этапом математического моделирования формирования профиля абразивной царапины является анализ полученных выражений (103), (104) и (109). Полученные результаты можно будет использовать для изучения влияния геометрии РЧ зерна и режимов шлифования на шероховатость поверхности детали. Исследования проводили в математическом пакете MathCAD. При этом параметрам микрорезания присвоили следующие значения:

- $v \in [0; 1]$, $b \in [5; 15]$. Эти значения были получены при исследовании фотографий абразивных зёрен [15, 38, 49, 67];
- $h_{\text{изн}} \in [0; 20]$, мкм;
- $a \in [0; 50]$, мкм. Глубину внедрения РЧ зерна $a_{\text{пр}}$, допустимую прочностью АЗ и удерживающей связки, можно приближённо найти по следующей формуле [29]: $a_{\text{пр}} \approx \frac{d_0}{7}$. Для наиболее распространённых зернистостей – 16, 25, 40 (F90, F60, F40) – эти глубины соответственно равны 27, 42 и 66 мкм, что согласуется с экспериментальными данными Л.Н. Филимонова [83];

• $\beta_1 = 25^\circ$ для стали 45 согласно расчётам по формуле (10), что согласуется с данными экспериментальных исследований С.Н. Корчака [33].

Из анализа формул (103), (104) и (109) следует, что увеличение геометрического параметра b РЧ зерна и угла сдвига β_1 ведёт к увеличению высоты навалов $h_{i \max}$, а значит и высоты всей царапины $h_{ц}$. Влияние параметров a , v и $h_{изн}$ явно не просматривается.

Результаты расчёта высоты царапины $h_{ц}$ по зависимости (104) при различных глубинах внедрения АЗ a приведены на рис. 34. Из графика следует, что зёрна с рабочими частями различной формы могут образовывать царапины одинаковой высоты ($h_{ц} = 15$ мкм при $a = 10$ мкм). При меньшей глубине внедрения a увеличение параметра v соответствует уменьшению $h_{ц}$ и наоборот.

При $h_{изн} = 0$ увеличение глубины внедрения РЧ зерна a приводит к закономерному увеличению высоты царапины $h_{ц}$. Можно предположить, что и при $h_{изн} \neq 0$ будет наблюдаться та же закономерность, поскольку увеличивается количество выдавливаемого в навалы материала. На графиках видно (см. рис. 35), что зависимость $h_{ц}(a)$ при $a > 10$ мкм близка к линейной.

Результаты расчёта высоты навалов $h_{i \max}$ по формулам (104) и (109) при различных значениях геометрического параметра v и износа рабочей части зерна $h_{изн}$ приведены на рис. 36. Соответствующие графики зависимости высоты царапины $h_{ц}(v)$ будут иметь аналогичную форму, но смещены в направлении оси ординат на величину a согласно выражению (103). На графиках видно, что с увеличением параметра v высота навалов $h_{i \max}$ увеличивается.

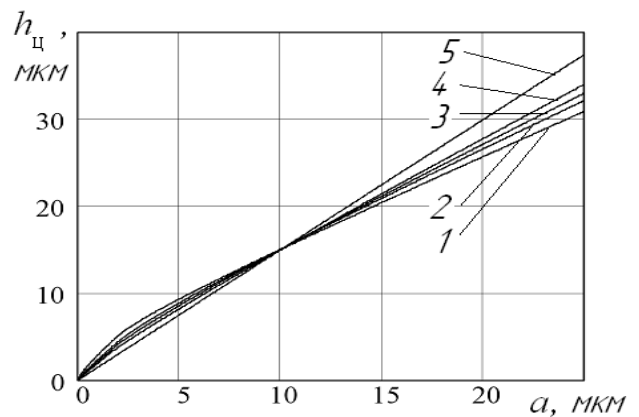


Рис. 34. Зависимость высоты царапины $h_{ц}$ от глубины внедрения АЗ a ($h_{изн} = 0$, $\beta_1 = 25^\circ$)

1 – $v = 0,4$, $b = 8,15$; 2 – $v = 0,6$, $b = 4,85$;
3 – $v = 0,7$, $b = 3,75$; 4 – $v = 0,8$, $b = 2,9$;

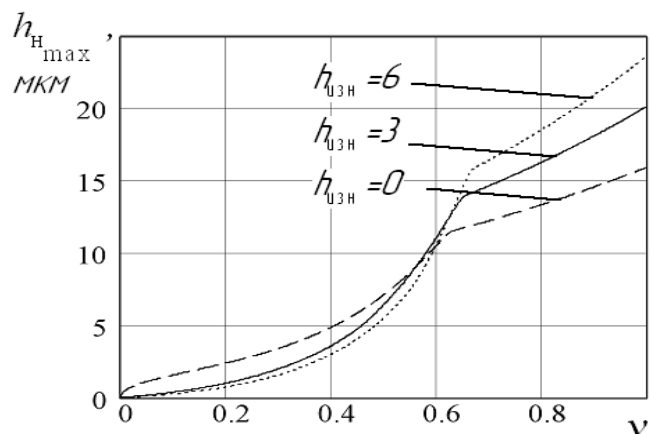


Рис. 35. Зависимость высоты навалов $h_{i \max}$ от геометрического параметра РЧ зерна v при различных значениях износа $h_{изн}$ ($b = 8,15$, $a = 10$ мкм, $\beta_1 = 25^\circ$)

При достаточно больших значениях ($v > 0,6$, рис. 36) навалы превышают по высоте глубину внедрения АЗ a , что маловероятно для реальных условий микрорезания и связано с принятым ранее допущением 2.

Влияние линейного износа неоднозначно: износ РЧ зерна с малыми v ($v < 0,6$, рис. 36) ведёт к уменьшению высоты навалов $h_{i \max}$; износ РЧ зерна при $v > 0,6$, ведёт к увеличению высоты навалов $h_{i \max}$. Граница $v \approx 0,6$, при которой меняется влияние износа на высоту навалов, «размыта». В общем случае её положение находится в интервале $v \in [0,5; 0,8]$ и зависит от значений параметра b . С уменьшением b граница смещается вправо.

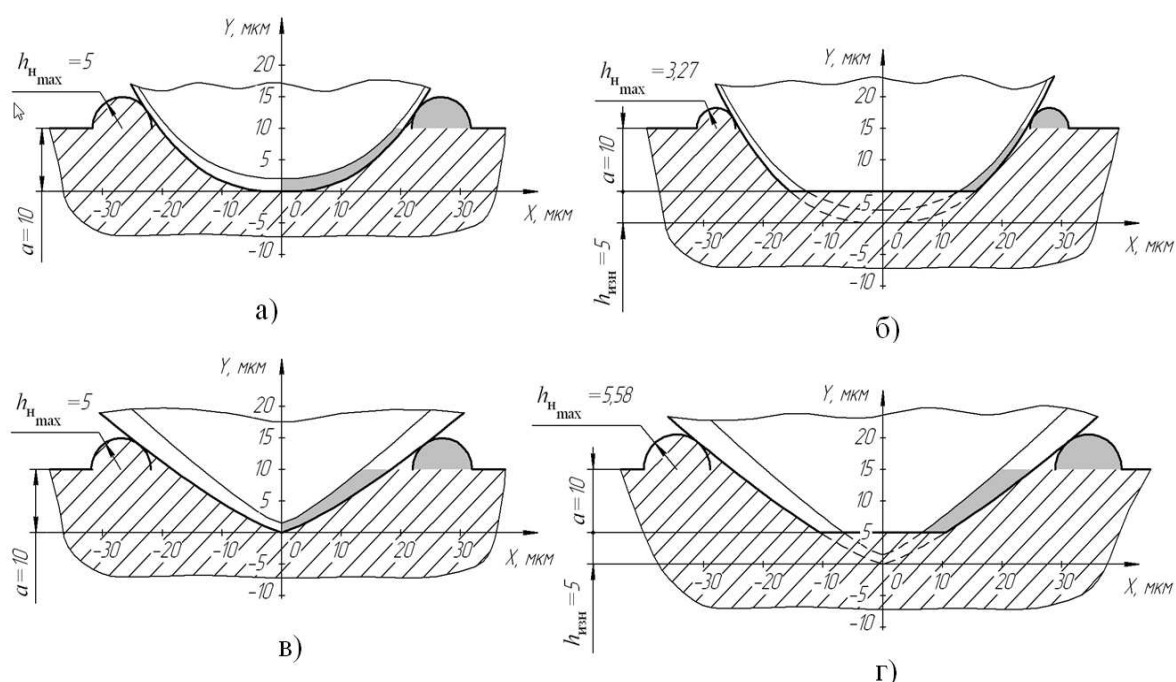


Рис. 36. Влияние различной формы РЧ зерна и его износа на высоту навалов ($a = 10$ мкм, $\beta_1 = 25^\circ$)

а – $v = 0,4$, $b = 8,15$, $h_{\text{изн}} = 0$; б – $v = 0,4$, $b = 8,15$, $h_{\text{изн}} = 5$ мкм;
в – $v = 0,8$, $b = 2,9$, $h_{\text{изн}} = 0$; г – $v = 0,8$, $b = 2,9$, $h_{\text{изн}} = 5$ мкм

Для объяснения влияния параметров v и $h_{\text{изн}}$ на высоту навалов $h_{i \max}$ рассмотрим процесс микрорезания двумя зёрнами с рабочими частями различной формы. РЧ 1-го зерна характеризуется параметрами $v = 0,4$, $b = 8,15$, РЧ 2-го зерна – $v = 0,8$, $b = 2,9$. Примем, что микрорезание происходит с постоянной глубиной внедрения $a = 10$ мкм и углом сдвига $\beta_1 = 25^\circ$. Согласно расчётам по формулам (104), (109) (рис. 35, а, в) в начале работы ($h_{\text{изн}} = 0$) РЧ обоих зёрен формируют навалы одинаковой высоты $h_{i \max} = 5$ мкм.

На рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** видно, что у РЧ зерна, характеризуемой значением $v = 0,4$, зона выдавливания сосредоточена вблизи вершины. Её износ приводит к уменьшению зоны выдавливания. Следователь-

но, уменьшается и высота навалов. Например, при износе $h_{\text{изн}} = 3$ мкм высота навалов становится равной $h_{i \text{ max}} = 3,7$ мкм (кривая 1 на рис. 38).

У РЧ зерна, характеризуемой значением $\nu = 0,8$, зона выдавливания сосредоточена в верхней части (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Её износ приводит к увеличению зоны выдавливания. Следовательно, увеличивается и высота навалов. Например, при износе $h_{\text{изн}} = 3$ мкм высота навалов становится равной $h_{i \text{ max}} = 5,4$ мкм (кривая 4 на рис. 38).

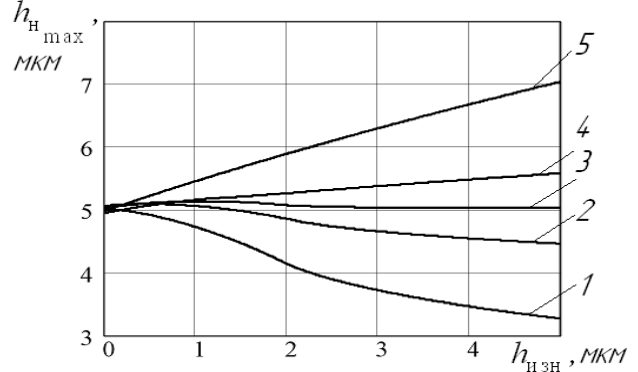


Рис. 37. Зависимость высоты навалов от износа РЧ зерна ($a = 10$ мкм, $\beta_1 = 25^\circ$)
 1 – $\nu = 0,4$, $b = 8,15$; 2 – $\nu = 0,6$, $b = 4,85$;
 3 – $\nu = 0,7$, $b = 3,75$; 4 – $\nu = 0,8$, $b = 2,9$;
 5 – $\nu = 0,99$, $b = 1,78$

Следует отметить, что полученные результаты исследования влияния износа $h_{\text{изн}}$ РЧ зерна на долю пластически выдавливаемого материала (см. рис. 38) не соответствуют зависимости (28) В.В. Ефимова [17]. Согласно этой зависимости увеличение износа $h_{\text{и}}$ ведёт к увеличению критической глубины внедрения АЗ $a_{\text{кр}}$, которая в конечном итоге может превысить фактическую глубину внедрения $a_{\text{max}} = \text{const}$ и АЗ перестанет срезать стружку. Однако В.В. Ефимов принимал сферическую форму РЧ зерна, что соответствует параболоидам, характеризуемым параметром $\nu = 0,6 \dots 0,7$. Для таких параболоидов износ действительно приводит к увеличению доли пластически выдавливаемого материала (см. рис. 36). Кроме того, В.В. Ефимов в рамках своей модели процесса шлифования разделял зёрна на «режущие» и «давящие» и не принимал во внимание ту часть материала, которая выдавливается «режущим» зерном в навалы.

3.3 Выводы и результаты

1. Разработана математическая модель образования единичной царапины, которая более точно отражает реальный процесс микрорезания: учитывается как собственно резание, так и упругопластическая деформация, а также износ РЧ зерна. Достоинством модели является то, что она учитывает влияние технологического режима (a), абразивного (ν и b) и обрабатываемого (β_1) материала, а также процессы изнашивания и правки ($h_{\text{изн}}$).

2. Из разработанной модели формирования профиля царапины следует, что процесс стружкообразования, как правило, начинается после достижения

критической глубины внедрения РЧ зерна $a_{кр}$ (формула (107)) в обрабатываемый материал. В противном случае наблюдается процесс ППД без микрорезания.

3. При достижении износа РЧ зерна $h_{изн} \geq y_{min}$ (см. рис. 33, б) процесс стружкообразования будет наблюдаться при любых глубинах a его внедрения в материал заготовки.

4. Процесс выдавливания наблюдается для всех рассмотренных форм РЧ зерна (параметры v и b) и глубин их внедрения (параметр a) в обрабатываемый материал, независимо от пластических свойств последнего.

5. Зависимость параметров царапины $h_{ц}$ и $h_{i_{max}}$ от глубины внедрения a РЧ зерна при $a > 10$ мкм близка к линейной, а форма кривой соответствует параметру v .

6. Установлено, что увеличение геометрических параметров рабочих частей зёрен v и b , глубин их внедрения в материал заготовки a , угла сдвига β_1 ведёт к увеличению высоты царапины $h_{ц}$ и высоты навалов $h_{i_{max}}$. Влияние линейного износа $h_{изн}$ зависит в общем случае от значений геометрических параметров v и b . Износ РЧ зерна при $v < 0,5$, способствует уменьшению высоты навалов $h_{i_{max}}$, а износ при $v > 0,8$, способствует увеличению высоты навалов $h_{i_{max}}$. Влияние износа РЧ зерна при $v \in [0,5; 0,8]$ определяется значением b (см. рис. 38), т.е. влияние параметров b , v и $h_{изн}$ необходимо рассматривать в совокупности.

7. Установлено, что РЧ зерна, внедрившаяся на бóльшую глубину, выдавит бóльший объём материала и образует канавку с бóльшими по высоте навалами. Следовательно, самые глубокие царапины формируются наиболее удалёнными от оси ШК зёрнами и могут образовывать на шлифованной поверхности дефекты. Для оценки высоты этих царапин $h_{o_{max}}$ необходимо определить максимальную глубину внедрения a_{max} рабочих частей зёрен ШК в слое, в котором будет распределена шероховатость поверхности детали. В работах А.В. Королёва [29], Ю.К. Новосёлова [42] и В.В. Ефимова [17] указанный слой характеризуется высотой $H_{ус}$, H и h_0 соответственно.

8. Необходима экспериментальная проверка полученных зависимостей (104), (109) – (113).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНИЧНОЙ ЦАРАПИНЫ И ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Результатом **глав** 2 и 3 является разработка имитационной модели процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности и математической модели формообразования профиля царапины соответственно. Для использования комплекса разработанных моделей на практике необходимо доказать их способность адекватно реагировать на изменения условий микрорезания и шлифования. Этого можно достичь, сопоставив результаты использования моделей с результатами экспериментов по микрорезанию единичным АЗ и экспериментов по шлифованию опытных образцов.

Целью **главы** 4 является проверка обоснованности принятых в работе допущений и основных теоретических положений.

В рамках **главы** 4 были решены следующие задачи:

- проведены эксперименты по микрорезанию единичным АЗ и сопоставлены результаты использования математической модели формирования профиля единичной царапины с результатами данных экспериментов;
- проведены эксперименты по шлифованию опытных образцов и сопоставлены результаты использования имитационной модели процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности с результатами данных экспериментов.

4.1 Экспериментальные исследования процесса формирования единичной абразивной царапины

Результатом главы 3 является разработка математической модели формирования профиля царапины. Целью данного параграфа является оценка способности разработанной математической модели адекватно реагировать на изменение условий микрорезания. В рамках данного параграфа были решены следующие задачи:

- спроектирована и собрана экспериментальная установка по микрорезанию единичным АЗ;
- разработан план соответствующих экспериментов;
- проведены эксперименты согласно разработанному плану;
- сопоставлены результаты использования математической модели формообразования единичной царапины с результатами данных экспериментов;
- сделаны выводы по проделанной работе.

Схема эксперимента представлена на рис. 39. Экспериментальная установка, воспроизводящая схему плоского шлифования периферией круга, была собрана на базе универсально-заточного станка модели 3Е642Е. На столе станка устанавливали пластину-образец 1. На шпиндель станка устанавливали диск 3. На периферии диска с помощью винта закрепляли резцовую вставку 2 с рабочей частью из эльбора.

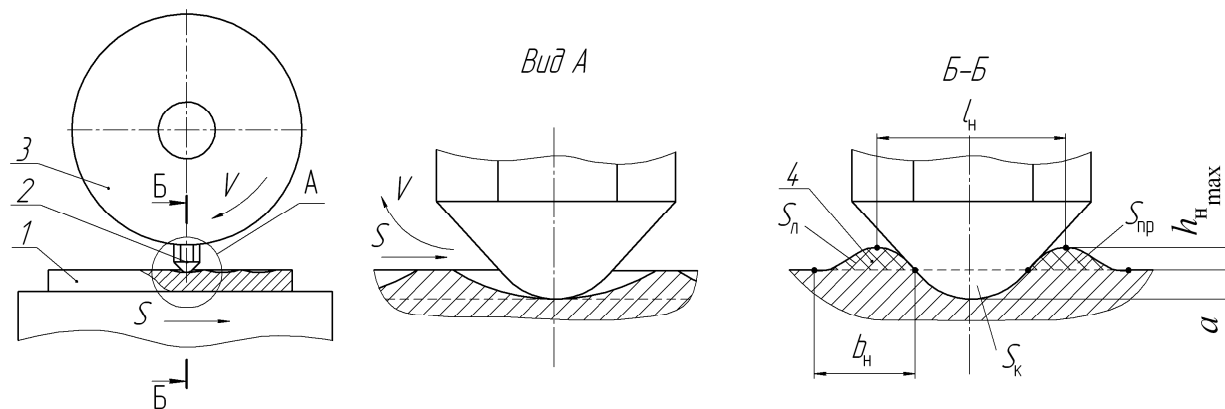


Рис. 38. Схема эксперимента по микрорезанию единичным абразивным зерном

Для проведения экспериментов было изготовлено 6 резцовых вставок, заточку которых осуществляли алмазными кругами на универсально-заточном станке модели 3Е642Е. Далее с помощью металлографического цифрового комплекса Альтами МЕТ 1 были получены фотографии рабочей части вставок (рис. 40).

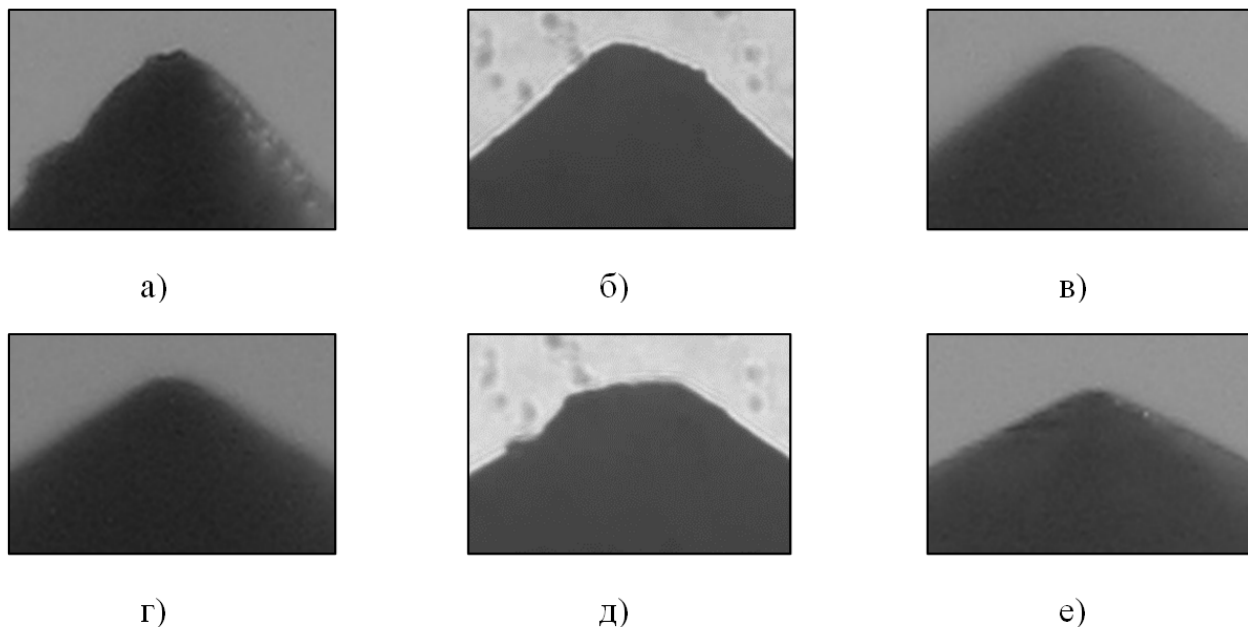
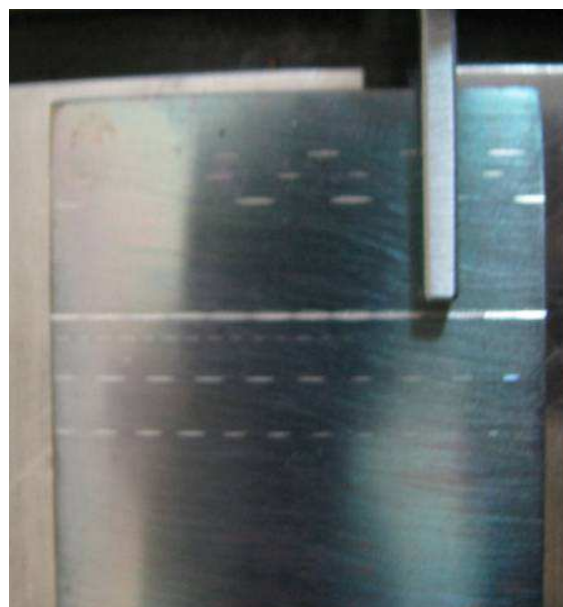
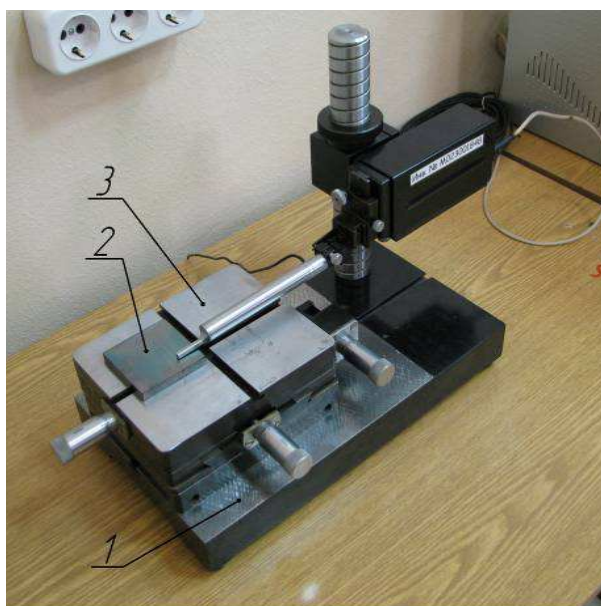


Рис. 39. Фотографии вершин резцовых вставок ($\times 225$)
 а – РВ № 1; б – РВ № 2; в – РВ № 3; г – РВ № 4; д – РВ № 5; е – РВ № 6

Их контуры с помощью специальной программы Refraction [15, 38, 67], разработанной в филиале СамГТУ (г. Сызрань), аппроксимировали параболой и конусом с округлённой вершиной, причём правый и левый контур описывали отдельно. Соответствующие параметры аппроксимации рабочей части вставок в зависимости от глубины микрорезания приведены в таблицах приложений 1 – 6.

Пластины-образцы для микрорезания были изготовлены из стали 45 (НВ 170...180). Перед экспериментом пластины подвергали шлифованию и последующей доводке до шероховатости $Ra = 0,16$ мкм ($Rz = 1,0$ мкм, $Rmax = 1,15$ мкм). В этом случае влиянием микропрофиля заготовки на форму царапин можно пренебречь.

Режимы микрорезания пластин-образцов (глубина, продольная подача стола станка и окружная скорость диска) устанавливали такими, чтобы царапина, полученная за одно врезание вставки, не перекрывала предыдущую (рис. 38, 41, б).



а)

б)

Рис. 40. Экспериментальная установка для профилографирования пластин-образцов
а – общий вид; б – процесс профилографирования;
1 – стойка профилографа; 2 – пластина-образец; 3 – крестовый стол

В реальном процессе шлифования каждое АЗ внедряется в металл, нагретый до высокой температуры действием ранее работавших зёрен [33, 35]. Такой нагрев влияет на свойства поверхности заготовки и условия упругопластического деформирования и стружкообразования [33]. С целью приблизить условия эксперимента к условиям реального процесса шлифования пластины-образцы непосредственно перед микрорезанием нагревали с помощью ТВЧ до

температуры порядка 500 – 600°C. Температуру определяли по цвету свечения пластины-образца после нагрева.

Полученные царапины исследовали с помощью профилографа модели 170623 (рис. 40, а). На стойке 1 профилографа устанавливали предметный крестовый стол 3. Минимальный регулируемый шаг перемещения стола в поперечном и продольном направлении составляет 0,01 мм. Это позволило получить ряд поперечных сечений царапины и проследить изменение её параметров по мере внедрения резцовой вставки в обрабатываемый материал. Для заданной режущей вставки и скорости микрорезания анализу подвергали не менее 30 профилограмм. Пример участка профилограммы, содержащего царапину, приведён на рис. 42.

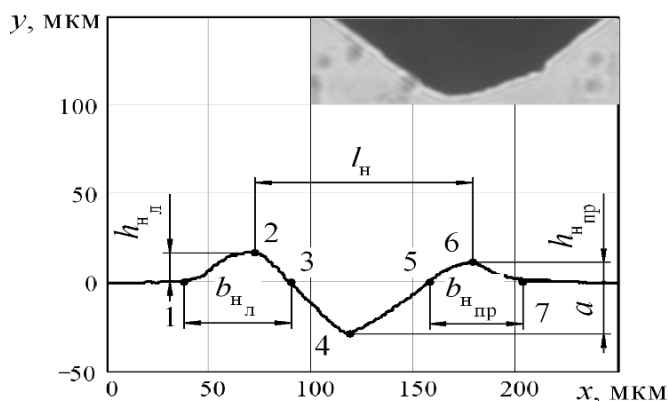


Рис. 41. Измеряемые параметры царапины

соответственно, мкм; расстояние между вершинами навалов l_n , мкм; ширину навалов $b_n = 0,5 \cdot (b_{nл} + b_{nпр})$, где $b_{nл}$ и $b_{nпр}$ – ширина левого и правого навалов соответственно, мкм; коэффициент навалов $\epsilon_n = \frac{S_{л} + S_{пр}}{S_k}$, где $S_{л}$ и $S_{пр}$ – площадь поперечного сечения левого и правого навалов соответственно, S_k – площадь шлифовочной канавки; относительная высота навалов $\epsilon_{вн} = \frac{h_{i\max}}{a}$.

Результаты измерения вышеперечисленных параметров показаны на рис. 43 – 47. Сплошные линии отражают полученные ранее теоретические зависимости (104), (109) – (113).

В результате сопоставления результатов расчётов параметров $h_{i\max}$ и l_n с результатами с измерений установлено, что их расхождение в большинстве случаев не превышает 20 % (рис. 43 и 44), несмотря на то, что реальная форма

Экспериментальные значения параметров каждой царапины определяли в математическом пакете MathCAD, куда импортировали координаты её различных профилей из программы для профилографа Profiler. В каждом сечении определяли следующие параметры (рис. 42): высоту

навалов $h_{i\max} = 0,5 \cdot (h_{nл} + h_{nпр})$, где $h_{nл}$ и $h_{nпр}$ – высота левого и правого навалов

навалов отличается от принятой. Данные результаты позволяют констатировать тот факт, что часть навалов имеет форму кругового сектора. Близость теоретических и экспериментальных значений расстояния между вершинами навалов l_H от глубины внедрения РВ a говорит о том, что форма навалов соответствует полукругу только у края царапины. Вместе с тем в данной области сосредоточена половина материала.

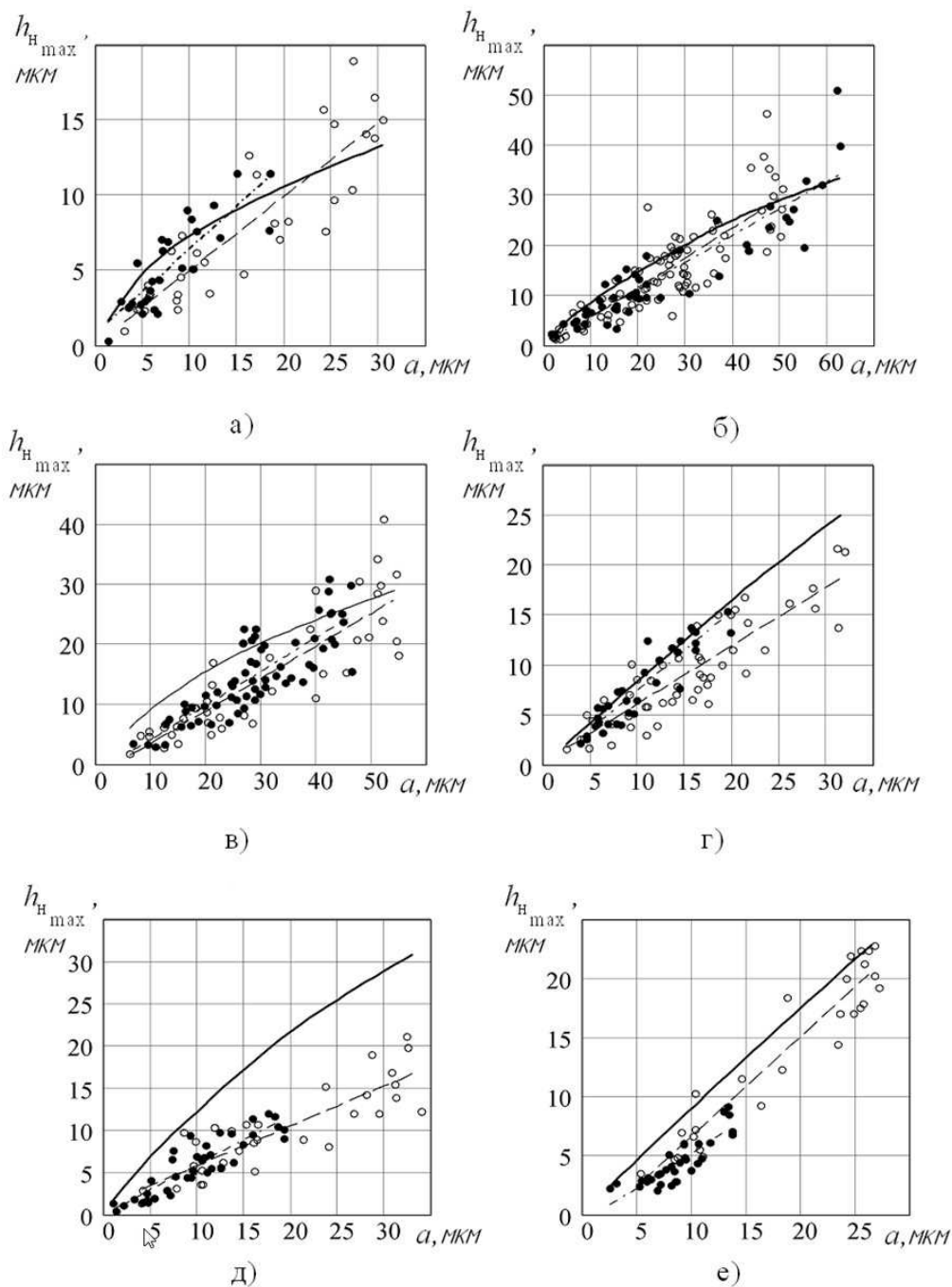


Рис. 42. Зависимость высоты навалов $h_{H \max}$ от глубины внедрения единичного зерна a
— — аналитическая модель; — — линейная регрессионная модель ($V = 35$ м/с); — · — линейная регрессионная модель ($V = 70$ м/с); ○ — «облако» экспериментальный точек ($V = 35$ м/с);
● — «облако» экспериментальный точек ($V = 70$ м/с);
а — РВ № 1; б — РВ № 2; в — РВ № 3; г — РВ № 4; д — РВ № 5; е — РВ № 6

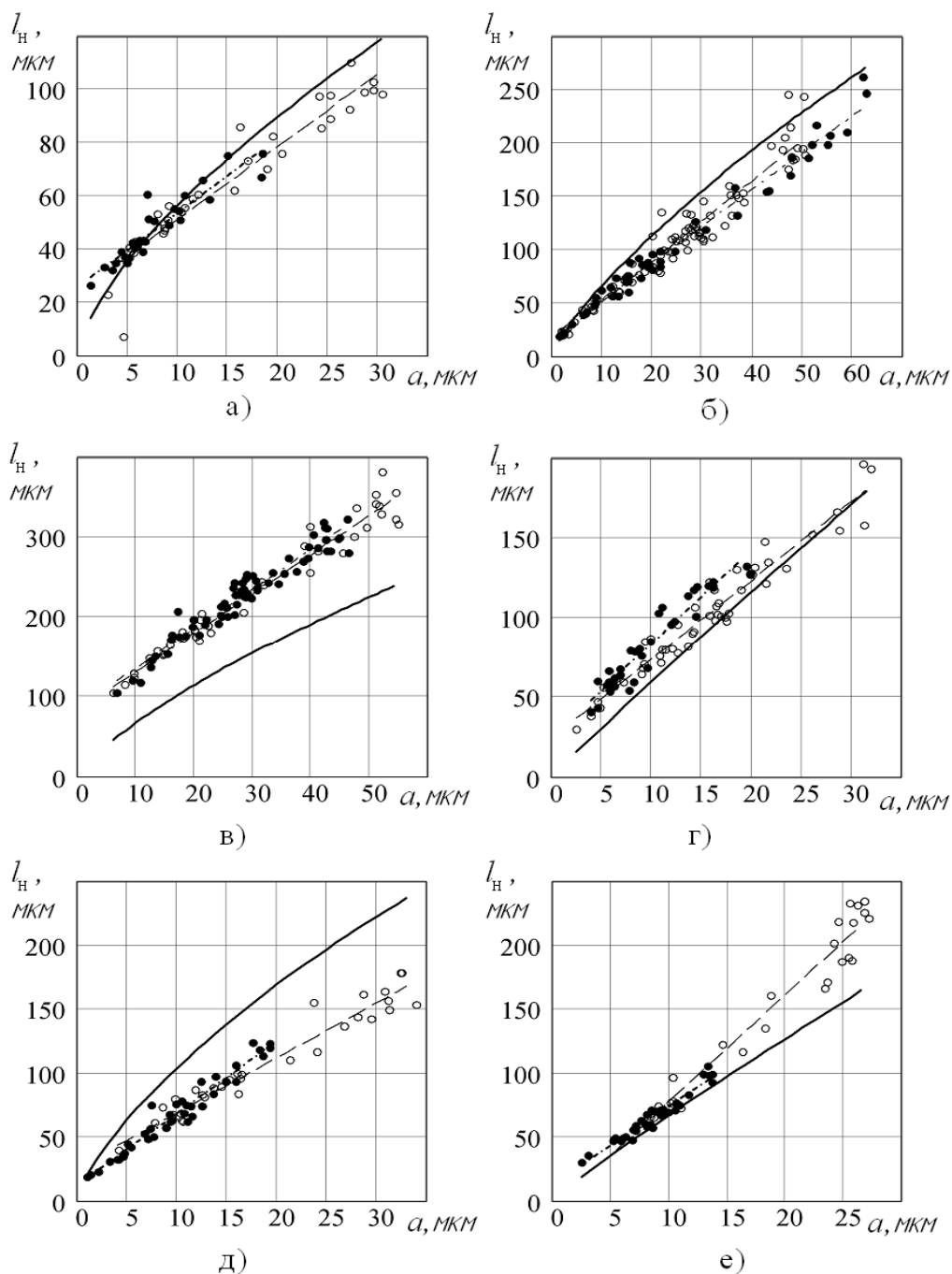


Рис. 43. Зависимость расстояния между вершинами навалов l_n от глубины внедрения единичного зерна a — аналитическая модель; — — линейная регрессионная модель ($V = 35$ м/с); — · — линейная регрессионная модель ($V = 70$ м/с); ○ — «облако» экспериментальный точек ($V = 35$ м/с); ● — «облако» экспериментальный точек ($V = 70$ м/с); а — РВ № 1; б — РВ № 2; в — РВ № 3; г — РВ № 4; д — РВ № 5; е — РВ № 6

Расчёт по формуле (111) даёт заниженные значения ширины навалов b_n в сравнении с результатами измерений (рис. 45), однако форма теоретической и экспериментальной зависимостей подобны. Можно предположить, что на точность экспериментального определения ширины навалов влияет субъективный фактор — положение точек 1 и 7 (рис. 42) выбирает сам исследователь.

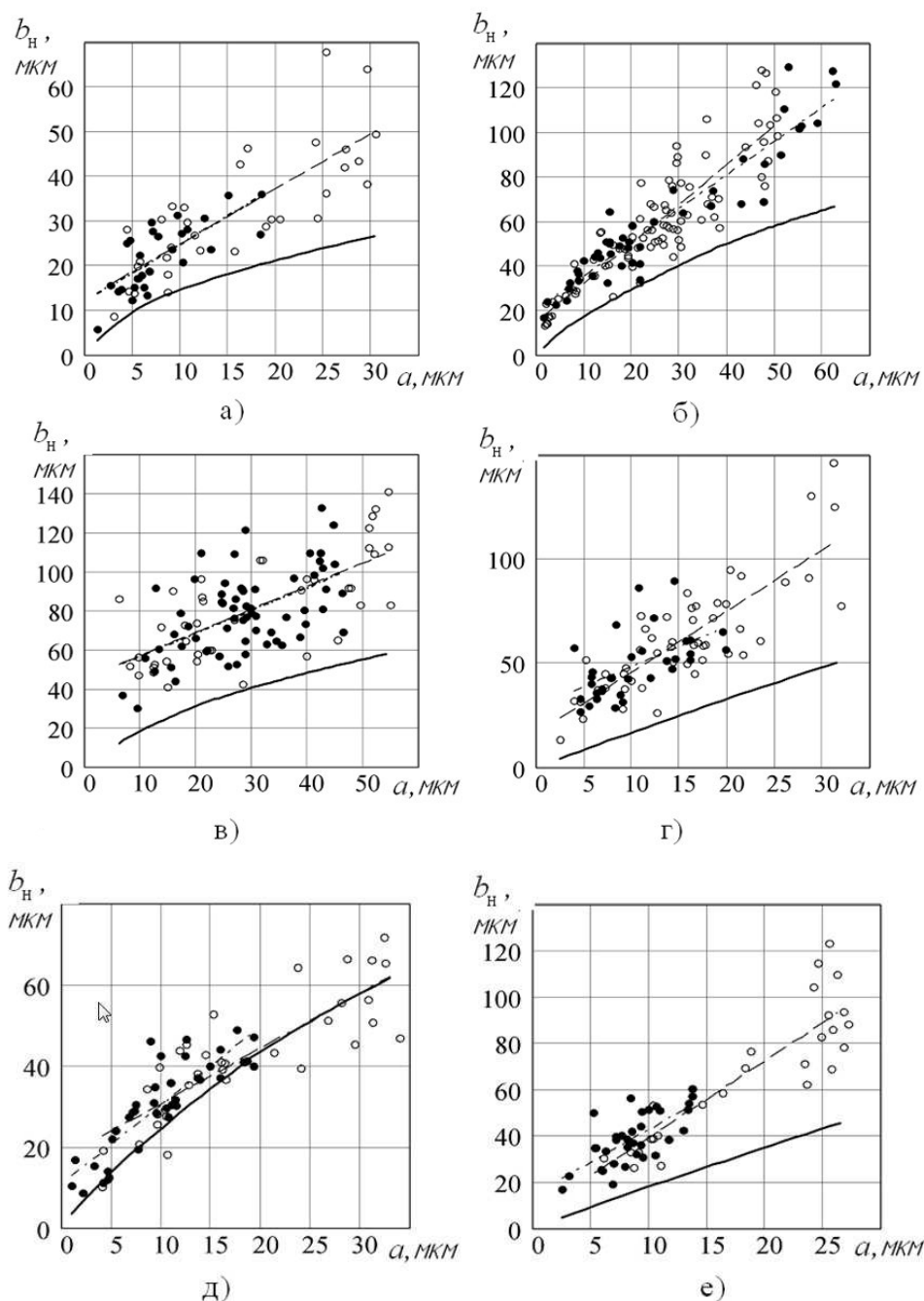


Рис. 44. Зависимость ширины навалов b_n от глубины внедрения единичного зерна a
— аналитическая модель; — — — линейная регрессионная модель ($V = 35$ м/с); — · — — линейная регрессионная модель ($V = 70$ м/с); ○ — «облако» экспериментальный точек ($V = 35$ м/с); ● — «облако» экспериментальный точек ($V = 70$ м/с);
а — РВ № 1; б — РВ № 2; в — РВ № 3; г — РВ № 4; д — РВ № 5; е — РВ № 6

Анализ графиков на рис. 42 – 44 также показал, что зависимость экспериментальных значений высоты навалов $h_{i \max}$, ширины навалов b_n , расстояния между вершинами навалов l_n от глубины внедрения АЗ a близка к линейной. Коэффициент корреляции, характеризующий степень линейной зависимости, близок к 1.

Поля рассеяния экспериментальных точек на рис. 46 и 47 говорят об отсутствии явных зависимостей коэффициента навалов ϵ_H и относительной высоты навалов ϵ_{BH} от глубины внедрения АЗ a . На наш взгляд, на параметры ϵ_H и ϵ_{BH} сильно влияют случайные факторы, в том числе изменение структуры металла навалов, которое не учитывается теоретической моделью. В связи с этим точность определения параметров ϵ_H и ϵ_{BH} с помощью формул (110) и (113) невысока.

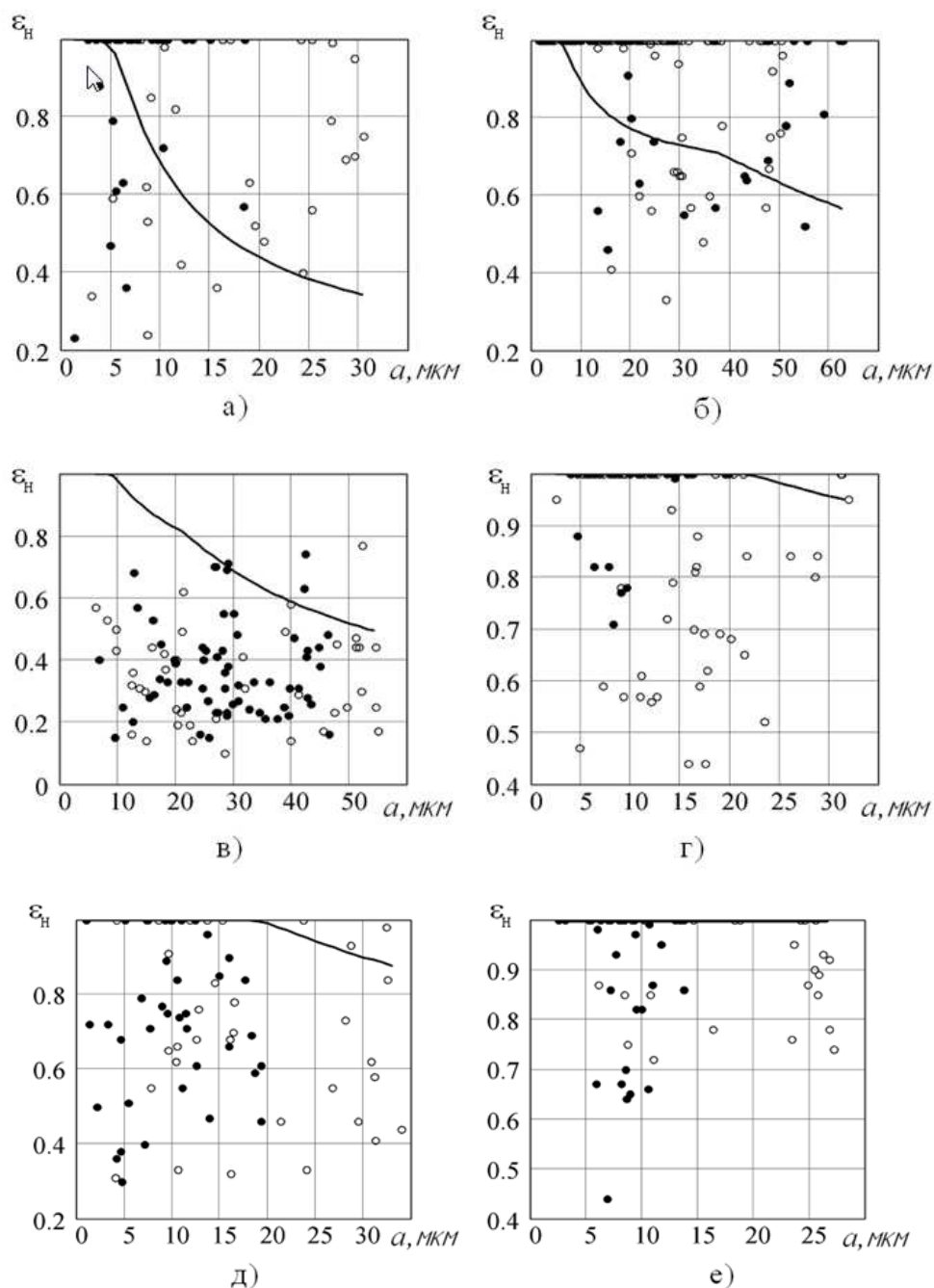


Рис. 45. Зависимость коэффициента навалов ϵ_H от глубины внедрения единичного зерна a
 — аналитическая модель; \circ — «облако» экспериментальной точек ($V = 35$ м/с);
 \bullet — «облако» экспериментальной точек ($V = 70$ м/с);
 а — РВ № 1; б — РВ № 2; в — РВ № 3; г — РВ № 4; д — РВ № 5; е — РВ № 6

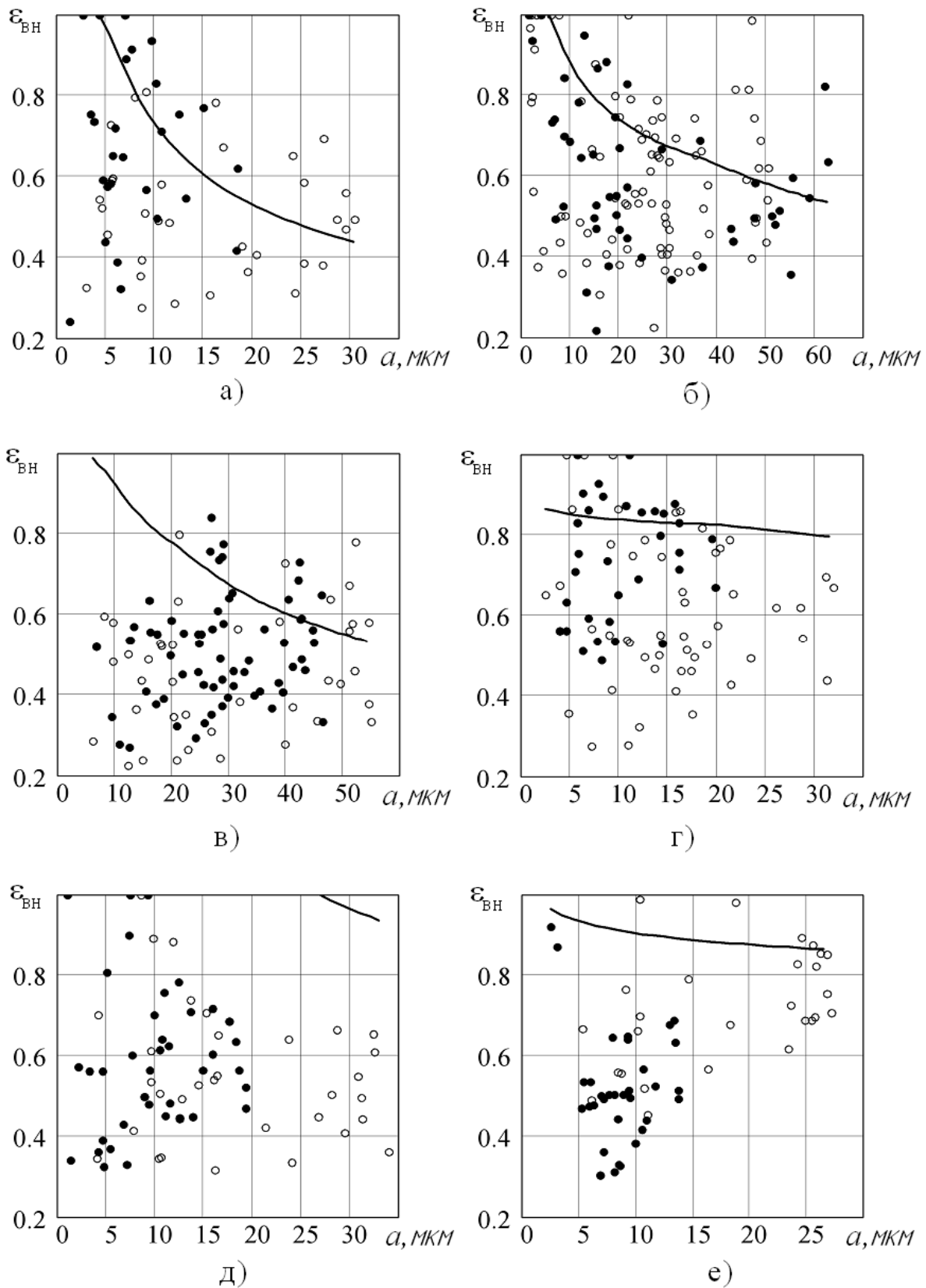


Рис. 46. Зависимость относительной высоты навалов ϵ_{BH} от глубины внедрения единичного зерна a

— аналитическая модель; \circ — «облако» экспериментальных точек ($V = 35$ м/с); \bullet — «облако» экспериментальных точек ($V = 70$ м/с);

а — ПВ № 1; б — ПВ № 2; в — ПВ № 3; г — ПВ № 4; д — ПВ № 5; е — ПВ № 6

4.2 Теоретико-экспериментальные исследования процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности

Разработанный в главе 2 комплекс моделей может быть использован для относительной оценки влияния различных условий шлифования на максимальную глубину внедрения рабочих частей зёрен a_{\max} и параметры шероховатости обработанной поверхности.

Сравним влияние на параметры a_{\max} , R_{\max} , Ra , Rz глубины шлифования и числа выхаживающих ходов. Условия проведения первой серии компьютерных экспериментов были следующие. Плоское шлифование ШК 1 450×63×203 WA F46 K 6 V (25A 40 CM1 6 K). Режим правки тонкий (приложение 10). Режимы обработки: окружная скорость ШК $V_{\text{кр}} = 35$ м/с, скорость заготовки $V_3 = 22,5$ м/мин, поперечная подача $S_{\text{поп}} = 0$. Варьировали глубиной шлифования t и числом выхаживающих ходов $n_{\text{вых}}$. План проведения серии экспериментов представлен в табл. 2.

Таблица 2

План проведения первой серии экспериментов

Номер опыта	Глубина шлифования t , мкм	Число выхаживающих ходов $n_{\text{вых}}$
1	20	3
2	20	7
3	40	3
4	40	7

Теоретико-экспериментальные исследования проводили в следующей последовательности. На первом этапе в системе MathCAD моделировали РС круга согласно алгоритму в приложении 11. Параметры $b = 7,52$ и $v = 0,97$ РС зерна выбрали из приложения 7. Штучную плотность $n_{\text{AM}} = 4524$ шт./г определили по табл. 1. Параметры β -распределения $\gamma = 0,87$, $\eta = 3,2$ вершин неровностей РП круга и глубину РС $h_{\text{PC}} = 465$ мкм выбрали из приложения 15. Модель РС круга представлена на рис. 48.

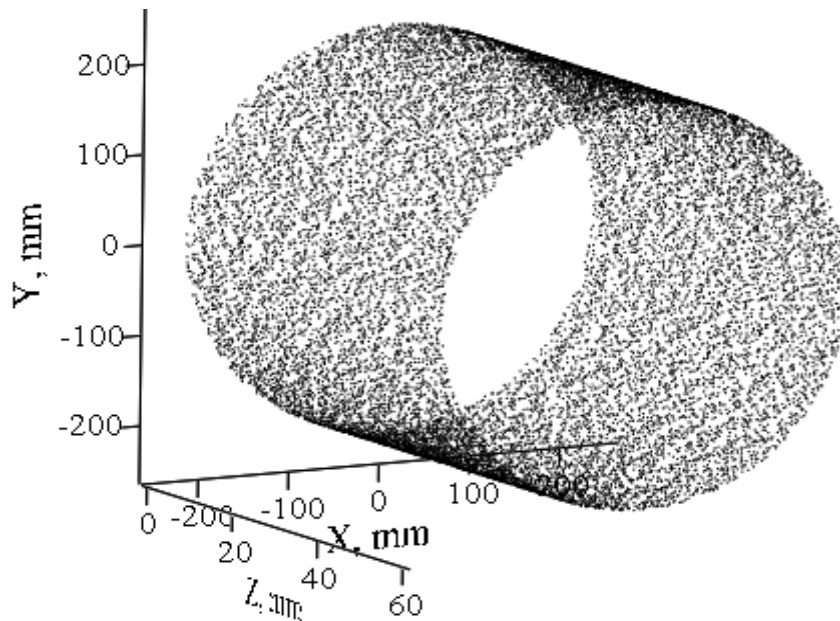


Рис. 47. Модель РС круга 1 450×63×203 WA F46 K 6 V (25A 40 CM1 6 K) в MathCAD

На втором этапе моделировали траекторию движения вершины РС каждого зерна в пространстве и определяли её координаты в рассматриваемом поперечном сечении заготовки согласно алгоритму в приложении 12. Необходимые для этого режимы обработки указаны выше. На третьем этапе моделировали процесс формирования поперечного микропрофиля детали (рис. 49) согласно алгоритму в приложении 14 и определяли параметры $a_{\max} = \max\{a_j\}$, R_{\max} , Ra , Rz .

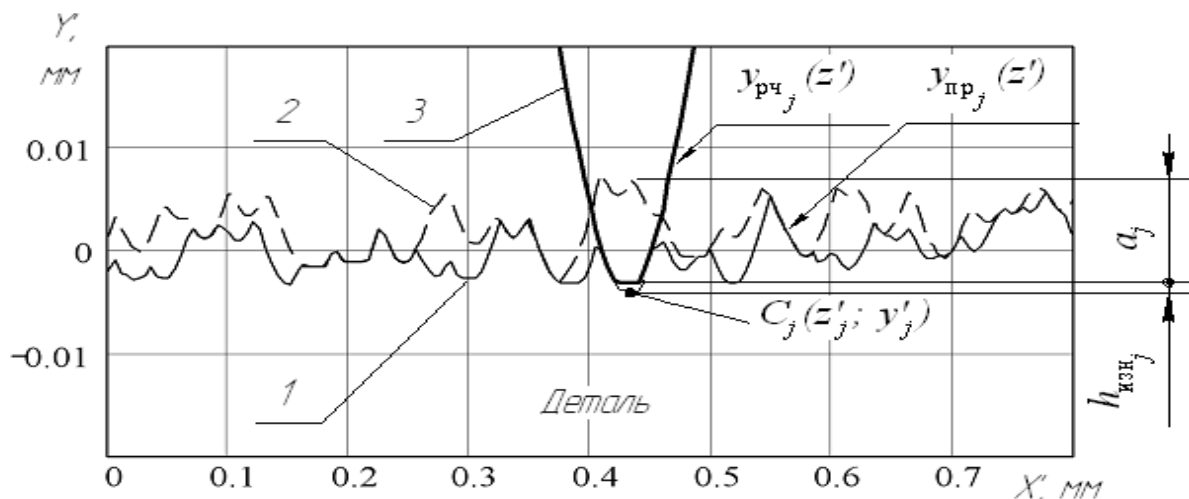


Рис. 48. Определение микропрофиля детали в MathCAD

1 – микропрофиль детали; 2 – микропрофиль заготовки до последнего рабочего хода ШК;
3 – РС зерна

Для одних и тех же условий эксперимента проводили 40 параллельных опытов. В результате статистической обработки экспериментальных данных

определяли интервальные оценки генеральных средних указанных параметров, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты первой серии компьютерных экспериментов, мкм

Номер опыта	a_{\max}	R_{\max}	Ra	Rz
1	$2,31 \pm 0,39$	$5,0 \pm 0,14$	$0,76 \pm 0,01$	$4,22 \pm 0,06$
2	$1,34 \pm 0,26$	$4,24 \pm 0,06$	$0,61 \pm 0,01$	$3,55 \pm 0,04$
3	$2,44 \pm 0,33$	$5,55 \pm 0,11$	$0,79 \pm 0,01$	$4,51 \pm 0,08$
4	$1,45 \pm 0,28$	$4,72 \pm 0,05$	$0,70 \pm 0,01$	$3,88 \pm 0,04$

Сравнив между собой результаты экспериментов, можно принять, что увеличение глубины шлифования t в 2 раза при последующем выхаживании почти не влияет на исследуемые параметры. Расхождение соответствующих значений не превышает 10 %. Полученный результат соответствует выводам А.В. Королёва [29] и В.В. Ефимова [17] для случая, когда глубина шлифования t превышает параметр R_{\max} микропрофиля заготовки. Таким образом, можно увеличить съём обрабатываемого материала теоретически в 2 раза, т.е. повысить производительность шлифования, без снижения шероховатости поверхности. Практически данная закономерность будет соблюдаться лишь при абсолютной жёсткости технологической системы. При малой жёсткости и наличии вибраций увеличение съёма будет менее существенным, а шероховатость увеличится.

Увеличение числа выхаживающих ходов с 3 до 7 приводит к уменьшению параметра a_{\max} в среднем на 40 %, а параметров R_{\max} , Ra , Rz – на 15 – 20 %, однако при этом увеличивается в 2 раза основное время обработки, т.е. уменьшается производительность шлифования.

Рассмотрим случай круглого наружного шлифования и сравним влияние на параметры a_{\max} , R_{\max} , Ra , Rz продольной подачи на оборот заготовки S_0 и окружной скорости заготовки V_3 . Условия проведения второй серии компьютерных экспериментов были следующие. ШК 1 400×40×127 25A F46 L 6 V (25A 40 CM2 6 K). Режим правки тонкий (приложение 10). Диаметр шлифуемой поверхности $D = 110$ мм. Окружная скорость ШК $V_{кр} = 35$ м/с. Варьировали окружной скоростью заготовки V_3 и продольной подачей на оборот S_0 . План проведения серии экспериментов представлен в табл. 4. Каждый эксперимент включал 6 двойных рабочих ходов. Глубина обработки по рабочим ходам представлена в табл. 5.

Таблица 4

План проведения второй серии экспериментов

Номер опыта	Подача на оборот заготовки S_0 , мм/об	Окружная скорость заготовки V_3 , м/мин
1	2,5	28
2	2,5	56
3	5	28
4	5	56

Таблица 5

Глубина обработки по рабочим ходам при проведении каждого эксперимента

Номер р.х.	Глубина шлифования t , мкм
1	8
2	0
3	8
4	0
5	4
6	0
7	4
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0

Теоретико-экспериментальные исследования проводили по методике, приведённой для первой серии экспериментов, за исключением второго этапа: моделирование траектории движения вершины РЧ каждого зерна в пространстве осуществляли согласно алгоритму в приложении 13.

В результате статистической обработки экспериментальных данных определяли интервальные оценки генеральных средних параметров a_{\max} , R_{\max} , Ra , Rz , которые представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты второй серии компьютерных экспериментов, мкм

Номер опыта	a_{\max}	R_{\max}	Ra	Rz
1	$1,27 \pm 0,18$	$1,85 \pm 0,07$	$0,262 \pm 0,004$	$1,56 \pm 0,04$
2	$1,54 \pm 0,23$	$2,65 \pm 0,07$	$0,383 \pm 0,008$	$2,15 \pm 0,05$
3	$1,59 \pm 0,26$	$2,34 \pm 0,08$	$0,344 \pm 0,008$	$2,00 \pm 0,05$
4	$2,48 \pm 0,24$	$3,70 \pm 0,17$	$0,54 \pm 0,01$	$3,25 \pm 0,11$

Сравнив между собой результаты экспериментов, приходим к выводу, что увеличение продольной подачи на оборот S_0 в 2 раза приводит к увеличению исследуемых параметров a_{\max} , R_{\max} , Ra , Rz . Степень такого влияния зависит от окружной скорости заготовки V_3 . Из экспериментов 1 и 3 следует, что a_{\max} увеличивается на 25 %, R_{\max} , Ra , Rz – на 10...30 %. Из экспериментов 2 и 4 следует, что a_{\max} увеличивается на 60 %, R_{\max} , Ra , Rz – на 20...40 %.

Увеличение окружной скорости заготовки V_3 в 2 раза тоже приводит к увеличению параметров a_{\max} , R_{\max} , Ra , Rz . Степень такого влияния зависит от продольной подачи на оборот S_0 . Из экспериментов 1 и 2 следует, что a_{\max} увеличивается на 21 %, R_{\max} , Ra , Rz – на 30...50 %. Из экспериментов 3 и 4 следует, что a_{\max} увеличивается на 56 %, R_{\max} , Ra , Rz – на 40...60 %.

Из полученных результатов можно заключить, что при прочих равных условиях окружная скорость заготовки V_3 сильнее влияет на шероховатость, чем продольная подача на оборот S_0 .

Таким образом, рассмотренные примеры применения разработанного в главе 2 комплекса моделей показали возможность их использования для относительной оценки влияния различных условий шлифования на максимальную глубину внедрения рабочих частей зёрен a_{\max} и параметры шероховатости обработанной поверхности.

4.3 Сопоставление теоретических и экспериментальных значений параметров шероховатости для различных видов шлифования

Оценить точность определения параметров шероховатости с помощью разработанной в главе 2 имитационной модели позволит сравнение результатов её использования с результатами экспериментов по шлифованию опытных образцов. Для решения этой задачи было проведено несколько серий экспериментов.

Первая серия экспериментов была проведена на плоскошлифовальном станке модели 3Л722В. ШК 1 450×63×203 WA F46 К 6 V (25А 40 СМ1 6 К). Правка осуществлялась алмазным карандашом с алмазами, расположенными цепочкой (карандаш 3908-0054 ГОСТ 607-80). Шлифовали пластины-образцы из стали 38Х2Н2МА (HRC 27...34, $\sigma_B = 860$ МПа) размерами 60×15×8 мм. В качестве СОЖ применялся 1,5 %-ный содовый раствор. Остальные условия аналогичны условиям проведения первой серии компьютерных экспериментов в п. 4.2. План их проведения представлен в табл. 2.

При одном и том же сочетании уровней варьирования исходными параметрами обрабатывали 3 пластины-образца. Параметры шероховатости пластин-образцов измеряли на профилографе модели 170623.

Результаты первой серии экспериментов представлены в табл. 7. Относительные погрешности определения параметров шероховатости с помощью имитационной модели (см. табл. 3 и 7) представлены в табл. 8. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных значений параметра R_{max} составляет 16 %, параметра Ra – 19 %, параметра Rz – 14 %.

Таблица 7

Результаты первой серии натуральных экспериментов, мкм

Номер опыта	R_{max}	Ra	Rz
1	$4,3 \pm 0,4$	$0,64 \pm 0,01$	$3,7 \pm 0,3$
2	$4,2 \pm 0,8$	$0,6 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,4$
3	$5,3 \pm 0,3$	$0,75 \pm 0,02$	$4,1 \pm 0,2$
4	$4,3 \pm 0,1$	$0,66 \pm 0,04$	$3,7 \pm 0,1$

Таблица 8

Относительные погрешности в определении параметров шероховатости первой серии экспериментов, %

Номер опыта	R_{max}	Ra	Rz
1	16	19	14
2	1	2	8
3	5	5	10
4	10	6	5

Вторая серия экспериментов была проведена на круглошлифовальном станке модели 3E153. ШК 1 400×40×127 25A F46 L 6 V (25A 40 CM2 6 K). Правка осуществлялась алмазным карандашом с алмазами, расположенными цепочкой (карандаш 3908-0054 ГОСТ 607–80). Шлифовали валы-образцы из стали 38X2H2MA (HRC 27...34, $\sigma_b = 860$ МПа) диаметром $D = 110$ мм, длиной $L = 70$ мм. В качестве СОЖ применялся 1,5 %-ный содовый раствор. Остальные условия аналогичны условиям проведения второй серии компьютерных экспериментов в п. 4.3. План их проведения представлен в табл. 4.

При одном и том же сочетании уровней варьирования исходными параметрами обрабатывали 3 вала-образца. Параметры шероховатости измеряли на портативном профилографе TR200.

Результаты второй серии экспериментов представлены в табл. 9.

Результаты второй серии натуральных экспериментов, мкм

Номер опыта	R_{max}	Ra	Rz
1	$1,57 \pm 0,10$	$0,22 \pm 0,01$	$1,34 \pm 0,15$
2	$2,53 \pm 0,15$	$0,36 \pm 0,02$	$2,04 \pm 0,20$
3	$2,11 \pm 0,12$	$0,32 \pm 0,01$	$1,76 \pm 0,15$
4	$3,3 \pm 0,20$	$0,47 \pm 0,02$	$2,80 \pm 0,15$

Относительные погрешности определения параметров шероховатости с помощью имитационной модели (см. табл. 6 и 9) представлены в табл. 10. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных значений параметра R_{max} составляет 18 %, параметра Ra – 19 %, параметра Rz – 16 %.

Таблица 10

Относительные погрешности в определении параметров шероховатости второй серии экспериментов, %

Номер опыта	R_{max}	Ra	Rz
1	18	19	16
2	5	6	5
3	11	7	14
4	12	15	16

Таким образом, сопоставление результатов использования комплекса разработанных математических моделей с результатами экспериментов по шлифованию опытных образцов показало, что их максимальное расхождение не превышает 20 %. На наш взгляд, такую погрешность можно считать приемлемой для предварительной количественной оценки параметров шероховатости шлифованной поверхности. При этом теоретические значения параметров шероховатости во всех случаях превышают экспериментальные. Следовательно, шлифование с заданными режимами заведомо обеспечит шероховатость меньше прогнозируемой.

4.4 Выводы и результаты

1. Разработанная математическая модель формирования профиля царапины довольно хорошо в качественном отношении описывает реальный процесс её формирования при варьировании режимами микрорезания-царапания. При этом имеет место удовлетворительное совпадение результатов расче-

тов высоты навалов $h_{i_{\max}}$ и расстояния между их вершинами l_n с результатами измерений. Это позволяет констатировать тот факт, что навалы у края царапины имеют форму кругового сектора. При этом разработанную модель можно использовать для прогнозирования высоты h_n царапин, в том числе формируемых наиболее удалёнными от оси ШК зёрнами.

2. Для большинства опытов средние теоретические значения коэффициента навалов ε_n и относительной высоты навалов $\varepsilon_{вн}$ в зависимости от глубины внедрения РВ a соответствуют середине поля рассеивания экспериментальных результатов. На эти параметры сильно влияют случайные факторы, в том числе изменение структуры металла навалов, которое не учитывается разработанной математической моделью. Использование среднего значения коэффициента навалов ε_n в ряде существующих моделей формообразования царапин (п. 1.3) приводит к значительным погрешностям при прогнозировании их высоты.

3. Разработано программное обеспечение для анализа поперечных профилей единичных царапин.

4. Разработанная имитационная модель процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности может быть использована для относительной оценки влияния характеристики ШК и режимов шлифования на параметры шероховатости.

5. В количественном отношении наблюдается удовлетворительное соответствие теоретических данных экспериментальным. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных в результате проведённых экспериментов не превысило 20 %. При этом теоретические значения параметров во всех случаях превышают экспериментальные. Следовательно, шлифование с заданными режимами заведомо обеспечит шероховатость меньше прогнозируемой.

5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ

В предыдущей главе была показана возможность использования имитационной модели процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности для прогнозирования соответствующих параметров микропрофиля поверхности детали R_{max} , Ra , Rz . На основе имитационной модели и математической модели образования микропрофиля единичной абразивной царапины был разработан алгоритм обеспечения требуемой шероховатости шлифованной поверхности с учётом отсутствия дефектов в виде абразивных царапин (приложение 16) и создано соответствующее программное обеспечение. В качестве исходных данных используются в общем случае 20 параметров, характеризующие круг, заготовку и условия обработки. Выходными параметрами являются высотные параметры шероховатости R_{max} , Ra , Rz и максимальная высота единичных абразивных царапин $h_{o_{max}}$.

5.1 Применение разработанного комплекса математических моделей для решения проблемы формирования шероховатости шлифованной поверхности конкретной детали

Разработанный комплекс математических моделей был применён к условиям абразивной обработки детали «Шток», изготавливаемой на ОАО «Тяжмаш» (г. Сызрань). Материал детали – сталь 38Х2Н2МА (HRC 27...34, $\sigma_b = 860$ МПа). В ТП обработки указанной детали предусматривается шлифование цилиндрической поверхности до размера $\varnothing 125_{-0,263}^{-0,223}$ под нанесение хромового покрытия. Допуск на указанный размер соответствует 7 качеству. Последующее хромирование диктует повышенные требования к шероховатости [6, 14, 39] $Ra = 0,32$ мкм, что отражается на режимах обработки заготовки. Продольная подача на оборот заготовки $S_o = 5$ мм/об занижена приблизительно в 5 раз относительно рекомендуемых в технологической литературе [48, 61, 72] значений, а окружная скорость заготовки $V_3 = 12$ м/мин – приблизительно в 2...2,5 раза. Несмотря на значительное уменьшение параметров S_o и V_3 , шлифование в заводских условиях приводит к возникновению на поверхности $\varnothing 125_{-0,263}^{-0,223}$ глубоких царапин высотой $h_{o_{max}} \geq 2,5$ мкм (рис. 50), что недопустимо согласно техническим требованиям.

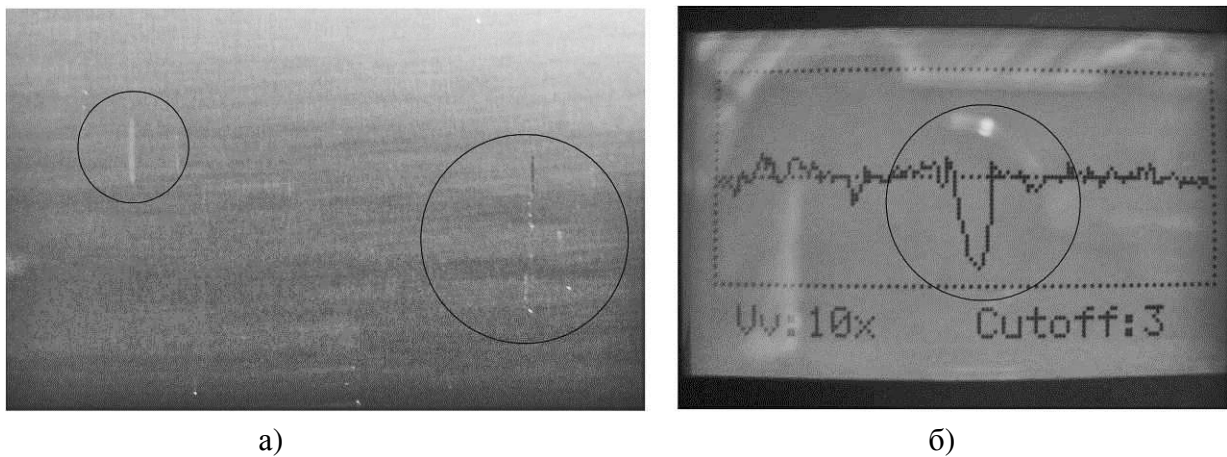


Рис. 49. Царапины на цилиндрической поверхности детали «Шток» после шлифования в заводских условиях (выделены окружностями)
 а – фотография царапин; б – фотография профилограммы
 (замеры на портативном профилографе TR200)

Наличие глубоких царапин приводит к повышению и значительным колебаниям параметров шероховатости: $Ra = 0,30 \dots 0,50$ мкм, $Rz = 2,0 \dots 3,2$ мкм. Для решения указанных проблем в рамках последующей токарно-винторезной операции производится полировка поверхности $\varnothing 125_{-0,223}^{-0,263}$, а затем слесарная операция доводки с помощью шлифовальных шкурок.

Формирование на шлифованной поверхности глубоких царапин можно объяснить несколькими причинами. Л.В. Худобин и В.Г. Ромашкин [65, 87] объясняют это наличием механических примесей в СОЖ: абразивные частицы шлама как бы «удлиняют» зёрна ШК, участвуя в единичных актах резания. Однако механизм прикрепления абразивных частиц к зёрнам в рассмотренных работах [65, 87] не раскрыт. Авторы не привели формул для прогнозирования высоты соответствующих царапин в зависимости от характеристики ШК и режимов шлифования.

Появление глубоких царапин можно также объяснить дисперсией размеров абразивных зёрен. Согласно экспериментальным исследованиям [15, 38, 49, 94], проведённым под руководством доцента А.П. Осипова, в навеске абразива зернистости $N = 40$ (F40) были обнаружены зёрна с размерами до 700 мкм. Если они окажутся наиболее удалёнными от оси ШК, то будут формировать глубокие царапины.

С целью минимизации высоты царапин и достижения требуемой шероховатости поверхности $Ra \leq 0,32$ мкм на круглошлифовальной операции были проведены компьютерные эксперименты при различных условиях шлифования с использованием разработанного в главах 2 и 3 комплекса математических моделей. Значения и интервалы варьирования характеристиками ШК и режимами

обработки определяли с учётом технологических рекомендаций [48, 61, 72, 83 и др.]: зернистость круга $N = 16, 25, 40$ (F90, F60, F40), $t = 0,01$ мм, $S_0 = 5$ и 20 мм/об, $V_3 = 12$ и 30 м/мин, $V_{кр} = 35$ и 150 м/с, $n_{вых} = 2$ и 6 .

Остальные характеристики ШК и режимы обработки соответствовали заводским: абразивный материал – белый электрокорунд марки 24А, твёрдость ШК СМ2, номер структуры 6, керамическая связка, режим правки – тонкий (приложение 10).

Моделирование обработки делали «Шток» проводили в соответствии с разработанным алгоритмом обеспечения требуемой шероховатости шлифованной поверхности с учётом отсутствия дефектов в виде абразивных царапин (приложение 16). Результаты моделирования представлены в виде графиков на рис. 51.

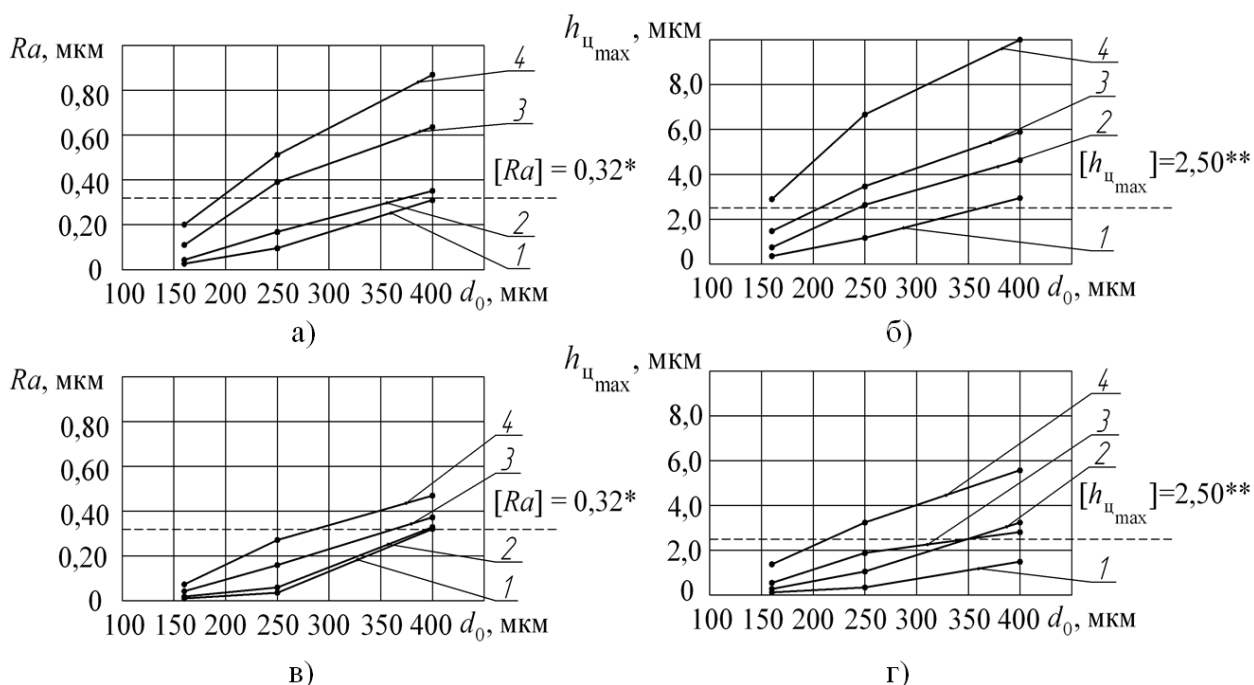


Рис. 50. Результаты моделирования процесса формирования шероховатости поверхности детали «Шток» (а) и процесса формирования микропрофиля единичных царапин (б)

а, б – $V_{кр} = 35$ м/с; в, г – $V_{кр} = 150$ м/с;

1 – $S_0 = 5$ мм/об, $V_3 = 12$ м/мин, $n_{вых} = 6$; 2 – $S_0 = 5$ мм/об, $V_3 = 12$ м/мин, $n_{вых} = 2$;

3 – $S_0 = 20$ мм/об, $V_3 = 30$ м/мин, $n_{вых} = 6$; 4 – $S_0 = 20$ мм/об, $V_3 = 30$ м/мин, $n_{вых} = 2$;

* требуемая шероховатость; ** экспериментальный порог исчезновения абразивных царапин

Из графиков следует, что наиболее эффективным путём достижения требуемой шероховатости поверхности $Ra \leq 0,32$ μm и исчезновения царапин является повышение окружной скорости ШК с 35 до 150 м/с и снижение зернистости до F90 (16) или F60 (25). Однако в условиях ОАО «Тяжмаш» путь увеличения скорости ШК реализовать не удалось. В связи с этим рекомендуется уменьшать зернистость до F60 (25), однако при этом необходимо назначить

минимальную подачу ($S_0 = 5$ мм/об) и окружную скорость заготовки ($V_3 = 12$ м/мин). При этом достаточно провести два выхаживающих хода. Использование ШК зернистостью F90 (16) не рационально, поскольку это приведёт к увеличению количества правок в связи с более интенсивной засаливаемостью мелкозернистого ШК и, в конечном итоге, к уменьшению производительности круглошлифовальной операции.

Для подтверждения полученных результатов был проведен натурный эксперимент по шлифованию заготовки детали «Шток» на круглошлифовальном станке 3А164А кругом 1 750×80×305 25А 25-Н СМ2 6 К (WA F60 L 6 V) с режимами $t = 0,01$ мм, $S_0 = 5$ мм/об, $V_3 = 12$ м/мин, $V_{кр} = 35$ м/с, $n_{вых} = 2$. Правка осуществлялась алмазным карандашом 3908-0054 ГОСТ 607–80. Режим правки – тонкий (приложение 10). СОЖ: 1,5 %-ный содовый раствор.

В результате натуральных экспериментов полученное значение Ra не превысило требуемое конструкторской документацией $Ra = 0,32$ мкм. Визуально абразивные царапины на поверхности детали «Шток» не наблюдались.

Таким образом, разработанный алгоритм обеспечения требуемой шероховатости шлифованной поверхности с учётом отсутствия дефектов в виде абразивных царапин (приложение 16) позволяет получить соответствующие научно-обоснованные рекомендации по выбору характеристик ШК и режимов шлифования.

5.2 Экономическая эффективность результатов проведённых теоретико-экспериментальных исследований проблемы формирования шероховатости конкретной детали

В параграфе 5.1 были показаны пути достижения требуемой шероховатости детали «Шток». Переход к предлагаемому варианту ТП приведёт к изменению трудоёмкости и себестоимости её изготовления. Дадим количественную оценку указанным изменениям, поскольку они имеют большое значение при решении вопроса о замене базового варианта ТП предлагаемым.

Затраты времени на проведение операций шлифования, полирования на токарно-винторезном станке и ручной доводки заготовки детали «Шток» до и после внедрения результатов проведённых экспериментов определяли непосредственно на рабочих местах методом хронометража (табл. 11). Из таблицы следует, что трудоёмкость механической обработки штока на операциях шлифования, полирования и доводки уменьшилась на 2 ч или 29 %.

Затраты времени на проведение финишных операций обработки заготовки детали «Шток»

	Финишные операции обработки заготовки детали «Шток»					
	Круглошлифовальная		Токарно-винторезная		Доводочная	
	до	после	до	после	до	после
Штучно-калькуляционное время $t_{\text{шт-к}_i}$, ч	4,0	4,5	1,5	0,5	1,5	0
Экономия времени, ч	- 0,5		+ 1,0		+ 1,5	

Рассчитаем составляющие затрат технологической себестоимости, значения которых изменятся при переходе от базового варианта ТП к предлагаемому. К ним можно отнести заработную плату рабочих Z_o , амортизационные отчисления от стоимости оборудования A_o , затраты на шлифовальные круги I_p и электроэнергию L . Для их определения воспользуемся методом прямого калькулирования [72]. Расчёты проведём в ценах 2011 года.

Зарботную плату рабочих при сдельной оплате труда [72] определим по формуле

$$Z_o = \left(\sum_{i=1}^m g_i \right) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta, \quad (114)$$

где g_i – сдельная расценка по операциям, руб./шт.

$$g_i = l_i \cdot t_{\text{шт-к}_i}, \quad (115)$$

где l_i – часовая тарифная ставка рабочего данного разряда на операции, руб./ч ($l_i \approx 70$ руб.); $t_{\text{шт-к}_i}$ – норма штучно-калькуляционного времени на операцию (табл. 11), ч; α – коэффициент, учитывающий премии и другие доплаты, увеличивающие фактический часовой заработок рабочего по сравнению с тарифной ставкой ($\alpha = 1,1$); β – коэффициент дополнительной заработной платы ($\beta = 1,07 \dots 1,09$) [72, с. 907]; γ – коэффициент страховых взносов ($\gamma = 1,34$). δ – коэффициент, учитывающий многостаночность работы и численность бригады, а также среднюю степень перевыполнения технически обоснованных норм, $\delta = 1$ [72]. Для операции шлифования, полирования и доводки до внедрения результатов проведенных экспериментов:

$$g_1 = 70 \cdot 4,0 = 280 \text{ руб.};$$

$$g_2 = 70 \cdot 1,5 = 105 \text{ руб.};$$

$$g_3 = 70 \cdot 1,5 = 105 \text{ руб.};$$

$$Z_o = (280 + 105 + 105) \cdot 1,1 \cdot 1,08 \cdot 1,34 \cdot 1 = 780 \text{ руб.},$$

после внедрения результатов проведённых экспериментов:

$$g_1 = 70 \cdot 4,5 = 315 \text{ руб.};$$

$$g_2 = 70 \cdot 0,5 = 35 \text{ руб.};$$

$$g_3 = 70 \cdot 0 = 0 \text{ руб.};$$

$$Z_0 = (315 + 35 + 0) \cdot 1,1 \cdot 1,08 \cdot 1,34 \cdot 1 = 557 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления от стоимости оборудования [72] отсутствуют, поскольку шлифование производится на круглошлифовальном станке 3А164А 1976 г.в., а последующая полировка на токарно-винторезном станке 16К20 1980 г.в. Данное оборудование полностью амортизировано.

Затраты на шлифовальные круги можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$I_p = \Phi_{\text{и}} \cdot \frac{n_{\text{пр}}}{N_{\text{пр}}}, \quad (116)$$

где $\Phi_{\text{и}}$ – стоимость ШК ($\Phi_{\text{и}} \approx 6000$ руб.), $n_{\text{пр}}$ – число правок за время обработки, $N_{\text{пр}}$ – общее число правок.

$$N_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{кр}_{\text{max}}} - R_{\text{кр}_{\text{min}}}}{t_{\text{пр}}}, \quad (117)$$

$R_{\text{кр}_{\text{max}}}$ – радиус нового ШК ($R_{\text{кр}_{\text{max}}} = 750$ мм); $R_{\text{кр}_{\text{min}}}$ – минимально допустимый радиус ШК, при котором происходит его замена ($R_{\text{кр}_{\text{min}}} = 500$ мм); $t_{\text{пр}}$ – глубина слоя абразива, снимаемого за правку ($t_{\text{пр}} \approx 0,5$ мм). Для операции шлифования до внедрения результатов проведенных экспериментов:

$$N_{\text{пр}} = \frac{750 - 500}{0,5} = 500 \text{ шт.};$$

$$I_p = 6000 \cdot \frac{4}{500} = 48 \text{ руб.},$$

после внедрения результатов проведённых экспериментов

$$N_{\text{пр}} = \frac{750 - 500}{0,5} = 500 \text{ шт.};$$

$$I_p = 6000 \cdot \frac{6}{500} = 72 \text{ руб.},$$

Затраты на технологическую электроэнергию определим по следующей формуле:

$$L_i = N_3 \cdot t_{\text{шт-к}_i} \cdot \eta_{\text{зв}} \cdot \eta_{\text{зм}} \cdot \Pi_3, \quad (118)$$

где N_3 – установленная мощность электродвигателей (для станка 3А164А – $N_3 = 14$ кВт, для станка 16К20 – $N_3 = 11$ кВт); $\eta_{\text{зв}}$, $\eta_{\text{зм}}$ – коэффициенты загрузки станков по времени и мощности соответственно (для станка 3А164А – $\eta_{\text{зв}} = 0,50$, $\eta_{\text{зм}} = 0,40$; для станка 16К20 – $\eta_{\text{зв}} = 0,40$, $\eta_{\text{зм}} = 0,50$, [72, с. 914]), Π_3 –

цена 1 кВт·ч электроэнергии ($C_3 = 2,91$ руб./кВт·ч). Для операции шлифования и полирования до внедрения результатов проведенных экспериментов:

$$L_1 = 14 \cdot 4,0 \cdot 0,50 \cdot 0,40 \cdot 2,91 = 33 \text{ руб.};$$

$$L_2 = 11 \cdot 1,5 \cdot 0,40 \cdot 0,50 \cdot 2,91 = 10 \text{ руб.};$$

$$L = 33 + 10 = 43 \text{ руб.},$$

после внедрения результатов проведенных экспериментов

$$L_1 = 14 \cdot 4,5 \cdot 0,50 \cdot 0,40 \cdot 2,91 = 37 \text{ руб.};$$

$$L_2 = 11 \cdot 0,5 \cdot 0,40 \cdot 0,50 \cdot 2,91 = 3 \text{ руб.};$$

$$L = 37 + 3 = 40 \text{ руб.}$$

Рассчитанные составляющие денежных затрат на операции шлифования, полирования и доводки сведём в табл. 12. Из таблицы следует, что себестоимость механической обработки штока на операциях шлифования, полирования и доводки уменьшилась на 202 руб. или 23 %.

Таблица 12

Денежные затраты на проведение финишных операций обработки заготовки детали «Шток»

Составляющая технологической себестоимости на проведение финишных операций шлифования, полирования и доводки	До	После	Экономия
Зарплата основных рабочих Z_o , руб.	780	557	223
Затраты на ШК I_p , руб.	48	72	- 24
Затраты на электроэнергию L , руб.	43	40	3
Итого денежных затрат, руб.	871	669	202

Годовая экономия $\Delta \mathcal{E}_r$ с учётом затрат на подготовку производства, общецеховых, общезаводских затрат и рентабельности:

$$\Delta \mathcal{E}_r = N_{\text{год}} \cdot \Delta C \cdot (k_{\text{пп}} + k_{\text{оц}} + k_{\text{оз}}) \cdot k_p,$$

где $N_{\text{год}}$ – годовая программа выпуска деталей «Шток» и аналогов ($N_{\text{год}} \approx 140$ шт./год); ΔC – разность технологических себестоимостей на проведение финишных операций по базовому и предлагаемому ТП ($\Delta C = 202$ руб.); $k_{\text{пп}}$ – коэффициент, учитывающий затраты на подготовку производства ($k_{\text{пп}} = 1,7$); $k_{\text{оц}}$ – коэффициент, учитывающий общецеховые затраты ($k_{\text{оц}} = 2,1$); $k_{\text{оз}}$ – коэффициент, учитывающий общезаводские затраты ($k_{\text{оз}} = 2,7$); k_p – коэффициент, учитывающий рентабельность производства ($k_p = 1,15$). Тогда

$$\Delta \mathcal{E}_r = 140 \cdot 202 \cdot (1,7 + 2,1 + 2,7) \cdot 1,15 = 211393 \text{ руб.}$$

5.3 Способ очистки рабочей поверхности шлифовального круга²

При проведении экспериментов, описанных в параграфе 2.4., для изучения РП ШК, первоначально ШК травили в соляной кислоте. Использование данного реактива требует приточно-вытяжной вентиляции, вредно сказывается на здоровье экспериментатора и, главное, не гарантирует качества процесса. Вместе с тем, механические методы очистки с помощью СОЖ, ультразвука и абразивных брусков оказывают на РП АИ давление до 300 МПа, вымывающиеся частицы упрочненного материала обрабатываемой поверхности могут деформировать абразивные зерна, составляющие СОЖ могут вступать в химическую реакцию со связкой АИ и способствовать вырыву абразивных зерен. Очистка с помощью магнитного поля не позволяет удалять из пор немагнитные материалы, например, аустенитные стали и чугуны, цветные металлы, и те магнитные включения, сила закрепления которых в порах ШК больше силы магнитного поля.

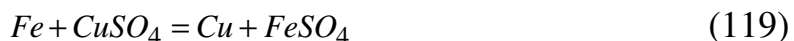
На наш взгляд, наиболее приемлемым и простым способом может стать способ очистки круга травлением, его легко осуществить в лабораторных условиях, но реактив для травления необходимо выбрать исходя из требований безопасности и экологичности.

Существует метод воздействия на рабочую поверхность ШК различными электролитами, в частности растворами из серной, азотной и соляной кислот. Для травления поверхности металлических изделий употребляют несколько сортов технической серной кислоты, в частности камерную, содержащую не менее 65% серной кислоты, башенную и Gloverную кислоты, содержащие не менее 75—76,5% серной кислоты. Для травления часто используют купоросное масло, содержащее не менее 92,5% серной кислоты. Азотная кислота с водой смешивается в любых отношениях. Концентрированная азотная кислота действует на многие металлы, кроме благородных. Концентрированная соляная кислота обычно содержит около 37,4% хлористого водорода. Соляная кислота выпускается двух сортов: сорт А содержит не менее 30% хлористого водорода, а сорт Б — не менее 27,5%. При травлении выше указанными кислотами шероховатую металлическую поверхность либо ШК помещают в концентрированный раствор данных кислот на неопределенный промежуток времени, затем промывают [143].

² Работы выполнены инженерами Машинным Д.А. и Шуляевым А.В. под руководством доцента Осипова А.П. и старшего преподавателя Федотова В.В. на кафедре «Технология машиностроения» Сызранского филиала СамГТУ

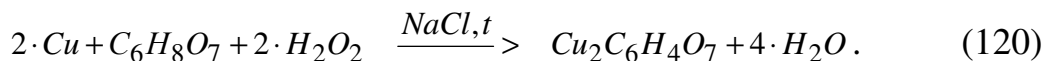
Кроме неопределенности времени травления данный метод химической очистки абразивной поверхности является вредным для здоровья человека, который вдыхает пары кислоты, кислота может привести к болезненным ранам, если попадет на чистую кожу, а утилизация продуктов реакции представляет собой достаточно сложную задачу.

Разработанный способ очистки заключается в том, что ионы железа при погружении круга в водный раствор медного купороса замещаются ионами меди



Затем абразивный инструмент промывается и погружается в раствор лимонной кислоты и перекиси водорода. Для быстрого и успешного проведения травления раствор подогревается до температуры выше 45°C: это ускорит ход реакции. При этом стоит обратить внимание на то, что перекись водорода при нагревании быстро разлагается, активно выделяя кислород. Для того чтобы избежать преждевременного разложения перекиси водорода, необходим значительный избыток обычной поваренной соли (NaCl), выступающего в роли катализатора.

Необходимые реагенты имеют низкую цену, не выделяют неприятные запахи, экологичны (соль и лимонная кислота являются распространенными пищевыми продуктами, а перекись водорода – дезинфицирующим средством). Более того, лимонная кислота образует прочнейший комплекс с медью, что исключает всякое влияние продуктов реакции на её скорость.



Объем и насыщенность раствора травителя зависит от объема тары для травления, а также от объема ШК и массы металла находящегося в порах инструмента. Однако, было рассчитано что 100 г 3% перекиси водорода, 30 г лимонной кислоты, 5 г поваренной соли хватит на травление 100 см² меди толщиной 35 мкм.

Технологию очистки проверяли на электрокорундовых кругах ПП 125x20x32. Засаливали все доступные поверхности кругов шлифуя образцы из сырых сталей. Степень загрязнения рабочей поверхности, определенная визуальным методом, - 85-90%.

Травление в слабо концентрированной соляной кислоте продолжалось двое суток, травление проходило на воздухе в закрытом контейнере. Периодически приходилось контейнеры вскрывать и проверять степень очистки. Степень загрязнения снизилась визуально только до 20-40%, так как продукты реакции закрывали доступ рабочему раствору в поры инструмента.

Травление по предложенному методу заняло около 12 часов. Степень загрязнения снизилась визуально до 5-20%, остались только металлические включения, проникшие глубоко в поры круга.

Визуальные результаты сравнения поверхности шлифовального круга до очистки и после представлены на рис.52.

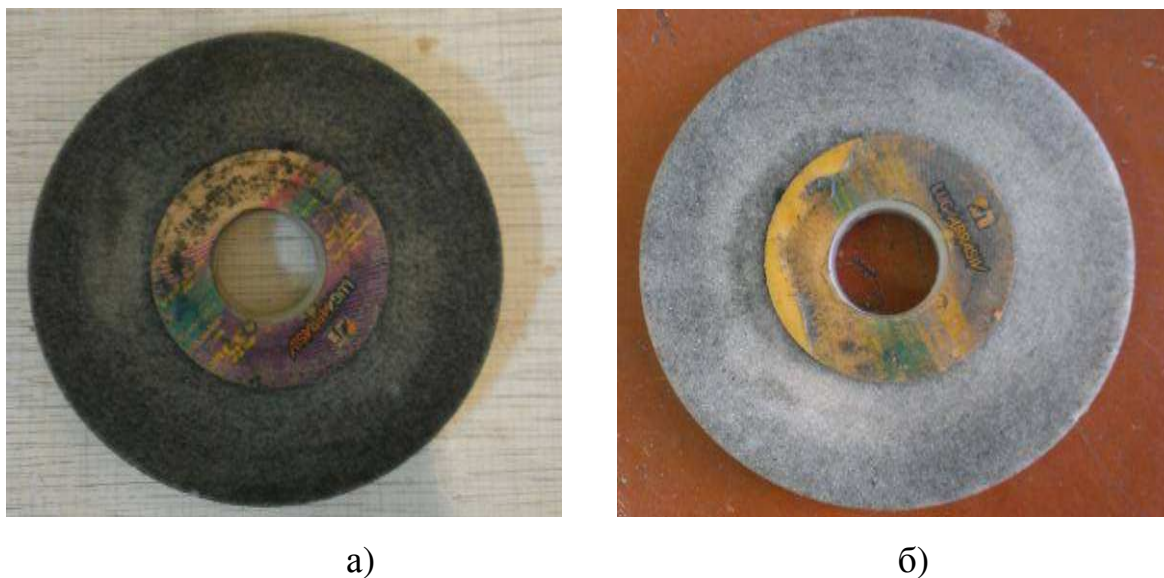


Рис. 52. Шлифовальный круг в процессе очистки
а) до очистки; б) после очистки

На представленных photographиях видно, что слабо засаленные участки поверхности очищаются практически на 100%, так же, как кромки шлифовального круга, в которые рабочий раствор проникает лучше всего.

Полезным эффектом снижения времени, в течение которого инструмент находился в водных растворах реагентов (в 4 раза), явилось значительное снижение времени на просушку инструмента и возможность проводить новые эксперименты по шлифованию этим инструментом. Шлифовальные круги, травившиеся традиционным методом, впитывали много соляной кислоты и воды, очень долго (в течение нескольких суток) в процессе естественной сушки не просыхали, и главное, теряли прочность связки, сильно изнашивались при дальнейших опытах шлифования поверхностей. Это связано, видимо, с химическим воздействием соляной кислоты на связку инструмента.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработан химический метод очистки РП ШК, позволяющий очистить ее более чем на 80%. Повысить степень очистки можно повторным травлением.

2. Разработанный метод теоретически не оказывает влияния на изменение геометрических параметров РП ШК на керамической связке, не снижает прочности связки, требует значительно меньше времени на очистку, что повы-

шает эффективность основных исследований, связанных с изучением абразивной обработки.

3. Продукты химических реакций являются ценными веществами, используемыми в текстильной промышленности для производства чернил и окраски шерсти, в сельском хозяйстве – как фунгицид и консервант дерева, в качестве лекарственного средства для лечения и профилактики железодефицитной анемии (железный купорос), а также в медицине – в качестве биологически активной добавки или антисептического средства в офтальмологической практике (цитрат меди).

4. Разработанный метод очистки РП ШК, на наш взгляд, может использоваться и в условиях промышленного производства, позволяя снижать затраты на правку круга.

5. Требуется провести дополнительные эксперименты по уточнению количества реагентов, времени травления, методов, ускоряющих процесс.

5.4 Выводы и результаты

1. В результате проведённых экспериментов были определены условия шлифования заготовки детали «Шток», обеспечивающие требуемую шероховатость $Ra = 0,32$ мкм и отсутствие на поверхности глубоких царапин.

2. Трудоёмкость механической обработки штока на операциях шлифования, полирования и доводки уменьшилась на 29 %; технологическая себестоимость – на 23 %. Общий экономический эффект составил 211393 руб. Таким образом, экономическая эффективность результатов доказана.

3. Разработан эффективный химический метод очистки РП ШК, позволяющий достаточно быстро очистить более 80% рабочей РП ШК, не снижая его прочности, с одновременным получением ценных химических веществ, реализация которых может снизить себестоимость шлифовальной операции. Этот вывод позволяет рекомендовать данный метод химической очистки для использования в промышленных условиях.

6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. В результате проведённого анализа априорной информации показана актуальность разработки математической модели формирования шероховатости шлифованной поверхности с учётом образования дефектов в виде единичных абразивных царапин.

2. Разработана имитационная модель процесса формирования шероховатости обработанной поверхности при различных видах шлифования с учётом характеристики круга, режимов его правки, колебаний и режимов шлифования.

3. Апробирован на практике метод параллельных сечений и разработано специальное приспособление для получения топографии рабочих поверхностей шлифовальных кругов. Получены статистические характеристики рабочих поверхностей различных шлифовальных кругов.

4. Разработана математическая модель формирования микропрофиля единичной абразивной царапины, которая базируется на объёмной модели рабочей части зерна в виде параболоида вращения. Получены зависимости для высоты всей абразивной царапины от геометрических параметров рабочей части зерна с учётом его износа, технологического режима и пластических свойств обрабатываемого материала.

5. В результате сопоставления результатов расчётов высоты навалов $h_{i \max}$ и расстояния между их вершинами l_n с результатами измерений установлено, что расхождение теоретических и экспериментальных данных в большинстве случаев не превышает 20 %. Принятая форма рабочих частей зёрен и навалов соответствуют форме шлифовочной канавки и навалов на профилограммах реальных абразивных царапин.

6. На основе комплекса полученных математических моделей разработаны и апробированы алгоритмы их реализации на ЭВМ. Создано программное обеспечение для выбора рациональных характеристик шлифовального круга и режимов шлифования в зависимости от требуемой шероховатости обработанной поверхности.

7. Разработанный комплекс математических моделей позволяет получить доверительные интервалы для максимальных значений высотных параметров шероховатости. Установлено, что шлифование с научно-обоснованными режимами на практике обеспечивает высотные параметры шероховатости на 20 % меньше теоретических значений.

8. Проведена опытно-промышленная проверка разработанного комплекса математических моделей на примере шлифования заготовки детали

«Шток». Трудоёмкость механической обработки штока на операциях шлифования, полирования и доводки уменьшилась на 29 %; технологическая себестоимость – на 23 %. Общий экономический эффект составил 211393 руб.

9. Разработан эффективный химический метод очистки РП ШК, позволяющий достаточно быстро очистить более 80% рабочей РП ШК, не снижая его прочности, с одновременным получением ценных химических веществ, реализация которых может снизить себестоимость шлифовальной операции. Этот вывод позволяет рекомендовать данный метод химической очистки для использования в промышленных условиях.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Геометрические параметры резцовой вставки №1 [67]

Величина заглубления РВ a , мкм	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$	ϵ , градусы	ρ , мкм
8,57	5,31	2,26	0,74	0,93	159,70	23,26
11,43	6,29	2,25	0,58	0,93	160,86	26,82
14,29	6,42	2,34	0,56	0,90	144,21	25,54
17,14	6,48	2,44	0,55	0,88	131,78	26,59
20,00	6,53	2,50	0,54	0,86	123,32	29,13
22,86	6,45	2,59	0,55	0,84	115,49	30,74
25,71	6,41	2,65	0,56	0,83	111,58	31,85
28,57	6,38	2,70	0,56	0,82	108,63	31,92
31,43	6,38	2,76	0,56	0,81	106,51	32,86
34,29	6,37	2,84	0,56	0,79	103,36	34,23
Среднее значение	6,302	2,533	0,576	0,859	126,54	29,29

Примечания. 1. $v_{л}$, $b_{л}$ – параметры аппроксимации *левого* контура рабочей части РВ параболой. 2. $v_{пр}$, $b_{пр}$ – параметры аппроксимации *правого* контура рабочей части РВ параболой. 3. ϵ , ρ – параметры аппроксимации рабочей части РВ конусом с округлённой вершиной.

Приложение 2

Геометрические параметры резцовой вставки №2 [67]

Величина заглубления РВ a , мкм	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$	ϵ , градусы	ρ , мкм
5,71	4,15	3,83	0,79	1,06	142,62	18,92
8,57	4,12	3,84	0,75	0,96	135,34	22,09
11,43	4,12	3,90	0,73	0,89	129,64	24,41
14,29	4,14	3,95	0,71	0,86	125,92	26,60
17,14	4,15	3,98	0,70	0,85	123,92	29,04
20,00	4,15	4,00	0,70	0,84	122,44	31,02
22,86	4,15	4,04	0,70	0,83	120,49	32,73
25,71	4,16	4,09	0,70	0,81	117,91	34,45
28,57	4,16	4,14	0,70	0,80	115,89	35,94
31,43	4,16	4,19	0,70	0,79	114,09	37,56
34,29	4,15	4,23	0,70	0,78	112,55	39,23
37,14	4,14	4,27	0,70	0,77	111,33	40,64
40,00	4,12	4,31	0,71	0,76	110,21	42,26
42,86	4,11	4,35	0,71	0,75	109,13	43,76
45,71	4,08	4,39	0,72	0,75	108,37	45,38
48,57	4,06	4,42	0,72	0,74	107,61	46,85
51,43	4,04	4,45	0,72	0,74	106,92	48,46
Среднее значение	4,127	4,14	0,715	0,822	118,49	35,26

Геометрические параметры резцовой вставки №3 [67]

Величина заглубления РВ a , мкм	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$	ϵ , градусы	ρ , мкм
5,71	2,40	3,92	1,20	0,80	119,11	22,55
8,57	3,09	3,99	0,98	0,79	97,49	27,58
11,43	3,41	4,23	0,90	0,74	93,30	29,51
14,29	3,64	4,36	0,85	0,72	99,95	31,62
17,14	3,70	4,46	0,84	0,71	118,62	31,07
20,00	3,87	4,50	0,81	0,70	121,87	34,92
22,86	3,96	4,41	0,79	0,71	122,08	33,98
25,71	4,12	4,36	0,77	0,72	120,94	35,96
28,57	4,22	4,33	0,75	0,73	119,51	39,40
31,43	4,27	4,31	0,74	0,73	118,46	39,75
34,29	4,32	4,24	0,74	0,74	116,74	44,08
37,14	4,35	4,21	0,73	0,74	115,76	45,88
40,00	4,36	4,17	0,73	0,74	114,96	46,38
42,86	4,37	4,15	0,73	0,75	114,20	48,15
45,71	4,41	4,13	0,73	0,75	112,70	51,12
48,57	4,40	4,08	0,73	0,75	111,94	51,40
51,43	4,40	4,06	0,73	0,76	111,64	53,26
Среднее значение	3,958	4,23	0,809	0,74	113,49	39,21

Геометрические параметры резцовой вставки №4 [67]

Величина заглубления РВ a , мкм	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$	ϵ , градусы	ρ , мкм
8,57	2,17	1,34	1,04	1,34	150,20	19,88
11,43	2,29	1,52	1,00	1,23	165,04	23,11
14,29	2,32	1,72	0,98	1,14	151,66	23,40
17,14	2,46	1,89	0,94	1,08	139,50	25,82
20,00	2,57	2,02	0,91	1,03	131,69	28,34
22,86	2,65	2,13	0,89	1,00	126,54	33,45
25,71	2,66	2,23	0,89	0,97	124,20	33,93
28,57	2,68	2,30	0,89	0,95	122,41	36,12
31,43	2,70	2,36	0,88	0,94	121,00	38,28
34,29	2,72	2,44	0,88	0,92	119,19	43,06
37,14	2,73	2,47	0,88	0,91	118,61	43,69
40,00	2,74	2,48	0,88	0,91	118,00	47,39
42,86	2,75	2,49	0,88	0,91	117,72	48,14
45,71	2,75	2,50	0,87	0,91	117,44	50,37
48,57	2,75	2,53	0,87	0,90	116,84	55,06
51,43	2,75	2,53	0,87	0,90	116,64	57,28
Среднее значение	2,606	2,184	0,909	1,002	128,54	37,96

Геометрические параметры резцовой вставки №5 [67]

Величина заглубления РВ a , мкм	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$	ϵ , градусы	ρ , мкм
5,71	8,30	7,84	0,75	1,15	162,38	78,75
8,57	8,23	8,07	0,71	0,97	156,53	74,88
11,43	8,23	8,34	0,67	0,84	150,37	73,27
14,29	8,25	8,54	0,65	0,76	145,10	70,87
17,14	8,29	8,73	0,63	0,71	139,90	70,21
20,00	8,33	8,87	0,61	0,67	135,60	69,78
22,86	8,38	8,95	0,59	0,66	131,39	68,98
25,71	8,38	9,04	0,59	0,64	129,41	69,20
28,57	8,37	9,12	0,60	0,63	127,87	69,54
31,43	8,35	9,20	0,60	0,61	126,15	70,48
34,29	8,31	9,26	0,61	0,60	125,09	71,58
37,14	8,27	9,33	0,61	0,59	123,91	73,03
40,00	8,22	9,38	0,62	0,59	123,04	74,88
42,86	8,17	9,42	0,62	0,58	122,33	76,64
45,71	8,12	9,45	0,63	0,58	121,68	78,53
48,57	8,08	9,48	0,63	0,58	121,03	80,38
51,43	8,03	9,50	0,64	0,57	120,44	82,23
Среднее значение	8,254	8,972	0,633	0,69	133,07	73,72

Геометрические параметры резцовой вставки №6 [67]

Величина заглубления РВ a , мкм	$b_{л}$	$b_{пр}$	$v_{л}$	$v_{пр}$	ϵ , градусы	ρ , мкм
8,57	2,39	2,87	1,05	0,97	168,75	20,68
11,43	2,71	3,05	0,96	0,93	148,15	27,57
14,29	2,78	3,20	0,94	0,89	139,99	27,98
17,14	2,87	3,14	0,92	0,90	135,86	35,54
20,00	2,89	3,06	0,91	0,92	135,42	35,64
22,86	3,05	3,07	0,88	0,92	131,41	42,84
25,71	3,05	3,09	0,88	0,91	130,53	46,09
28,57	3,04	3,09	0,88	0,91	130,14	47,07
31,43	3,05	3,12	0,88	0,91	129,13	50,17
34,29	3,04	3,14	0,88	0,91	128,58	54,86
37,14	3,03	3,17	0,88	0,90	128,04	57,88
40,00	3,03	3,18	0,88	0,90	127,39	62,96
42,86	3,03	3,20	0,88	0,90	127,12	63,85
45,71	3,02	3,21	0,88	0,90	126,72	68,81
48,57	3,00	3,23	0,89	0,89	126,32	73,18
51,43	3,00	3,25	0,89	0,89	126,04	76,15
Среднее значение	2,936	3,129	0,905	0,909	133,72	49,45

Характеристики зёрен различных шлифовальных материалов [15, 38, 49, 67]

Зерни- стость	14A		53C		63C	
	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i>	<i>v</i>	<i>b</i>	<i>v</i>
F90 (16)	–	–	7,32	0,91	7,74	0,89
F70 (20)	7,17	0,91	6,96	0,92	8,16	0,86
F60 (25)	–	–	5,95	0,98	8,56	0,86
F54 (32)	8,35	0,88	7,55	0,93	9,28	0,86
F40 (40)	7,52	0,97	7,95	0,94	7,99	0,94
F36 (50)	–	–	9,10	0,91	8,32	0,95
F30 (63)	–	–	–	–	–	–
F24 (80)	10,48	0,89	–	–	–	–

Объёмное содержание зёрен, связки и пор в кругах различной структуры и твёрдости, % [4]

Номер струк- туры	Объем зерна, %	M2	M3	CM1	CM2	C1	C2	CT1	CT2
		Объем пор, %							
		45,0	43,5	42,0	40,5	39,0	37,5	36,0	34,5
		Объем связки, %							
1	60	–	–	–	–	1	2,5	4	5,5
2	58	–	–	–	1,5	3	4,5	6	7,5
3	56	–	0,5	2	3,5	5	6,5	8	9,5
4	54	1	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5
5	52	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5
6	50	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5
7	48	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5
8	46	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5
9	44	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5
10	42	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5
11	40	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5
12	38	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5

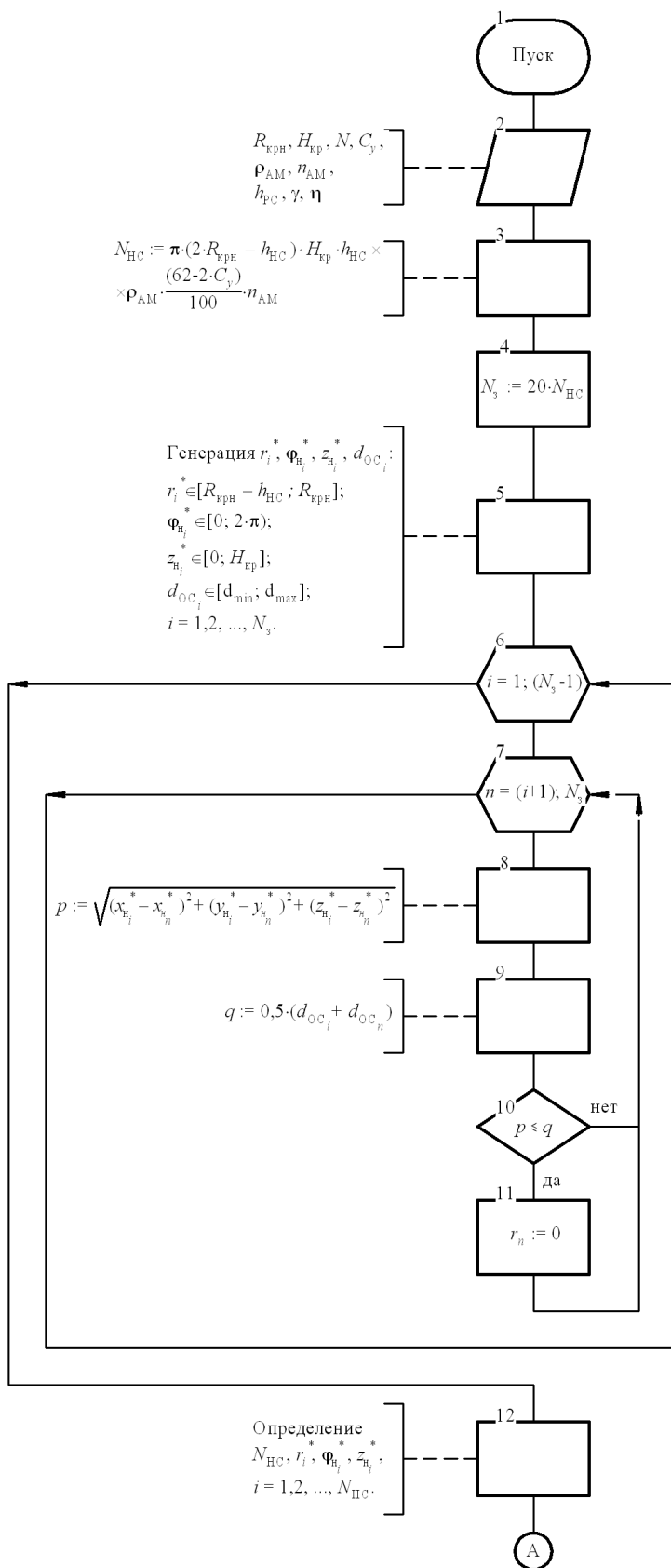
Области применения абразивных инструментов с разными номерами структур [72]

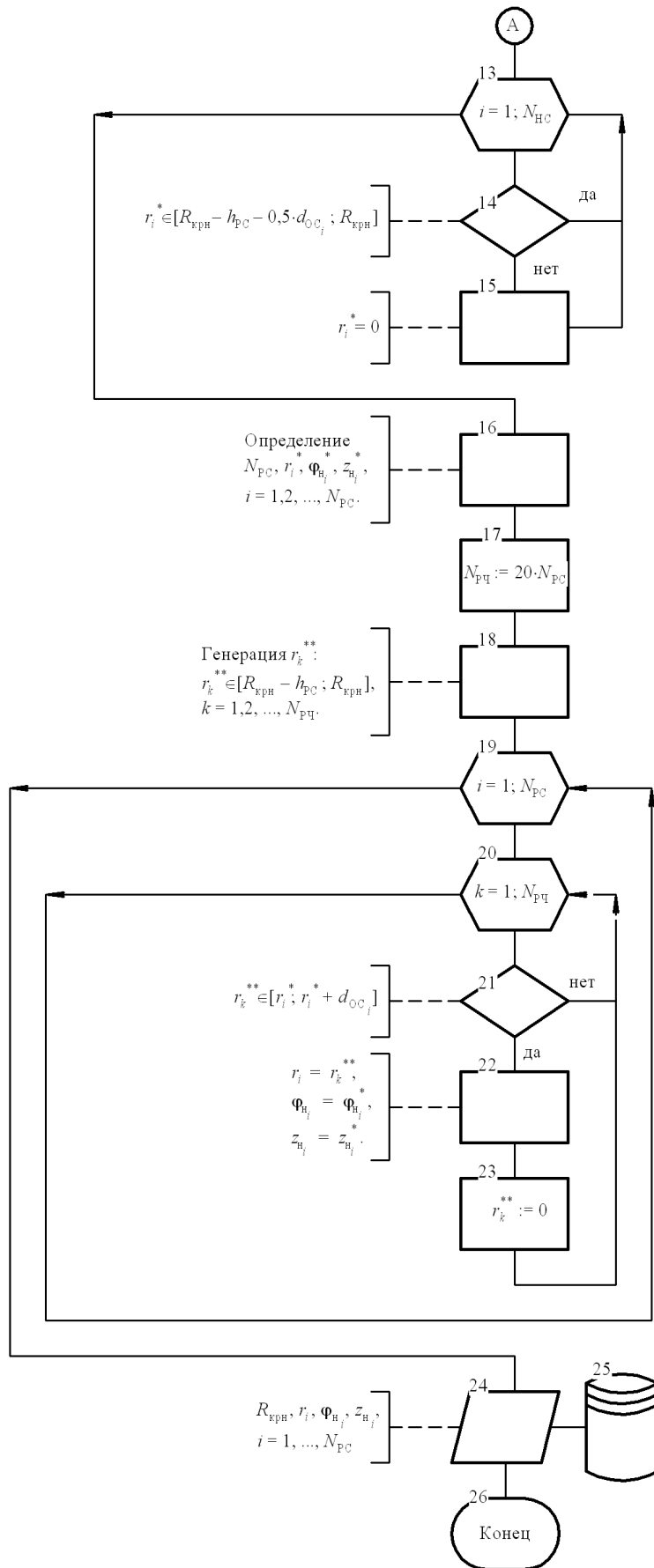
Номер структуры	Объемное содержание зёрен, %	Область применения
1...3	60...56	Шлифование заготовок с малым съемом материала кругами на бакелитовой и керамической связках
3, 4	56, 54	Шлифование с большими подачами и переменной нагрузкой. Шлифование твердых и хрупких материалов
5, 6	52, 54	Круглое наружное, бесцентровое, плоское периферией круга. Шлифование металлов с высоким сопротивлением разрыву
7, 8	48, 46	Шлифование вязких металлов с низким сопротивлением разрыву. Внутреннее шлифование, заточка инструментов, плоское шлифование торцом круга
9...12	44...38	Скоростное шлифование. Профильное шлифование мелкозернистыми кругами. Шлифование с уменьшенным тепловыделением в зоне резания

Рекомендуемые режимы алмазной правки шлифовальных кругов методом обтачивания [64]

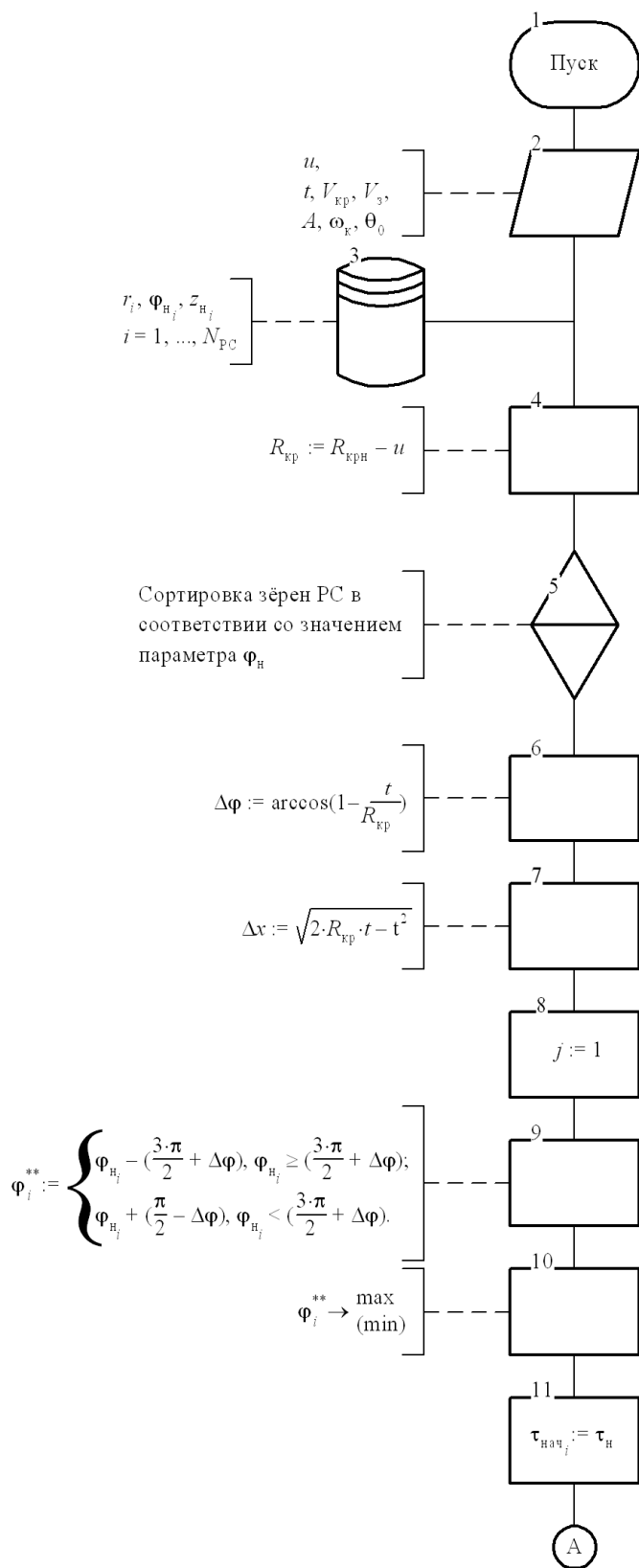
Вид шлифования	Ra, мкм	Режим правки	Подача S _м , м/мин	Глубина t при рабочих ходах (р.х.), мм/дв. ход				Число выжидающих ходов
				черновых		чистовых		
				величина подачи	число р.х.	величина подачи	число р.х.	
Круглое наружное на проход	0,8	грубый	0,3...0,4	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	—
	0,4	средний	0,2...0,3	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	1
	0,2	тонкий	0,1...0,2	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	1...2
	0,1	сверхтонкий	0,05...0,1	0,02...0,03	2...3	0,005	1...2	1...2
Круглое врезанием	0,8	грубый	0,15...0,25	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	1
	0,4	средний	0,08...0,15	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	1...2
	0,2	тонкий	0,05...0,08	0,02...0,03	2...3	0,005	1...2	1...2
Плоское	0,8	грубый	0,6...0,8	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	1
	0,4	средний	0,4...0,6	0,02...0,03	2...3	0,01	1...2	1...2
	0,2	тонкий	0,2...0,4	0,02...0,03	2...3	0,005	1...2	1...2
Внутреннее	0,8	грубый	2,0...3,0	0,02...0,03	2...4	0,01	1...2	1...2
	0,4	средний	1,0...2,0	0,02...0,03	2...4	0,005	1...2	2...3

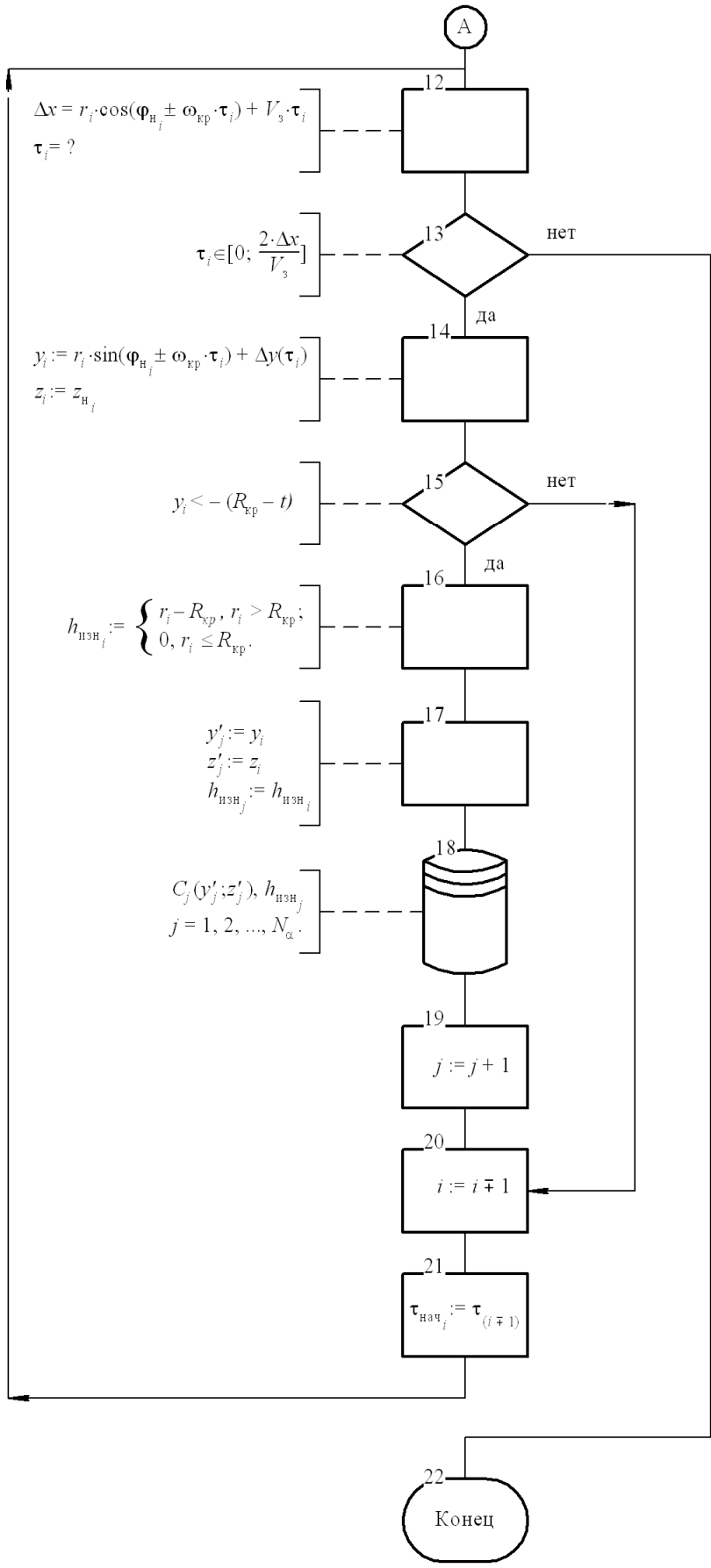
Блок-схема алгоритма моделирования рабочего слоя шлифовального круга



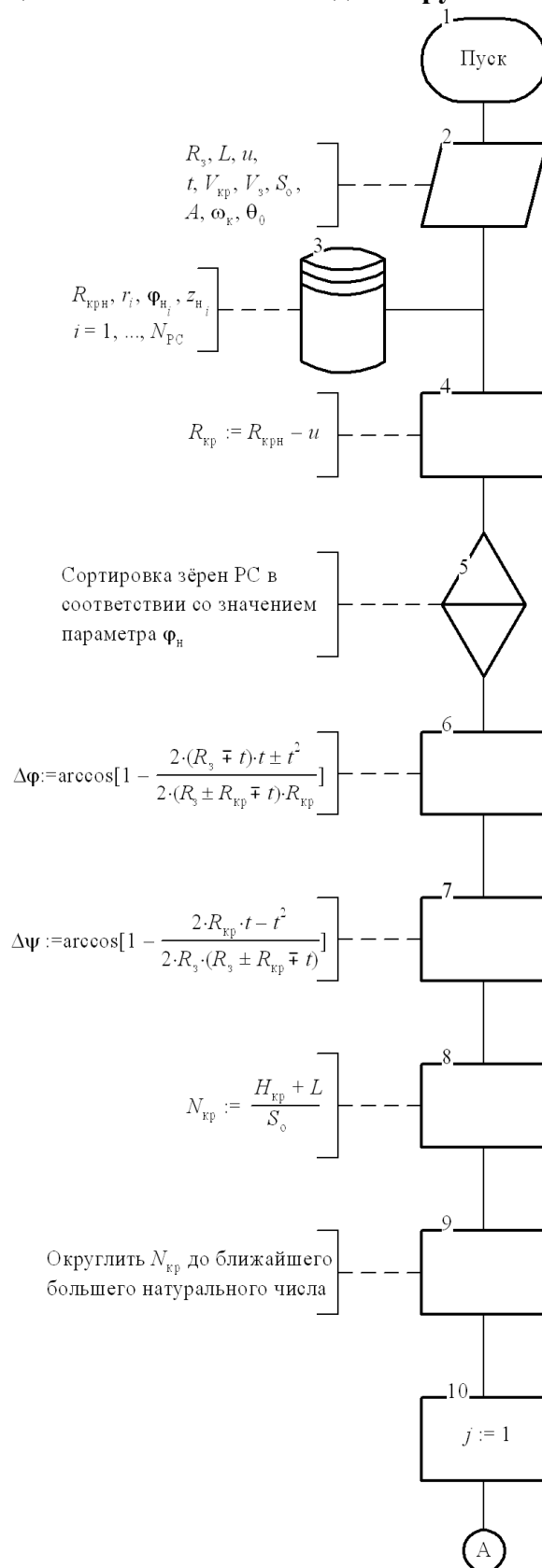


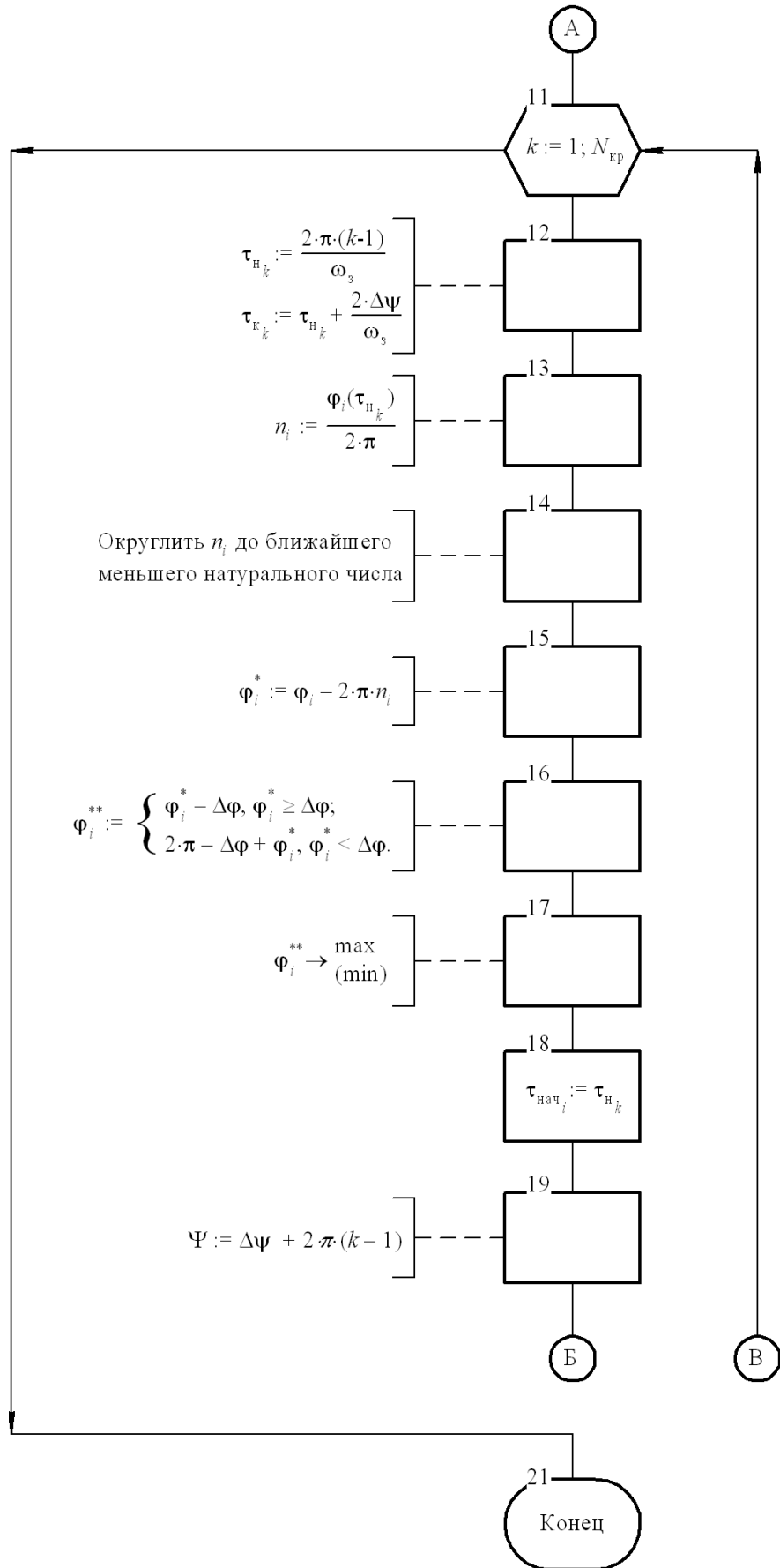
Блок-схема алгоритма реализации кинематической модели плоского шлифования

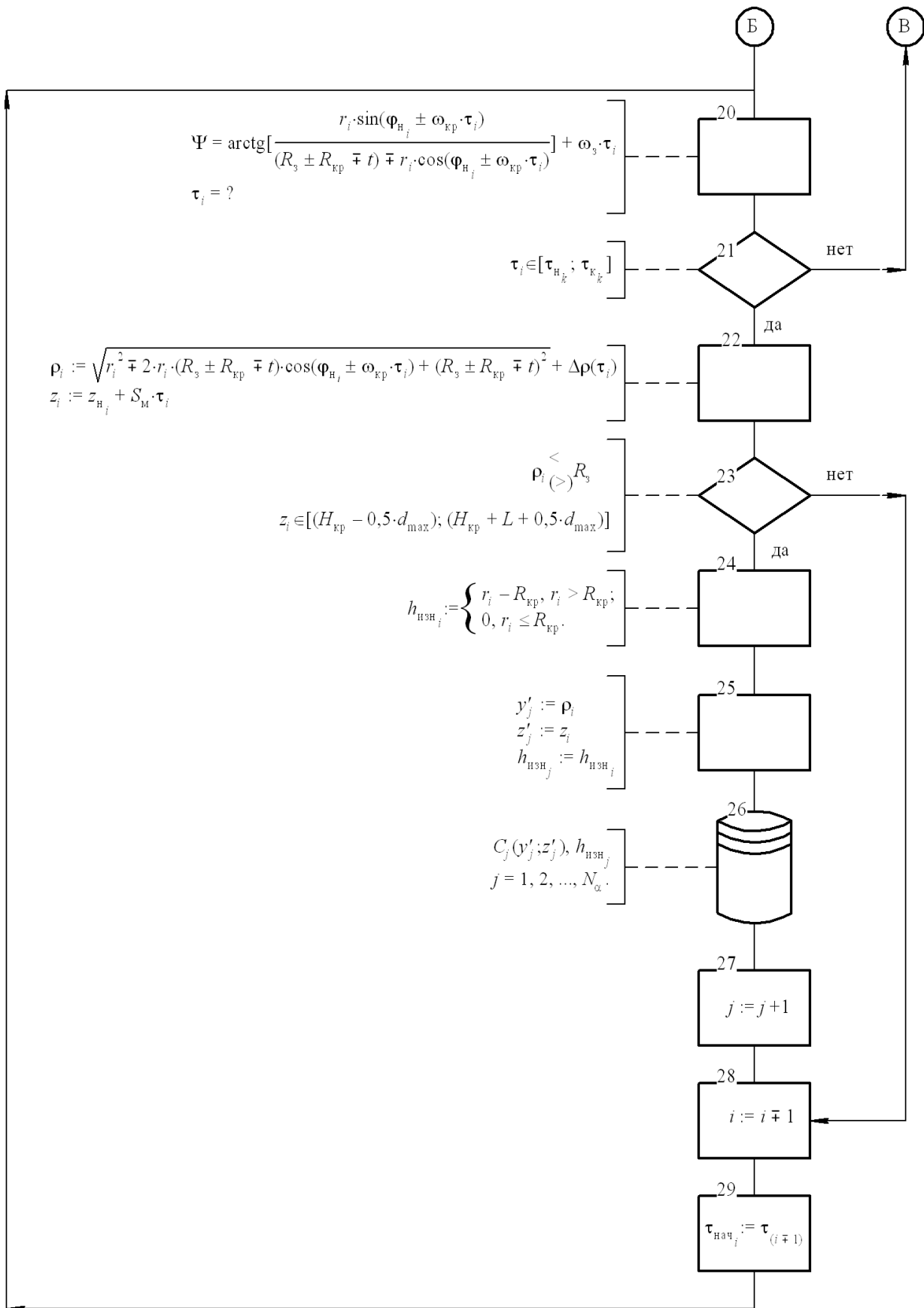




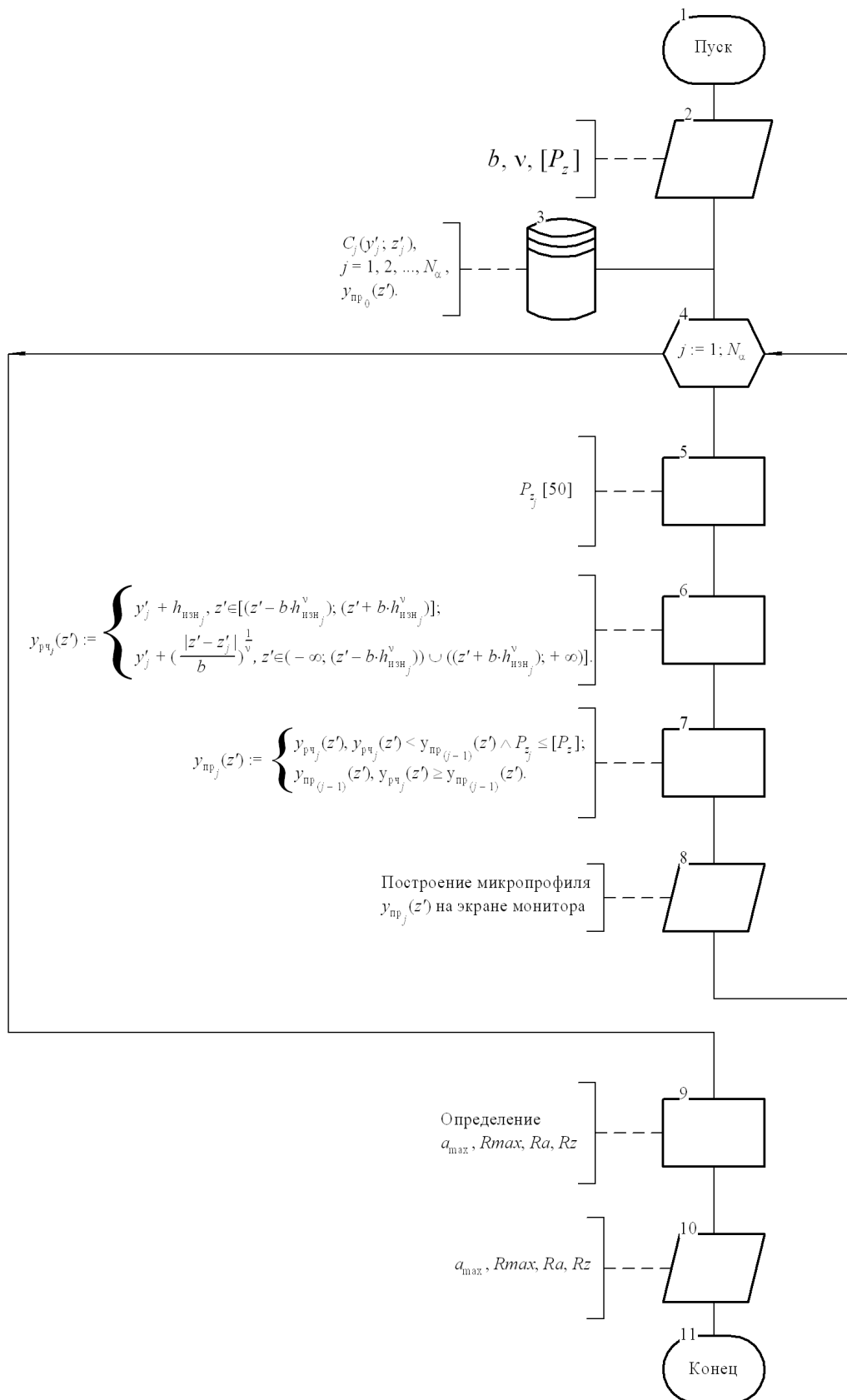
Блок-схема алгоритма реализации кинематической модели круглого шлифования







Блок-схема алгоритма реализации модели процесса формирования поперечного микропрофиля детали

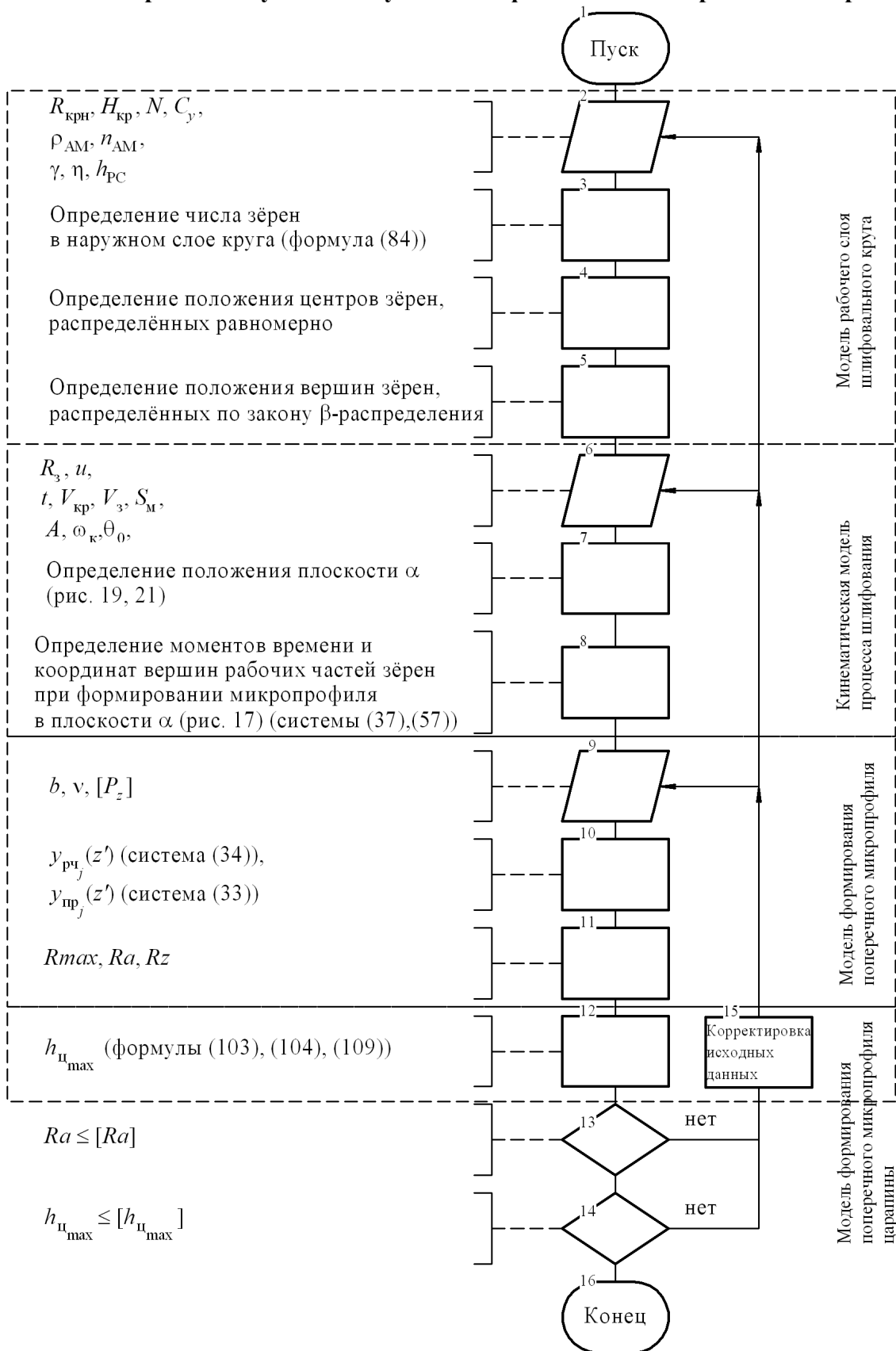


Характеристики рельефа исследованных кругов

№ п/п	Характеристика ШК	Завод-изготовитель	Состояние РП	Размеры анализируемого участка РС $a \times b \times h_{PC}$, мкм	γ	η	χ^2	$\chi^2_{кр}$	b_s	v_s
1.	1 125×16×32 14А 25-Н СМ2 7 К (А F60 L 7 V)	ВАЗ	новый ШК	10725×1329×407	1,69	3,92	11,49	12,6	42,46	3,95
			тонкая правка	9237×2219×326	0,73	2,57	10,63	14,1	12,98	2,56
			грубая правка	8131×2202×356	1,3	5	13,74	12,6	10,16	2,37
			3 мин. шлифования	8697×2145×293	0,71	3,29	13,84	14,1	15,11	2,74
2.	1 125×16×32 25А 25-Н СМ2 7 К (WA F60 L 7 V)	ВАЗ	новый ШК	6412×1321×379	1,59	3,13	10,15	11,1	4,14	2,46
			тонкая правка	9360×2202×379	0,68	3,01	11,26	12,6	12,5	2,47
			грубая правка	8246×2158×376	0,63	3,67	9,36	12,6	6,34	1,89
			3 мин. шлифования	8724×2141×334	0,79	4,66	10,82	12,6	22,46	3,15
3.	1 125×25×32 25А 40-Н СМ2 6 К (WA F46 L 6 V)	ВАЗ	новый ШК	10320×1601×415	0,97	1,73	10,86	11,1	4,31	2,7
			тонкая правка	9420×3257×465	0,87	3,2	11,38	12,6	5,71	2,17
			грубая правка	8143×3228×419	0,37	1,61	11,33	12,6	2,69	1,55
4.	1 125×25×32 25А 40 СТ2 5 К (WA F46 P 5 V)	ВАЗ	новый ШК	10425×1601×387	0,53	3,3	10,4	11,1	7,8	2,05
			тонкая правка	9427×3321×466	0,58	2,82	10,91	12,6	13,26	2,37
			грубая правка	8229×3303×465	0,59	2,62	11,82	12,6	7,02	1,99
5.	1 125×20×32 64С 25-Н СМ1 7 К (GC F60 K 7 V)	ВАЗ	новый ШК	10401×1080×362	1,47	3,06	10,75	12,6	23,3	3,35
			тонкая правка	9356×2196×293	0,81	4,08	10,65	12,6	55,47	3,49
			грубая правка	8234×2181×302	0,7	2,98	12,49	12,6	7,23	2,11
			3 мин. шлифования	8642×2179×334	0,86	3,22	12,18	12,6	31,21	3,15
6.	1 125×16×32 64С 40-Н СМ1 7 К (GC F46 K 7V)	ВАЗ	новый ШК	10637×1663×417	0,68	3,14	11,07	11,1	6,28	1,8
			тонкая правка	9320×3337×466	0,79	3,61	12,04	12,6	20,79	2,67
			грубая правка	8128×3313×449	0,43	2,6	10,17	12,6	5,6	1,76
			3 мин. шлифования	8773×3255×327	0,81	2,94	11,86	12,6	20,67	3,39
7.	1А1 125×20×32×5 АС4 100/80 В2-01 100	ВАЗ	новый ШК	10640×1100×96	5,58	15,32	13,2	15,5	454,73	4,37
8.	1 125×25×32 25А 40 СМ1 6 К2 (WA F40 K 6 V2) «EXTRA»	ЛАЗ	новый ШК	10448×1619×428	3,67	6,85	10,71	11,1	13,7	3,85
			тонкая правка	9372×3356×526	2,37	4,7	10,39	11,1	2,91	1,7
			грубая правка	8178×3332×464	0,89	4,39	12,55	12,6	8,98	2,44
9.	1 125×25×32 63С 25 СМ1 7 К2 (GC F60 K 7 V2) «EXTRA»	ЛАЗ	тонкая правка	9421×2179×355	0,98	4,36	13,28	14,1	75,32	3,47
			грубая правка	8144×2166×336	0,68	4,1	13,57	14,1	15,2	2,43

Примечание. ВАЗ – Волжский абразивный завод. ЛАЗ – Лужский абразивный завод.

Блок-схема алгоритма обеспечения требуемой шероховатости шлифованной поверхности с учётом отсутствия дефектов в виде абразивных царапин



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под. ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Анухин В.И. Допуски и посадки. Выбор и расчёт, указание на чертежах: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 219 с.
3. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
4. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
5. Бишутин С.Г. Прогнозирование и обеспечение параметров шероховатости шлифованной поверхности на основе моделирования процессов правки круга и обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Брянск, 1998. – 172 с.
6. Богорад Л.Я. Хромирование. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 97 с.
7. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. – Л.: Машиностроение, 1964. – 123 с.
8. Витенберг Г.В., Шкуркин В.В. О навалах на шлифовочных рисках // Тр. ВНИИАШ. – 1970. – № 10. – С. 99 – 105.
9. Владецкая Е.А. Расчет параметров качества обрабатываемой поверхности при шлифовании // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – С. 29–34.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 12-е изд., перераб. – М.: Высшее образование, 2006. – 479 с.
11. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – 12-е изд., перераб. – М.: Высшее образование, 2006. – 476 с.
12. Гусев В.В. Влияние хрупкого разрушения материала припуска керамики на формирование микрорельефа поверхности детали при алмазном шлифовании // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2004. – С. 22–27.
13. Демкин Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
14. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

15. Дрябов А.Н., Осипов А.П. Программа для анализа режущих кромок абразивных зёрен «GrainLab» // Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы. Сборник статей Всероссийской науч.-технич. конф.-семинара – Самара, 2006. – С. 58 – 61.
16. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 216 с.
17. Ефимов В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1992. – 132 с.
18. Зубарев Ю.М., Теннисон И.Д. Моделирование процесса плоского шлифования однослойными эльборовыми кругами // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифабразив-2001». – Волжский, 2001. – С. 284 – 286.
19. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Технологические основы высокопроизводительного шлифования сталей и сплавов. – СПб: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1994. – 225 с.
20. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. – М.: Машиностроение, 1969. – 334 с.
21. Исаков В.М. Оптимизация автоматических циклов шлифования, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Челябинск, 1991. – 171 с.
22. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1979. – 244 с.
23. Казинец Е.М. Имитационное моделирование процесса шлифования кругами из эльбора на гальванической связке: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Санкт-Петербург, 1993. – 134 с.
24. Калинин Е. П., Шашков М.А. Анализ схемы расположения абразивных зёрен в объёме шлифовального круга // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 6. – С. 136–140.
25. Козлов А.М. Определение параметров рабочей поверхности абразивного инструмента на основе моделирования // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 1. – С. 51 – 56.
26. Козлов А.М. Повышение качества и точности цилиндрических деталей при шлифовании. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2004. – 181 с.
27. Козлов А.М., Ефремов В.В. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом // Известия вузов. Машиностроение. – 2004. – № 1. – С. 59 – 64.
28. Корниенко А.С. Обеспечение формирования поверхностного слоя конструкционной керамики на основе имитационного моделирования процессов алмазного шлифования: автореферат магистерской диссертации [Электронный ресурс] // Портал магистров ДонНТУ. – URL: <http://masters.donntu.edu.ua/2004/mech/korniyenko/diss/index.htm> (дата обращения 06.08.2008).

29. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 189 с.
30. Королев А.В., Новосёлов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч.1. Состояние рабочей поверхности инструмента. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. – 160 с.
31. Королев А.В., Новосёлов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч.2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 160 с.
32. Коротков А.Н., Баштанов В. Г. Анализ формы абразивных зёрен // Вестник КузГТУ. – 2000. – № 5. – С. 54 – 60.
33. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
34. Кремень З.И. Выбор оптимальных условий абразивной доводки металлов // Вестник машиностроения. – 1969. – № 5. – С. 48 – 49.
35. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
36. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981.– 212 с.
37. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974.– 320 с.
38. Маслова А.Ю., Осипов А.П., Федотов В.В. О методике определения геометрических параметров абразивной режущей кромки // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифабразив-2006». – Волжский, 2006. – С. 74 – 77.
39. Михалов А.А. Обработка деталей с гальваническими покрытиями. – М: Машиностроение, 1981. – 143 с.
40. Никифоров И.П. К вопросу о геометрии абразивного зерна // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 9. – С. 65 – 68.
41. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования // Известия вузов. Машиностроение. – 2003. – № 6. – С. 64 – 72.
42. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 220 с.
43. Носенко В.А., Федотов Е.В. Методика расчёта распределения вершин зёрен на рабочей поверхности абразивного инструмента и параметров шероховатости обработанной поверхности // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей междунар. науч.-технич. конф. «Шлифабразив-2004». – Волжский, 2004. – С.51 – 54.

44. Носов Н.В. Абразивная обработка деталей инструментами из СВС-материалов. – Самара: Изд-во СамГТУ, 2005. – 362 с.
45. Носов Н.В. К вопросу о формировании остаточных напряжений при шлифовании // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2002. – № 15. – С. 131 – 139.
46. Носов Н.В. Моделирование процесса шлифования // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2002. – № 14. – С. 77 – 81.
47. Носов Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путём направленного регулирования их функциональных показателей: дис. ... докт. техн. наук.: 05.02.08, 05.03.01. – Самара, 1997. – 452 с.
48. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1990. – 474 с.
49. Осипов А.П., Федотов В.В. Методика экспериментального определения геометрических параметров абразивных зерен // Известия ВУЗов. Машиностроение. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012.- №11. – С. 66 – 70.
50. Осипов А.П. К вопросу расчёта сил при резании единичным абразивным зерном // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2004. – № 24. – С. 144 – 151.
51. Осипов А.П. Угол сдвига и его влияние на стружкообразование при шлифовании // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 6-2 (290). – С. 73 – 79.
52. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1981. – 141 с.
53. Пилинский В.И., Даней Н.П. Производительность, качество и эффективность скоростного шлифования. – М: Машиностроение, 1986. – 80 с.
54. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
55. Попов С.А., Соколова Л.С. Влияние однородности зернового состава абразива и формы зёрен на рельеф режущей поверхности шлифовальных кругов // Абразивы. – 1972. – № 12. – С. 2 – 6.
56. Попов С.А., Соколова Л.С. Формирование рельефа режущей поверхности шлифовальных кругов // Алмазы. – 1973. – № 7. – С. 11 – 17.
57. Правиков Ю. М. Повышение эффективности операций шлифования путем снижения закаливания рабочей поверхности шлифовального круга (на примере шлифования заготовок из алюминиевых сплавов): дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08. – Ульяновск, 1982. – 244 с.

58. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
59. Развитие науки о резании металлов / под. ред. Н.Н. Зорева. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
60. Редько С.Г., Королёв А.В. Расположение абразивных зёрен на рабочей поверхности шлифовального круга // Станки и инструмент. – 1970. – № 5. – С. 40 – 41.
61. Режимы резания металлов: Справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич [и др.]; под ред. А.Д. Корчемкина. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: НИИавтопром, 1995. – 456 с.
62. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 287 с.
63. Роганов В.Р., Роганова С.М., Новосельцева М.Е. Обработка экспериментальных данных: учебно-методическое пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – 172 с.
64. Романов В.Ф., Авакян В.В. Технология алмазной правки шлифовальных кругов. – М.: Машиностроение, 1980. – 118 с.
65. Ромашкин В.Г. Исследование возможности повышения качества деталей на операциях круглого наружного шлифования путём тонкой очистки технологических жидкостей: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08. – Куйбышев, 1982. – 18 с.
66. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.
67. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008612376. Исследователь абразивных зёрен / Дрябов А.Н., Осипов А.П.; правообладатель ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет». – № 2008611390; заявл. 02.04.2008; зарег. 16.05.2008.
68. Семко М.В., Грабченко А.И. Шлифование фасонных поверхностей деталей машин – Самара: Самарск. книжное изд-во, 1993. – 207 с.
69. Синтетические алмазы в машиностроении / В.Н. Бакуль, Б.И. Гинзбург, Л.Л. Мишнаевский [и др.]; под ред. В.Н. Бакуля. – Киев: Наук. думка, 1976. – 352 с.
70. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Обработка металлов шлифованием и методы ее интенсификации: учебное пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 1997.– 88 с.
71. Скуратов Д.Л. Разработка и совершенствование технологических методов и средств, обеспечивающих повышение качества и снижение трудоемкости изготовления деталей ГТД: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.07.05. – Самара, 2004. – 43 с.
72. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 944 с.

73. Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
74. Степанов Ю.С., Щадрин И.Ф., Поляков А.И. Имитационное моделирование процесса внутреннего шлифования сборным комбинированным инструментом // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. – № 6. – С. 33 – 35.
75. Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и поверхности детали. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 215 с.
76. Степанов Ю.С. Трёхмерная инженерия поверхности / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.А. Белкин [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. – № 7. – С. 29 – 34.
77. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
78. Суслов А.Г., Бишутин С.Г. Математическая модель шероховатости шлифованной поверхности // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – № 8. – С. 17 – 19.
79. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
80. Тимирзина О.М. Моделирование процесса формирования шероховатости шлифованной поверхности // Exponenta.ru: образовательный математический сайт. – URL: http://www.exponenta.ru/educat/konkursreferatov3/konkursref_works.asp (дата обращения 29.11.2007).
81. Трусов В.Н. Теоретические основы круглого электроабразивного шлифования деталей ГТД и повышение его эффективности на основе применения кругов специальных конструкций: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.07.05. – Самара, 2001. – 43 с.
82. Условия уменьшения шероховатости обработки при шлифовании / С.А. Дитиненко [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2008. – С. 16–22.
83. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979. – 248 с.
84. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1973. – 136 с.
85. Филин А.Н., Носов Н.В., Рахчеев В.П. Шлифование фасонных поверхностей деталей машин: учебное пособие. – Самара: Изд-во СамГТУ, 1994. – 57 с.
86. Худобин Л.В., Белов М.А. Шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов с применением СОЖ // Вестник машиностроения. – 1986. – № 3. – С. 48 – 52.

87. Худобин Л.В., Ромашкин В.Г. Тонкая очистка технологических жидкостей при шлифовании // Резание и инструмент: Респ. междувед. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. – Вып. 31. – С. 3 – 10.
88. Широков А.В., Осипов А.П. К вопросу о прогнозировании и обеспечении параметров шероховатости шлифованной поверхности // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 6. – С. 76 – 88.
89. Широков А.В., Осипов А.П. Прогнозирование параметров шероховатости шлифованной поверхности с учетом пластического оттеснения металла абразивными зернами // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». – 2010. – № 53. – С. 140 – 151.
90. Широков А.В., Осипов А.П., Мансуров Р.Н. Проверка адекватности разработанной математической модели формирования шероховатости шлифованной поверхности на основе экспериментов по микрорезанию единичным абразивным зерном // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». – 2010. – № 54. – С. 139 – 153.
91. Широков А.В., Осипов А.П. Имитационное моделирование формообразования шлифованной поверхности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4(3). – С. 905 – 909.
92. Широков А.В., Осипов А.П., Мансуров Р.Н. Исследование топограмм шлифовальных кругов различных характеристик // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – № 10. – С. 76 – 80.
93. Широков А.В., Осипов А.П. Совершенствование технологии обработки крупногабаритных деталей на основе имитационного моделирования процесса шлифования // Главный механик. – М.: Промиздат. – 2012. – № 1. – С. 28 – 33.
94. Экспериментальное определение реальной штучной плотности абразивного материала / В.В. Федотов, О.В. Казанцева, К.С. Пикалёва [и др.] // Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы. Сборник статей V Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции-семинара – Самара, 2010. – С. 74 – 79.
95. Эльянов В.Д. Точность и качество поверхности при обработке абразивными инструментами. – М.: Машиностроение, 1977. – 48 с.
96. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
97. Ящерицын П.И., Жалнерович Е.А. Шлифование металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Беларусь, 1970. – 464 с.

98. Ghosh S., Chattopadhyay A.B., Paul S. Study of grinding mechanics by single grit grinding test // International Journal Precision Technology. – 2010. – Vol.1. – Nos. 3/4. – pp. 356 – 367.
99. Hecker R.L., Liang S.Y. Grinding force and power modeling based on chip thickness in fine grinding // Journal of Manufacturing Science. – 2003.
100. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – 43. – pp. 755 – 761.
101. Malkin S. Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. – SME, 1996. – 275 p.
102. Malkin S., Guo C. Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. – Second edition. – Industrial Press Inc., 2008. – 372 p.
103. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – 42. – pp. 969 – 977.
104. Интернет ресурс: <http://www.stroitelstvo-new.ru/zhestyanye-raboty/kisloty-dlja-travlenija-metalla.shtml#> - Кислоты для травления металлов: сайт stroitelstvo-new.ru. [URL] - (дата обращения 01.06.2015).

Монография

**Повышение эффективности шлифования
заготовок на основе имитационного моделирования
процесса формирования шероховатости поверхности**

*ШИРОКОВ Алексей Владимирович
ОСИПОВ Александр Петрович*

Редакторы:
*Е.С. Захарова
И.А. Назарова*

Подписано в печать 26.12.16г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п. л. 8,4 Уч.-изд. л. 8
Тираж 100 экз. Рег. № 15/16sf

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Самарский государственный технический университет»
443100. г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии филиала СамГТУ в г. Сызрани
446001, г. Сызрань, ул. Советская,45